

Der Feldbegriff im Physikunterricht

- Ein Analogieversuch: Magnetisches Feld als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner -

Erwin Fütterer, Olaf Krey, Thorid Rabe

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Didaktik der Physik, Hoher Weg 8, 06120 Halle
erwin.fuetterer@student.uni-halle.de, olaf.krey@physik.uni-halle.de, thorid.rabe@physik.uni-halle.de

Kurzfassung

Der Feldbegriff ist einer der fundamentalen Begriffe der Physik und auch im Physikunterricht wird er zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge an verschiedenen Stellen verwendet. Einerseits ist der Feldbegriff damit grundsätzlich geeignet, um verschiedene Unterrichtsinhalte miteinander zu vernetzen (kumulatives Lernen, potentiell Basiskonzept) und die Lernenden mit einer Grundidee der Physik (Stoff- und Feldstruktur der Materie) exemplarisch bekannt zu machen. Andererseits bleibt der Feldbegriff für die meisten Lernenden unverstanden und wird nur selten als nützlich erlebt. Im Mittelpunkt des Beitrags steht die Konzeption eines Versuchs, der die Existenz des magnetischen Feldes nahelegt und somit das Feld als *realen* Interaktionspartner zugänglich macht. Inwiefern diese Bemühungen tatsächlich lernförderlich sind und wie sie sich z.B. auf das Verstehen des Feldlinienkonzeptes auswirken, bleibt empirisch zu prüfen.

1. Überblick

Das elektromagnetische Feld und damit auch der physikalische Feldbegriff wurde mit den Arbeiten von Maxwell [1], die M. Faradays Ideen mathematisierten, zum festen Bestandteil in der physikalischen Modellbildung. Dabei wird es, wie etwa "Körper und Teilchen" ([2], S. 852), in analoger Weise unter den Systembegriff subsummiert.

Der Feldbegriff nimmt damit eine prominente Position unter den physikalischen Basisbegriffen ein: Im System Körper-Feld ist das elektromagnetische Feld als quasi körperhaft-materielles Teilsystem selbstverständlicher Wechselwirkungspartner beim Energie- und (Dreh-) Impulsaustausch [3].

So werden im Physikunterricht, z.B. auch in Sachsen-Anhalt, das magneto- und das elektrostatische Feld bereits in der Sekundarstufe 1 berücksichtigt. In der Sekundarstufe 2 wird auf der Grundlage der betrachteten elektro- bzw. magnetostatischen Phänomene beim Übergang zur Elektrodynamik das elektromagnetische Feld eingeführt. Im Bereich Mechanik wird außerdem das Gravitationsfeld thematisiert [4]. Im Sinne eines kumulativen Lernens sind damit für die gesamte Schulzeit tragfähige Anfangsvorstellungen wünschenswert, an die immer wieder angeknüpft werden kann und die den Weg für ein Feldverständnis im fachwissenschaftlichen Sinne befördern.

Wie sich im nächsten Abschnitt zeigen wird, scheint der Physikunterricht gerade dieser Intention noch nicht immer gerecht werden zu können.

2. Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

Die Schwierigkeiten, mit denen die Lernenden rund um den physikalischen Feldbegriff konfrontiert

werden, sind erheblich, wie Girwidz & Storck [5] bei der Vorstellung der Befunde aus betreffenden Studien in anderen Ländern herausgearbeitet haben. Aber auch in Deutschland sind Fehlvorstellungen bei Schülerinnen und Schülern dokumentierbar, wie schon eine kleine Stichprobe (Gymnasium: 4; Gesamtschule: 1) im Rahmen einer Staatsexamensarbeit zeigen konnte [6]: In Anlehnung an White & Gunstone [7] bzw. Borges et al. [8] wurden dabei im Juni 2017 auf Basis der POE-Methode (Preception-Observation-Explanation) Interviews mit Schülerinnen und Schülern am Ende der Jahrgangsstufe 10 in Sachsen-Anhalt durchgeführt, also nach Behandlung der beiden Feldtypen im Physikunterricht. Während die Schülerinnen und Schüler Phänomene aus der Magneto- und Elektrostatik erklärten, zeigten sich neben wenigen fachadäquaten Argumentationen vor allem die Aktualität und Bandbreite von Problemen, die auf verfestigte Schülervorstellungen schließen lassen, die ihre besondere Bedeutung gerade dadurch gewinnen, dass sie im Widerspruch zu fachlich adäquaten Vorstellungen stehen. Dabei lassen sich drei zentrale Problemkategorien identifizieren:

(i) Feldlinienkonzeption bleibt unverstanden

Im Zusammenhang mit den Feldlinienbildern zeigen sich durchgängig inadäquate Argumentationen. (Gebogene) Feldlinien können als Bahnen oder Zielmarkierungen für Eisenspäne auftauchen (vgl. [9]), als Bänder einer gewissen Anzahl, die Magnetpole entsprechend stark aufeinander zuziehen, als Pfeile, die irgendwo hinzielen oder als einwirkende Strahlen, die auf ein Objekt treffen, an ihm ziehen oder darauf stoßen (vgl. [10,11,12]). Pfeillängen und -dicken können dabei etwas über die (Feld-)Stärke aussagen.

(ii) fernwirkungstheoretische Erklärungen dominieren

Zunächst ist die Verwendung von Begrifflichkeiten wie „magnetisches Feld“ und „elektrisches Feld“ bei den Erklärungen der Lernenden keine Selbstverständlichkeit. Der Begriff „elektrisches Feld“ wird teilweise sogar zurückgewiesen.

Wenn die Befragten auf den Feldbegriff verzichten, wird der Fokus oft auf die (scheinbar) sichtbaren Objekt(teile) wie Magnetpole oder elektrisch geladene Objekte gelegt, die wechselseitig aufeinander einwirken (z.B. sich anziehen oder abstoßen) (vgl. [9, 10, 13]). Aber auch Fokussierungen auf das kleinere, bewegliche Objekt sind feststellbar in Form der Passivkonstruktion „wird angezogen“. Hier wird dann zum einen mit fernwirkungstheoretischen Argumentationen begründet, zum anderen aber dem Wechselwirkungsprinzip nicht konsequent Rechnung getragen. Aber auch außergewöhnliche Erklärungsfiguren können dokumentiert werden: Zwei Schülerinnen führten die Anziehung zwischen zwei verschiedenen Magnetpolen oder zweier ungleicher elektrischer Ladungen auf ein postuliertes Ausgleichs- bzw. Neutralisationsbestreben zurück, was bereits auf Vorstellungen der Kategorie (iii) verweist.

(iii) Elektrizität und Magnetismus werden vermischt

Das elektrostatische Feld wird erst gar nicht vom magnetostatischen Feld unterschieden, wobei neben elektrisch geladenen Teilchen auch zwei Sorten beweglicher magnetischer Teilchen Einzug in die Argumentationen halten. Eine ungleiche Teilchenverteilung ist dann verantwortlich für die Ausbildung der als Plus- und Minuseiten bezeichneten Pole eines Stabmagneten (vgl. [8]).

Allen drei Kategorien sind also auch nach dem Physikunterricht Erklärungsfiguren zuordenbar, die auf entsprechende Fehlvorstellungen schließen lassen. Dies ist z.T. aus der Literatur seit langem bekannt. Allerdings liegen die letzten Erhebungen im deutschsprachigen Raum wohl über 30 Jahre zurück und über das Ausmaß der Übertragbarkeit von Befunden aus anderen Ländern gibt es wenig gesicherte Erkenntnis. Eigene Arbeiten zeigen jedoch eindrücklich die vorliegende Aktualität der Verständnisschwierigkeiten (vgl. [6]).

3. Bearbeitung der Lernschwierigkeiten

Zur Bearbeitung der Problematik sind auf der Grundlage der Studienergebnisse schon verschiedene Empfehlungen ausgesprochen worden, von denen exemplarisch hier einige genannt seien: Galili [9] schlägt eine Betonung der elektrischen Feldstärke E bei der Einführung des elektrischen Feldes vor, aus der dann erst Kräfte berechnet werden und nicht umgekehrt. Außerdem spricht er sich für eine analoge Behandlung im Zusammenhang mit der Gravitation aus.

Zur Bearbeitung der Feldlinienproblematik empfehlen Pcoví & Finley [10] den geometrischen Charakter der Feldlinien zu betonen und Törnkvist et al. [11]

schlagen vor, Vektor- und Feldliniendarstellungen gleichrangig und kontrastiv zu nutzen. Pcoví [12] verweist auf positive Effekte bei der intensiven Auseinandersetzung mit historischem Material und den Vorstellungen Faradays bei der Entwicklung des Feldbegriffs im Physikunterricht.

4. Mögliche Quellen von Lernschwierigkeiten

Gerade vor dem Hintergrund der Empfehlungen aus den anderen Studien geben die in Abschnitt 2 exemplarisch vorgestellten Ergebnisse Anlass für Überlegungen zu Ursachen und Einflussfaktoren der Ausbildung solcher Schülervorstellungen. Ursachen für Befunde, wie die Dominanz von Fernwirkungsvorstellungen und das Fehlen des Feldbegriffs, Fehlvorstellungen im Zusammenhang mit Feldlinien und Mischvorstellungen im Bereich von Elektrizität und Magnetismus lassen sich zum einen in einer noch mangelhaften Umsetzung der Empfehlungen aus den anfangs angeführten Studien vermuten. Andererseits sind aber die Bereiche Magneto- und Elektrostatik schon aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit, die sich auch in ihren analogen Gleichungen (vgl. [14], S. 78) widerspiegelt, für Verwechslungen und Hybridvorstellungen anfällig.

Im Folgenden sollen mögliche Quellen oder begünstigende Faktoren für die Ausbildung einiger Schülervorstellungen exemplarisch benannt werden. Eine Überprüfung der angedeuteten Vermutungen wäre wünschenswert.

Zunächst stehen gleiche Farbgebungen bei Magnetpolen und elektrischen Ladungen in Schulbüchern (vgl. [15] S. 167 u. 223) zumindest im Verdacht, Verwechslungen oder Hybridvorstellungen weiter befördern zu können, wie auch der Begriff des *elektromagnetischen* Feldes zu einer Interpretation in diesem Sinne geradezu einlädt.

Formulierungen wie „ziehen sich an“ blenden das Feld aus und dürften eher kontraproduktiv für Nahwirkungsvorstellungen und für die Einsicht in die Notwendigkeit eines Feldbegriffs sein, worauf bereits Herrmann [16] hingewiesen hat, während die Formulierungen „wird angezogen/abgestoßen“ zusätzlich sogar das Wechselwirkungsprinzip auf sprachlicher Ebene nicht fachadäquat abbilden, was einmal mehr die sprachlichen Herausforderungen unterstreicht, vor denen der Physikunterricht steht.

Die Annahme eines Neutralisationsbestrebens verschieden geladener Teilchen kann als Zwischenstufe klassifiziert werden, verstellt aber die fachadäquate Beschreibung auf der Grundlage des Kraft- und Feldbegriffs.

Die größten Probleme bezüglich fachlich inadäquater Schülervorstellungen, sind beim Umgang mit Feldlinien zu erwarten, wenn Lernende im Bemühen um sinnstiftendes Verständnis versuchen, das Modell in ihr kognitives System zu integrieren (vgl. [17]).

Zunächst ist der Begriff „Feldlinie“ im Kontrast zu „Kraftlinie“ völlig sinnentleert, denn es gibt keine aus

der Bezeichnung ableitbare Anhaltspunkte für eine mögliche Interpretation. Der Begriff der Feldlinie basiert weiterhin im Physikunterricht nur indirekt auf der fachwissenschaftlichen Grundlage: Wenn im Unterricht vorgegeben wird, ihren Verlauf aus Eisenspanbildern durch Ablesen oder Nachzeichnen gewinnen zu können (vgl. [15], S. 223), entspricht dies nicht der fachlichen Sichtweise. Eisenspanbilder sind das Ergebnis eines recht komplexen Vorgangs, bei dem neben dem Magnetfeld Faktoren wie z. B. Eisenmagnetisierung und Reibung eine Konstellation verursachen, aus der keine einzige Feldlinie konstruierbar ist. Die tatsächlichen Konstruktionsprinzipien, die die Feldlinien-darstellungen erzeugen, bleiben völlig verborgen – lediglich die postulierte Feldlinienrichtung wird z.B. anhand der Magnetnadelausrichtung für die Schülerinnen und Schüler noch nachvollziehbar.

Sieht man von gerichteten Winkelkreisbögen ab, die längst nicht mehr in jedem Mathematikunterricht eingeführt werden, bleibt die gebogene Kurve mit Pfeil am Ende ein vernetzungsarmes Konzept, da im Mathematikunterricht parametrisierte Kurven eher nicht behandelt werden, schon gar nicht in der Sekundarstufe 1 – die einzigen geometrischen Gebilde mit Richtungsinformation sind damit besondere Geraden (Zahlenstrahl bzw. Koordinatenachsen) und Verschiebungspfeile. Die Richtung der Kraft auf einen Magnetnadelpol ist aus den Feldlinienbildern nicht in trivialer Weise rekonstruierbar, was ebenfalls zu Verwirrung und in der Folge zu fachlich inadäquaten, aber subjektiv als hilfreich empfundenen Schülervorstellungen führen kann. Die tatsächliche Richtungsinformation trägt die Feldlinie bekanntlich auf der Grundlage der Tangente im jeweiligen Kurvenpunkt der Feldlinie ([14], S. 45 u. 77), für die Schülerinnen und Schüler also versteckt. Wenn dann beim Einzeichnen von zu kurzen Kraftpfeilen an elektrisch geladenen Teilchen die Feldlinien linearisiert werden, kann es nicht verwundern, dass die Feldlinie als Bahnkurve missinterpretiert wird. In diesem Zusammenhang ist auch das begrenzte mathematische Vorwissen der Schülerinnen und Schüler relevant. So werden beispielsweise im Mathematikunterricht Sachsen-Anhalts lediglich Tangenten an Kreislinien ([18], S. 42) und Vektoren nur in Form von Verschiebungspfeilen thematisiert (S. 31). Wird in einem Bereich die Feldstärke von Lernenden mit besonders dicken Pfeilen wiedergegeben, ist das auf der Grundlage anderer Darstellungen im Physikunterricht durchaus konsistent: In Energieflussdiagrammen z.B. hat die Dicke von Pfeilen tatsächlich eine Stärkebedeutung (vgl. [15], S. 15). Aufgrund ihrer Komplexität und dem notwendigen Rückgriff auf mathematische Vorstellungen (qualitative Grundideen, nicht etwa Kalküle) stellt sich damit das Feldlinienmodell als eines der anspruchsvollsten Konstrukte des Physikunterrichts in der Sekundarstufe 1 dar. Im Zusammenhang mit der Ableitung von Feldstärken kann es darüber hinaus zu Inkonsistenzen bzw. weiteren

Fehlschlüssen kommen: Wenn unendlich viele Punkte auf einem beliebigen reellen, ja sogar auch nur rationalen Intervall liegen, ist es einsichtig, dass auch unendlich viele Feldlinien durch jede Strecke in der Zeichenebene verlaufen, die in einem von Null verschiedenen Winkel zu einer Feldlinie steht. Wird nun im Sinne einer Feldliniendichte argumentiert (vgl. [15], S. 167), so erscheint dieser Begriff auf der Grundlage dieser Anzahl zum einen gar nicht wohldefiniert. Zum anderen implizieren postulierte Unterschiede in der Feldliniendichte (und aus den davon abgeleiteten Feldstärkeunterschieden) Bereiche, in denen gar kein Feld existiert. Diese Vorstellung, beschrieben von Pociví & Finley [10], könnte aus solchen Überlegungen zusätzliche Nahrung bekommen. Keineswegs handelt es sich also nur um ein Problem oberflächlicher Auseinandersetzung mit dem Feldlinienkonzept, sondern gerade die vertiefte Auseinandersetzung offenbart dem Konzept inhärente Lernschwierigkeiten.

Nach Duit [19], einer konstruktivistischen Sichtweise auf das Lernen folgend, muss nun eine schwer zugängliche, unverstandene Inselkonzeption ihrerseits zu sinnstiftenden Eigenkonstruktionen der Lernenden geradezu einladend wirken. Hierbei wird dann das Bestreben der Schülerinnen und Schüler akut, den Feldlinien als mathematische Entitäten materielle Eigenschaften in Form von Strahlen, Bändern etc. (s.o.) zuzuordnen zu wollen, worauf unter anderem bereits Pociví & Finley [10] hingewiesen haben.

Dies geschieht dann nach Chi et al. [20] auch nicht zufällig, sondern hat die Ursache in der Ausbildung grundlegender ontologischer Kategorien, in die Menschen die Wesenheiten der Welt einteilen. In diesem Fall werden Feldlinien fälschlicherweise der Kategorie „Matter“ (S. 28) zugeordnet und enge Zusammenhänge mit Konzeptionen, die auf dem „Substanzschema“ beruhen (vgl. [21]) zementiert. Von diesem Substanzschema wird angenommen, dass es sich bereits bei Kleinkindern herausbildet und nützlich verallgemeinertes Wissen über Eigenschaften und Verhalten materieller Objekte und Substanzen abbildet.

Andererseits lassen sich gerade in der Genese des Feldbegriffes in den Arbeiten der beteiligten Physiker materielle Vorstellungen des Feldes finden: Bei Faraday können auch in Bezug auf *Feldlinien* in gewissen Phasen materielle Auffassungen nachgewiesen werden, worauf Pociví & Finley [10] hinweisen.

Maxwell [22] veranschaulichte die mathematischen Zusammenhänge zur Beschreibung des elektromagnetischen Feldes durch Rückgriff auf die Hydrodynamik und nutzte Analogien, die fließende Substanzen implizieren, wie auch für Einstein & Infeld [23] entsprechende Vorstellungen leitend waren. Dort werden kategoriale Unterscheidungen sogar zweitrangig: „[...] doch muß auch die Unterscheidung zwischen Materie und Feld in dem Moment, wo man sich über die Äquivalenz von Masse und Energie klargeworden

ist, als etwas Unnatürliches und unklar definiertes erscheinen. [...] Wir könnten den Materiekörper auch als Regionen im Raum betrachten, in denen das Feld außerordentlich stark ist.“ (S. 286-287)

Es darf angenommen werden, dass diese materiellen Vorstellungen im Zusammenhang mit dem Feldbegriff fruchtbar waren und auch heute noch großes Potential haben, wenn etwa Herrmann [24] für den Physikunterricht herausstellt: „Ein Feld ist ein physikalisches System, das sich nicht wesentlich von anderen Systemen [...] unterscheidet. [...] Es ist deshalb berechtigt, sich von einem Feld eine ebenso konkrete Anschauung zu bilden wie von einem materiellen Stoff [...].“ (S. 1)

Vor diesem Hintergrund bleibt zu diskutieren, wie und vor allem wann der unbestreitbare Fakt, dass es sich bei Feldlinien um konstruierte Objekte, eben Modellvorstellungen, handelt, Eingang in das Wissen der Schülerinnen und Schüler finden sollte. Unserer Ansicht nach ist es essentiell, dass dies erst dann geschieht, wenn das Feld an sich als scheinbar real existierende Entität, eben als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner, akzeptiert wurde. An der Diskussion, über den ontologischen Status eines Feldes selbst, wollen wir uns dabei an dieser Stelle nicht beteiligen. Uns genügt es zu betonen, dass die Akzeptanz des Feldes als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner als wichtige Voraussetzung für das weitere Lernen angesehen werden kann. Auf dieser Grundlage können sich weitere Lernprozesse über und mit dem Feldbegriff (z.B. zu dessen physikalischer Bedeutung und seinen Repräsentationsformen und – wenn gewünscht – seinem ontologischen Status) anschließen. Vor diesem Hintergrund setzt der folgende Analogieversuch an.

5. Vorschlag für einen Analogieversuch

Der Analogieversuch legt Schülerinnen und Schülern das Magnetfeld als real existierende Entität nahe, ohne zunächst eine Verbindung zu der schwierigen Feldlinienkonzeption herstellen zu müssen. Dazu soll das magnetische Feld als wirkende Entität im Sinne einer Nahwirkungsvorstellung als Wechselwirkungspartner und als Energiespeicher sinnlich erfahrbar werden in der Hoffnung, das Feld für physikalische Beschreibungen und Argumentationen für die Schülerinnen und Schüler verfügbar zu machen.

Der Versuchsaufbau ist Abb. 1 zu entnehmen. Die Ringmagnete auf der rechten Seite stehen sich mit gleichnamigen Polen gegenüber, so dass der obere Magnet im Zentrifugenröhrchen schwebt. Die Röhrchen selbst finden in ausgefrästen Vertiefungen mit Durchbohrungen für die Fäden in einer Holzleiste Halt. Die oberen Fadenenden sind an Knöpfen über der Feder bzw. dem oberen Ringmagnetpaar befestigt. Alumünzen passenden Durchmessers mit Bohrlochern finden sich am Röhrchenboden bzw. zwischen Knopf und oberem Federende.

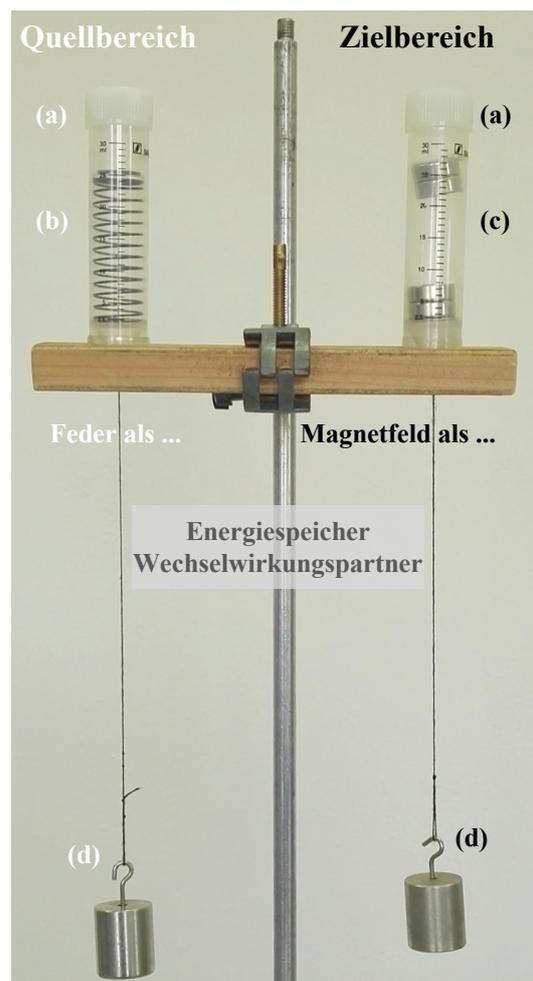


Abb.1: Aufbau des Analogieversuchs.

(a) Zentrifugenröhrchen (mit äquidistanter Skalenteilung und Bodenlochbohrung), (b) Stahldruckfeder im Raumbereich zwischen den Federenden, (c) Magnetfeld im Raumbereich zwischen zwei Ringmagneten, (d) Massestücke an Fäden

Wenn Schülerinnen und Schüler direkten Zugang zum Versuch haben, muss das Röhrchen mit den relativ starken Magneten sicher verschlossen sein.

Der Abstand zwischen den Federenden auf der linken Seite wird bei Zugbelastung entsprechend dem Hookeschen Gesetz verkürzt und der Abstand zwischen den Magneten, die sich mit gleichen Polen gegenüberstehen, verkürzt sich, wenn die Zugkraft größer als die abstoßenden Kräfte aufgrund des Magnetfeldes ist (Vernachlässigung der Reibungskräfte etc.). In Abhängigkeit der angehängten Massestücke und damit der Gewichtskraft erlaubt die Skala auf den Zentrifugenröhrchen eine Bestimmung des zurückgelegten Weges des oberen Federendes bzw. des oberen Magneten.

5.1. Lernen über Magnetfelder mithilfe des Versuches

Aufgrund der Bauteilgleichheiten im Versuchsaufbau (s. o.) haben beide Teilbereiche eine große Übereinstimmung in den Oberflächeneigenschaften.

Außerdem bestehen zwischen der Feder (Quellbereich der Analogie) und dem zu akzeptierenden Magnetfeld (Zielbereich der Analogie) zahlreiche Relationen (~):

- (1) (Abstand zwischen den Federenden) ~ (Abstand zwischen den Magneten)
- (2) (Zug am Faden → Widerstand) ~ (Zug am Faden → Widerstand)
- (3) (Zug am Faden → Verkürzung des Abstandes zwischen den Federenden) ~ (Zug am Faden → Verkürzung des Abstandes zwischen den Magneten)
- (4) (Loslassen des Fadens → Federende schnell hoch) ~ (Loslassen des Fadens → Magnet schnell hoch)

Bereits der visuelle Eindruck liefert Relation (1), die durch den „schwebenden“ oberen Magneten ins Auge fällt. Sie gibt einen ersten Anlass, Feder und Magnetfeld (bzw. zunächst „etwas“ zwischen den Magneten) miteinander in Beziehung zu setzen. Die weiteren Relationen verstärken diese Vorstellung durch die sensorische Zugänglichkeit von Kraftwirkungen und die Erfahrung von vorhersagbaren Kausalzusammenhängen. Wenn die Feder damit als Wechselwirkungspartner wahrgenommen und ihr die Eigenschaft Energie speichern zu können zugeschrieben wird, liegt die Übertragung dieser Eigenschaften auf das Magnetfeld nahe und darf im Rahmen des Analogieschlusses als plausibel gelten.

Für die Akzeptanz der Analogie durch die Schülerinnen und Schüler sprechen die folgenden Gründe:

- (i) Der Aufbau der beiden Versuche ist sehr ähnlich, Bauteile und deren Verknüpfungen im Quellbereich lassen sich auf entsprechende Bauteile und deren Verknüpfungen im Zielbereich abbilden.
- (ii) Für die oberflächliche Funktion und viele bestimmbare Eigenschaften der Versuchskonzeption im Quellbereich lassen sich Entsprechungen im Zielbereich finden.
- (iii) Die Lernenden sind mit Spiralfedern, dem Kernelement des Quellbereiches, gut vertraut.
- (iv) Der Versuch ermöglicht einen unmittelbaren, sensorischen (visuellen und haptischen) Zugang zum Phänomen. Die Erfahrungen und Empfindungen beim Umgang mit der Feder-Anordnung (Quellbereich) stimmen dabei wiederum mit denen der Magnet-Anordnung (Zielbereich) überein.

Vergleichbare Struktur und Eigenschaften, die Vertrautheit mit dem Quellbereich und die unmittelbare sensorische Zugänglichkeit lassen eine hohe Akzeptanz der Feder-Magnetfeld-Analogie bei den Lernenden erwarten (vgl. die Arbeiten von Gentner [25]).

Der Versuch ermöglicht es damit, das zu Lernende nicht nur mit Hilfe von ikonischen und symbolischen Repräsentationen darzustellen, die im Laufe der Behandlung nahezu unvermeidbar sind, sondern bedient

auch die enaktive Repräsentationsform (vgl. [26]). Übersetzungsprozesse zwischen diesen Ebenen lassen eine starke kognitive Aktivierung erwarten. Dies sollte dem Ziel, das Feld als wirkende, quasi körperhaft-materielle Entität bei den Schülerinnen und Schülern nachhaltig zu etablieren, zuträglich sein. Der Versuch ermöglicht es Schülerinnen und Schülern eigene Erfahrungen zu machen und ist in diesem Sinne als Schülerversuch gedacht. Im Zuge der weiteren Erarbeitung sind aber stark durch die Lehrperson vorstrukturierte oder direkt gelenkte Gedankengänge zu entwickeln oder nachzuvollziehen. In dieser Phase mag eine erneute Demonstration im Plenum durchaus hilfreich(er) sein.

Notwendig sind Vorerfahrungen beim Umgang mit Federn. Wünschenswert ist eine bereits erfolgte erste Annäherung an magnetische Felder, z.B. durch das Erkunden des Feldes eines Stabmagneten mit Hilfe einer Magnetnadel. Ist der Energiebegriff schon verfügbar, können auch energetische Aspekte diskutiert werden.

5.2. Mögliche Erweiterungen des qualitativen Zugangs

Neben den oben angedeuteten Szenarien, die einer qualitativen Erarbeitung des Magnetfeldes als Energiespeicher und Wechselwirkungspartner dienen, kann auch eine (zusätzliche) quantitative Auseinandersetzung erfolgen. Grundlage dafür bilden Messreihen, wie sie in den Diagrammen in Abb. 2 und 3 dargestellt sind. Die Schülerinnen und Schüler brauchen dafür Kenntnisse, die auch in der Sekundarstufe I verfügbar sind.

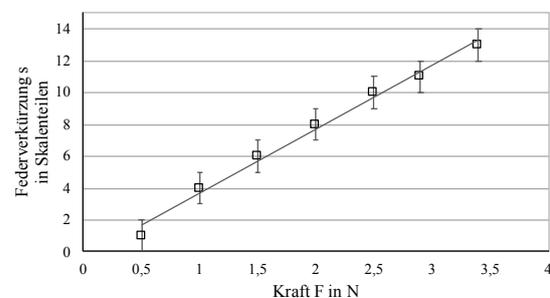


Abb.2: s - F -Zusammenhang im Quellbereich (Feder)

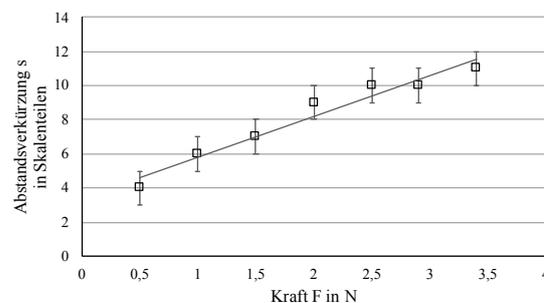


Abb.3: s - F -Zusammenhang im Zielbereich (Magnetfeld zwischen zwei Magneten)

Die Messunsicherheit beträgt für die Differenzmessung der Wegstrecke s (mindestens) eine Skaleneinheit, wobei die Unsicherheit für die Kraft F auf die Massenstücke als vernachlässigbar angesehen wird. Eine lineare Regression mit LibreOffice Calc liefert die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse.

	Quellbereich	Zielbereich
Geradensteigung in Skt/N	$4,0 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$
s -Achsenabschnitt in Skt	$-0,3 \pm 0,4$	$3,4 \pm 0,5$
Bestimmtheitsmaß R^2	0,99	0,95

Tab.1: Ergebnisse der linearen Regressionen

Die hohen Werte für das verwendete Bestimmtheitsmaß liefern hier Argumente, um mit einem linearen Modell zu arbeiten. Eine vertiefende Diskussion der Messwerte und der veranschlagten Messunsicherheiten (leichte Schrägstellung des oberen Magneten etc.) sowie des Gültigkeitsbereichs und der Grenzen des linearen Modells birgt zusätzliches Lernpotenzial. Weiterhin kann die in der Feder und im Magnetfeld gespeicherte Energie in vertiefenden Auswertungsprozessen abgeschätzt oder näherungsweise bestimmt werden.

6. Fazit und Ausblick

Zahlreiche Fehlvorstellungen bei Lernenden geben Anlass, das Potenzial, das die inhaltliche und methodische Ausgestaltung des Physikunterrichts in sich birgt, in Bezug auf den Feldbegriff voll auszuschöpfen, um Lernschwierigkeiten aktiv zu bearbeiten und dem physikalischen Feld zur gewünschten mentalen Repräsentation zu verhelfen: Mit dem ontologischen Status „real existierend“ wird es als wechselwirkendes, quasi körperhaft-materielles Teilsystem begriffen, mit der Fähigkeit Energie speichern bzw. austauschen zu können.

Auf der Grundlage der vorangegangenen theoretischen Überlegungen erscheint es lohnenswert, den vorgestellten Analogieversuch hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit und seiner Zielsetzung im Physikunterricht zu untersuchen. Aus physikdidaktischer Hinsicht wäre dabei neben dem Ausmaß der Akzeptanz und Realisierung der Zielsetzung vor allem zu überprüfen, welchen Einfluss der Versuch auf die Fehlvorstellungen bzgl. der Feldlinien bzw. ihren ontologischen Status hat.

Als Versuchserweiterung ist darüber hinaus ein elektrostatisches Analogon wünschenswert. Die Realisierung scheitert aber bislang noch an der notwendigerweise relativ hohen elektrischen Feldstärke bzw. der dazu erforderlichen Spannung.

7. Literatur

[1] Maxwell, J. C. (1873). A treatise on electricity and magnetism, Volume 1. Oxford: Clarendon Press

- [2] Schmutzer, E. (1989). Grundlagen der theoretischen Physik: mit einem Grundriß der Mathematik für Physiker; in 2 Teilen. Berlin: Dt. Verl. d. Wiss.
- [3] Römer, H.; Forger, M. (1993). Elementare Feldtheorie: Elektrodynamik, Hydrodynamik, spezielle Relativitätstheorie. Konzepte der theoretischen Physik. Weinheim: VCH.
- [4] Kultusministerium Sachsen-Anhalt (2016). Fachlehrplan Gymnasium. Physik. Stand 20.6.2016. Verfügbar unter https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL_Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Gym_Physik_LTn.pdf?rl=105 (27.4.2018)
- [5] Girwidz, R.; Storck, T. (2013). Felder. In: Unterricht Physik, 138, S. 4–10.
- [6] Fütterer, E. (2017). Begründung eines Unterrichtskonzepts zum Feldbegriff für die gymnasiale Oberstufe. Wissenschaftliche Hausarbeit zur ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle (Saale). Unveröffentlicht.
- [7] White, R. T.; R. Gunstone (1993). Probing understanding. 1. publ., repr. Edition. London: Falmer Press.
- [8] Borges, A. T.; Tecnico, C.; Gilbert, J. K. (1998). Models of magnetism. In: International Journal of Science Education, 20 (3), S. 361–378.
- [9] Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. In: International Journal of Science Education, 17, S. 371–387.
- [10] Pocoví, M. C.; Finley, F. (2002). Lines of force: Faraday's and students' views. In: Science & Education, 11 (5), S. 459–474.
- [11] Törnkvist, S.; Pettersson, K.; Tranströmer, G. (1993). Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept. In: American Journal of Physics, 61 (4), S. 335–338.
- [12] Pocoví, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. In: Journal of Research in Science Teaching, 44 (1), S. 107–132.
- [13] Furió, C.; Guisasola, J. (1998). Difficulties in Learning the Concept of Electric Field. In: Science Education, 82 (4), S. 511–526.
- [14] Macke, W. (1965). Ein Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. 4: Elektromagnetische Felder. 3. Auflage. Leipzig: Geest&Portig.
- [15] Gau, B.; Meyer, L.; Schmidt, G.-D. (2005). Physik 7/8. Sachsen-Anhalt. Gymnasium. Berlin: Duden Paetec GmbH.
- [16] Herrmann, F. (1991). Felder als physikalische Systeme. In: MNU, 43 (2), S. 114–116.
- [17] Kircher, E. (2015). Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.).

- Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage. Berlin: Springer Spektrum. S. 783–842.
- [18] Kultusministerium Sachsen-Anhalt (2015). Fachlehrplan Gymnasium/Fachgymnasium Mathematik. Stand: 9.2.2015. Verfügbar unter https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL-Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Mathematik_Gym_LT.pdf?rl=105 (27.4.2018)
- [19] Duit, R. (2015). Alltagsvorstellungen und Physiklernen. In: Kircher, E.; Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.). Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, S. 597–680.
- [20] Chi, M. T. H.; Slotta, J. D.; de Leeuw, N. (1994). From things to process: A theory of conceptual change for learning science concepts. In: Learning and Instruction, 4, S. 27–43.
- [21] Chi, M. T. H.; Slotta, J. D.; de Leeuw, N. (2000). Naive Physics Reasoning: A Commitment to Substance-Based Conceptions. In: Cognition and Instruction, 18 (1), S. 1–34.
- [22] Maxwell, J. C. (1895). Ueber Faradays Kraftlinien. (Boltzmann, L.; Hrsg.). Leipzig: Engelmann.
- [23] Einstein, A.; Infeld, L. (1950). Die Evolution der Physik. Wien: Zsolnay.
- [24] Herrmann, F. (o. J.). Feld als Raumbereich mit Eigenschaften. Verfügbar unter <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/altlast/14.pdf> (27.4.2018).
- [25] Gentner, D. (1989). The mechanism of analogical learning. In: Vosniadou, S.; Ortony, A. (Hrsg.). Similarity and Analogical Reasoning. Cambridge: Cambridge University Press, S. 199–244.
- [26] Brunner, J. S. (1970). Gedanken zu einer Theorie des Unterrichts. In: Dohmen, G.; Maurer, F.; Popp, W. (Hrsg.). Unterrichtsforschung und didaktische Theorie. München: Piper, S. 188–218.