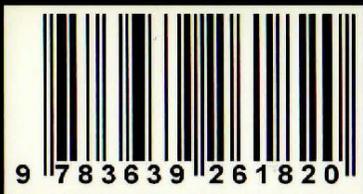


Die Arbeit gliedert sich in drei Teile. Der erste Abschnitt befasst sich mit fachdidaktischer Forschung zum Feldbegriff, Schülervorstellungen und deren Wurzeln. Friedrich Herrmann (Karlsruher Physikkurs) spricht in diesem Zusammenhang von einer Altlast. Diese versucht er dadurch zu beseitigen, indem er das Feld als eigenständiges physikalisches System in den Unterricht einführt. Dem gegenüber steht die schulphysikalische Lehrmeinung, die jegliche Versuche, sich über Feldlinienbilder hinausgehende Vorstellungen vom elektrischen Feld zu machen, als gescheitert ansieht (Gerthsen-Physik). Im letzten Teil des ersten Kapitels werden Konsequenzen für den Unterricht vorgeschlagen. Diese fließen in das zweite Kapitel ein, das die Planung von Unterrichtssequenzen zum Thema hat. Es wird versucht, das elektrische Feld mit konstruktivistischen Methoden in den Unterricht einzuführen. Grundlage ist das Grundbildungskonzept bzw. der Planungs- und Analyseraster. Der dritte Teil präsentiert Ergebnisse eigener Forschung. Befragt wurden Schüler eines niederösterreichischen Gymnasiums. Ziel der Untersuchung war es, Schülervorstellungen zu erheben und diese mit der Literatur zu vergleichen.



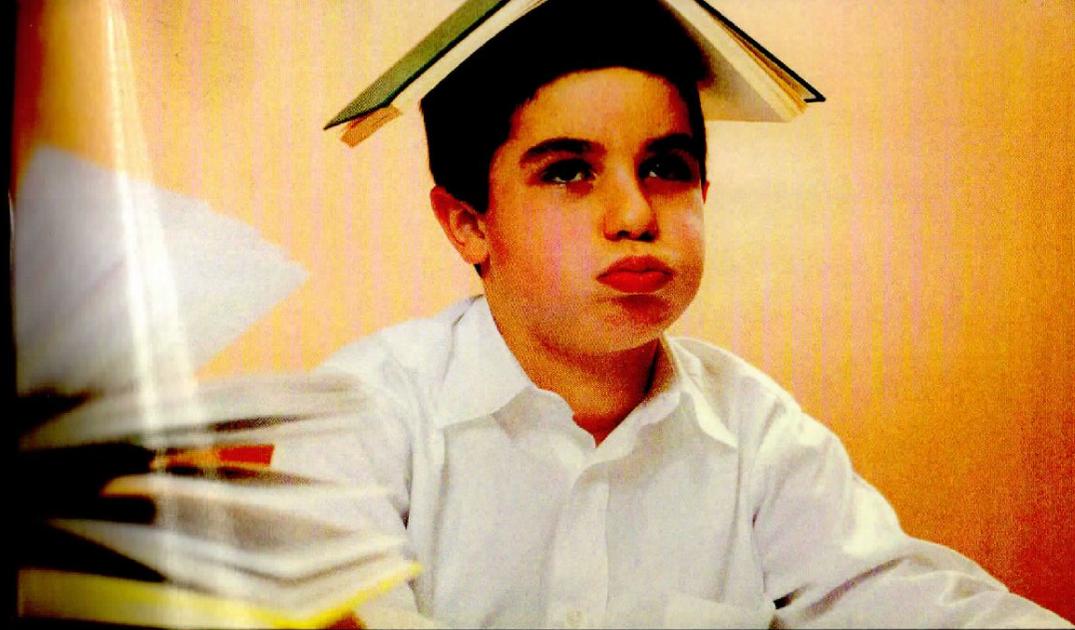
Wolfgang Stritzl

Mag. Wolfgang Stritzl: Studium der Unterrichtsfächer Physik und Mathematik an der Universität Wien, Mittelschullehrer, Journalist.



9 783639 261820

978-3-639-26182-0



Wolfgang Stritzl

Der Feldbegriff im Physikunterricht

Über Schülervorstellungen, das
Grundbildungskonzept und
fachdidaktische Forschung



Impressum/Imprint (nur für Deutschland/ only for Germany)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Coverbild: www.ingimage.com

Verlag: VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG
Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken, Deutschland
Telefon +49 681 9100-698, Telefax +49 681 9100-988
Email: info@vdm-verlag.de

Herstellung in Deutschland:
Schaltungsdienst Lange o.H.G., Berlin
Books on Demand GmbH, Norderstedt
Reha GmbH, Saarbrücken
Amazon Distribution GmbH, Leipzig
ISBN: 978-3-639-26182-0



Imprint (only for USA, GB)

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek: The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this works is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher: VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG
Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken, Germany
Phone +49 681 9100-698, Fax +49 681 9100-988
Email: info@vdm-publishing.com

Printed in the U.S.A.
Printed in the U.K. by (see last page)
ISBN: 978-3-639-26182-0

Copyright © 2010 by the author and VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG and licensors
All rights reserved. Saarbrücken 2010

0	Vorwort	5
1	Stand der Forschung	6
1.1	Alltagsvorstellungen und Lernverhalten	6
1.1.1	Der konstruktivistische Ansatz	6
1.1.2	Konzeptwechsel	8
1.1.3	Mentale Vorstellungen und Modellentwicklung	9
1.2	Der geheimnisvolle Feldbegriff	11
1.2.1	Die Bedeutung des Begriffs „Feld“	11
1.2.2	Was sind Felder wirklich?	11
1.3	Die historische Entwicklung des Feldbegriffs	12
1.4	Schülervorstellungen	15
1.4.1	Maxwell vs. Coulomb	15
1.4.2	Ominöse Fernwirkung	16
1.4.3	Die Ursache steckt in der Formel	18
1.4.4	Das Unverstandene mit Unverstandenen erklären	19
1.4.5	Orientierung in der Alltagswelt	19
1.4.6	Verwirrende Feldlinien	19
1.4.7	Verwechslungen	22
1.4.8	Das Feld in einem Nicht-Leiter	22
1.5	Ursachen für Fehlvorstellungen und Lernschwierigkeiten	23
1.5.1	Die historische Entwicklung als Ursache für Fehlvorstellungen	23
1.5.2	Fehlerhafte oder missverstandene Darstellungsformen	25
1.5.3	Weitere Fehler im Unterricht	27
1.5.4	Das Henne-Ei-Problem	28
1.5.5	Physik schwer gemacht	29
1.6	Konsequenzen für den Unterricht	31
1.6.1	Unterricht auf Basis vorunterrichtlicher Vorstellungen	31
1.6.2	Das Feld als physikalisches System	33
1.6.2.1	Der Stoff, aus dem die Felder sind	34

201417956

1.6.2.2	Der Druck eines Feldes	35
1.6.3	Feldlinienbilder	39
1.6.4	Vakuum als moderner Äther	41
1.6.5	B oder H?	42
1.6.6	Magnetpole	43
1.6.7	Klarer sprachlicher Umgang, klare Kennzeichnung	44
1.7	Zusammenfassung	46
1.7.1	Feldbegriff	46
1.7.2	Schülervorstellungen	47
2	Planung eines Unterrichtsmoduls	48
2.1	Grundbildungskonzept, Planungs- & Analyseraster	48
2.1.1	Grundbildungsrelevante Ziele	51
2.1.2	Schüler-, Lehrer-, Fachperspektive	52
2.1.3	Evaluation, Reflexion von Lernen und Lehren	53
2.2	Fachinhalt	54
2.3	Zielsetzung	54
2.4	Lehrplanbezug	56
2.5	Bildungsrelevanz	57
2.6	Fachperspektive	64
2.6.1	Reibungselektrizität	64
2.6.2	Coulombgesetz	65
2.6.3	Das elektrische Feld	66
2.6.4	Die elektrische Feldstärke	66
2.6.5	Spannung und Potenzial	67
2.6.6	Influenz	68
2.6.7	Elektroskop	68
2.6.8	Influenzmaschine	69
2.6.9	Bandgenerator	70
2.6.10	Feldlinienbilder	70
2.6.11	Faradayscher Käfig	72
2.6.12	Spitzenentladung	74

2.6.13	Das Naturphänomen Gewitter	75
2.6.13.1	Das elektrische Feld der Erde	75
2.6.13.2	Gravitationsfeld – elektrisches Feld	76
2.6.13.3	Blitze laden Erde auf	78
2.6.13.4	Entstehung von Blitzen	79
2.6.13.5	Die Phase von Blitzen	81
2.6.13.6	Leuchten und Donnern	82
2.6.13.7	Historisches	82
2.6.13.8	Gewitterhäufigkeit	83
2.6.13.9	Blitzschutzmaßnahmen	83
2.6.14	Elektrisches Feld und Gravitationsfeld im Vergleich	88
2.6.15	Elektrosmog	90
2.6.15.1	Felder im Alltag	90
2.6.15.2	Physikalische Auswirkungen von Feldern auf den Organismus	91
2.6.15.3	Mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen	92
2.6.15.4	Stellen Handys eine Gefahr dar?	94
2.6.15.5	Beide Seiten der öffentlichen Diskussion	96
2.6.15.6	Zusammenfassung	97
2.6.16	Experimente	97
2.6.16.1	Reibungselektrizität	97
2.6.16.2	Haare stehen zu Berge	98
2.6.16.3	Coulombgesetz	99
2.6.16.4	Influenz	101
2.6.16.5	Feldabbau durch Entladungspendel	102
2.6.16.6	Kugellauf	102
2.6.16.7	Elektrisches Glockenspiel	103
2.6.16.8	Influenz – Elektroskop	104
2.6.16.9	Darstellung von Feldlinien mit Watte	105
2.6.16.10	Darstellung von Feldlinien mit Grießkörnern	106
2.6.16.11	Elektrisches Potenzial	108
2.6.16.12	Spitzenentladung, elektrischer Wind	110
2.6.16.13	Faradayscher Käfig	113

2.7	Schülerperspektive	114
2.8	Lehrerperspektive	116
2.9	Stundenthema	117
2.10	Stundenbild: Phasen – Methodik – Begründungen	117
2.11	Evaluation	125
2.12	Ausblick	128
3	Eigene Forschung	130
3.1	Erhebung von Mag. Andrea Kovarik	130
3.2	Eigene Erhebung	133
3.2.1	Die Fragen	133
3.2.2	Die Auswertung	136
3.2.3	Interpretation der Ergebnisse	150
3.2.3.1	Weibliche und männliche Schüler im Vergleich	154
3.2.3.2	G- und RG-Klasse im Vergleich	155
	Schlussbemerkungen	156

Vorwort

Es war mir ein Anliegen, eine fachdidaktische Diplomarbeit zu verfassen. Fachdidaktisch deshalb, weil es mir sinnvoll erschien, mich vor Ergreifen des Lehrberufes eingehend mit Schülervorstellungen, konstruktivistischer Lerntheorie und Unterrichtsplanung bzw. -Evaluation auseinanderzusetzen. Gewählt wurde das Thema „Feldbegriff im Unterricht“. Einerseits stellt der Feldbegriff ein zentrales Konzept der Physik dar. Andererseits stand er noch nicht im Mittelpunkt fachdidaktischer Forschung, gibt es zu diesem Thema also vergleichsweise wenig Literatur.

Die Online-Bibliografie von Reinders Duit (IPN, Institut für Pädagogik und Naturwissenschaften an der Universität Kiel) erwies sich bei der Literatursuche als sehr hilfreich (www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html). Gesucht wurde nach Publikationen zu den Schlüssel-Wörtern „g6“ („investigations of students' conceptions“), „P“ („physics“) und „FLD“ („field“). Die meisten Artikel befassten sich mit dem elektrischen Feld. Auf dieses konzentriert sich auch die vorliegende Arbeit. Das magnetische Feld und Gravitationsfeld bleiben freilich nicht gänzlich unerwähnt.

Ich habe mich bemüht, einen Überblick über Schülervorstellungen zu geben, diesen auf den Grund zu gehen und Konsequenzen für den Unterricht anzuführen. Eine Möglichkeit zur Umsetzung in der Praxis wird im zweiten Teil der Arbeit beschrieben, der sich mit der Planung von Unterrichtseinheiten nach dem Grundbildungskonzept bzw. dem Planungs- und Analyseraster beschäftigt. Abschließend erfolgt die Präsentation der eigenen Erhebung. Die gesammelten Schülervorstellungen decken sich gut mit Ergebnissen internationaler Forschung.

Anmerkung: Im Folgenden werden die Personenbezeichnungen Schüler und Lehrer geschlechtsneutral und wertungsfrei verwendet.

Das Anwenden von Gleichungen, Definitionen, ... oder auch von Bildern impliziert das Arbeiten mit einem Denkmodell.

Die Fähigkeiten von Schülern, eine wissenschaftliche Theorie zu verstehen, zeigt sich in ihrem Können, ein Modell zu entwickeln. Die Kenntnis von Definitionen oder Formeln alleine heißt freilich noch lange nicht, dass ein solches geschaffen wurde. Der Schüler kann überfordert sein, wenn er den Formalismus anhand des Modells interpretieren soll. Die mathematische Struktur zu verstehen, setzt also nicht voraus, ein Modell entwickelt zu haben. Hinzu kommt: Werden Schüler mit Formeln etc. konfrontiert, ist es leicht möglich, dass sie diese nach einem Modell interpretieren, das wissenschaftlich falsch ist.

Werden Formeln als vermeintlich „falsch“ klassifiziert, werden diese dem Modell nicht beigelegt. Um aber bei Prüfungen zu bestehen, lernen Schüler (die laut ihrem Modell falschen) Formeln, Gesetze bzw. Definitionen, die zusammenhanglos nebeneinander bestehen und kurz nach der Prüfung wieder vergessen werden.

In vielen Büchern erscheinen Theorien als fertige Strukturen. Auch wenn sie deduktiven, logischen Kriterien standhalten und vernunftmäßig konstruiert sind, heißt dies noch nicht, dass sie von Schülern mit derselben Logik verstanden werden (Nersessian, 1992). Eine Serie von Postulaten zu präsentieren und die Theorie mathematisch daraus abzuleiten, heißt nicht, dass das Phänomen, das durch die Theorie erklärt wird, verstanden wurde (Greca, Moreira; 1997).

1.2 Der geheimnisvolle Feldbegriff

Das Feld gilt als schwieriger Begriff. „Viele Lehrbücher machen aus dem Feldbegriff ein beinahe schon geheimnisvoll anmutendes Gebilde“, so Herrmann (1996).

1.2.1 Die Bedeutung des Begriffs „Feld“

Zur Verwirrung unter Schülern trägt bei, dass das Wort Feld nach Herrmann (1996) in zwei Bedeutungen verwendet wird. Zum einen als mathematischer Begriff. Als solcher bezeichnet es die Verteilung der Werte einer Größe im Raum. Beispiele sind das Temperatur-, Druck-, Kraft- oder Dichtefeld. Die andere Bedeutung hat sich von der ersten erst mit Entstehen der modernen Feldtheorie abgehoben: Man bezeichnet mit Feld auch eine bestimmte Klasse physikalischer Systeme. Die bekanntesten sind das elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld.

Oft werden die Bedeutungen nicht auseinander gehalten. In Lehrbüchern ist manchmal von einem „elektrischen Feld E “ die Rede. Solche Aussagen sollten vermieden werden. Sie lassen nämlich nicht erkennen, ob das physikalische System „elektrisches Feld“ oder die räumliche Verteilung $E(x, y, z)$ der physikalischen Größe „elektrische Feldstärke“ gemeint ist (Herrmann, 1996).

Der Berkeley-Physik-Kurs 2 („Elektrizität und Magnetismus“, 4. Auflage, 1989) will eine solche Unterscheidung erst gar nicht treffen. „Während man mit dem Begriff elektrisches Feld die Gesamtheit der Feldvektoren in allen Raumpunkten kennzeichnet, heißt der Feldvektor, der sich auf einen speziellen Raumpunkt bezieht, elektrische Feldstärke. Häufig werden aber, wie auch hier, beide Begriffe als Synonyme gebraucht“ (Seite 11). Die Konzepte „elektrisches Feld“ und „elektrische Feldstärke“ sind demnach bedeutungsgleich und beziehen sich beide auf die oben erwähnte räumliche Verteilung $E(x, y, z)$. Der Frage nach dem eigentlichen Wesen eines Feldes weicht der Berkeley-Kurs aus.

1.2.2 Was sind Felder wirklich?

„Was ist ein elektrisches Feld wirklich? Ist es überhaupt etwas Reales? Oder nur die Bezeichnung für einen Faktor in einer Gleichung, der mit etwas Anderem multipliziert den numerischen Wert der im Experiment gemessenen Kraft ergibt?“ Diese Frage wird im Berkeley Physik-Kurs zwar gestellt, aber nicht beantwortet. Zumindest nicht befriedigend: „Da erstens elektrische Felder zweckmäßig und brauchbar sind, ist es unwesentlich, was sie wirklich sind. Diese Bemerkung erscheint zwar zynisch, ist aber durchaus ernst gemeint. Zweitens ist es keineswegs selbstverständlich, dass die Kenntnis der elektrischen Feldstärke ausreicht, um die Kraft auf jede beliebige Ladung vorherzusagen. Es könnte auch anders sein! In zwei verschiedenen Situationen, in denen auf Einheitsladungen dieselbe Kraft wirkt, könnten auf doppelt so große Probeladungen

unterschiedliche Kräfte wirken, die von der Größe und Verteilung der Ladungen abhängen. Diese Möglichkeit kann nur experimentell ausgeschlossen werden und erst dadurch wird der Feldbegriff anwendbar!⁶

Eine ähnliche Auffassung findet man in „Gerthsen-Physik“: „Alle Versuche, sich über ein Feldlinienbild hinaus eine anschauliche Vorstellung vom elektrischen Feld zu machen, es z.B. als Spannungszustand eines elastischen Mediums, des ‚Äthers‘, vorzustellen, sind gescheitert. Man sollte daher hinter dem Feldbegriff nichts anderes suchen als er ist, nämlich ein bequemes Darstellungsmittel für die Kräfte, die auf Ladungen wirken.“ (S 296 f.).

Herrmann vertritt eine andere, „moderne“ Auffassung: Ein Feld ist ein physikalisches System, das sich nicht wesentlich von anderen Systemen, etwa einem idealen Gas, einem starren Körper oder einer idealen Flüssigkeit, unterscheidet (siehe Kapitel 1.6.2).

1.3 Die historische Entwicklung des Feldbegriffs

Das elektromagnetische Feld, und damit das erste Feld überhaupt, wurde erfunden und entdeckt von Faraday. Mathematisch beschrieben wurde es von Maxwell. Zu seinen Zeiten, in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, war man überzeugt, dass der ganze Raum von einem elastischen Medium, dem Äther, erfüllt und dass Licht eine mechanische Welle in diesem Medium sei. Nach Faraday und Maxwell waren das elektrische und magnetische Feld besondere Zustände dieses Mediums (Herrmann, 1990).

Das Feldkonzept – es entwickelte sich im 19. Jahrhundert – musste zahlreiche Probleme überwinden. Die Coulombsche wurde durch die Maxwellsche Theorie ersetzt. Der ontologische Wechsel vollzog sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die neue Theorie stand kritisch der Newtonschen Mechanik gegenüber (Knight, 1986). Einen ähnlichen Prozess durchlaufen auch Schüler, wenn sie mit dem elektrischen Feldbegriff konfrontiert werden.

Am Ende des letzten Drittels des 18. Jahrhunderts führte Franklin das Konzept der elektrischen Ladung ein. Er war nicht imstande, exakte Messungen vorzunehmen. Man hielt in der Natur Ausschau nach ähnlichen Phänomenen. Cavendish, Priestly und Coulomb suchten nach einer Theorie, die der Gravitations-Theorie ähnlich war. Sie stand natürlich unter dem Einfluss der newtonschen Mechanik. Das mechanistische Modell folgte den Coulombschen Gesetzen. Das Schlagwort hieß „action at a distance“, eine Kraft, die augenblicklich zwischen zwei geladenen Körpern wirkt und im Wesentlichen unabhängig vom umgebenden Medium ist. Im frühen 19.

Jahrhundert wurde an diesem Modell gerüttelt. Neue experimentelle Methoden lieferten widersprüchliche Ergebnisse. Die Coulombsche Theorie der Elektrostatik, basierend auf dem Newtonschen Modell, konnte die Umwandlung elektrischer Kräfte in chemische (Volta, 1800) und „transversale Kräfte“ (Oersted) nicht erklären.

Faraday (1791 – 1867) führte eine neue Idee ein. Nämlich jene von magnetischen Kraft-Linien bzw. -Kurven, die jedem Punkt eine Richtung und Intensität zuordnen. Induktion war kein Ergebnis von „action at a distance“, einer Fernwirkungskraft, sondern von ununterbrochener, fortlaufender Aktion. Faradays Arbeit stütze sich auf zwei Grundideen:

- 1) Die Kraft von einem geladenen Körper auf einen anderen benötigt eine gewisse Zeit, um zu wirken.
- 2) Die Krafteinwirkung wird durch Schwankungen/Störungen jedes Teils des Feldes an angrenzende Gebiete übertragen. Dieses Modell ist kohärent mit der „Cartesian cosmology“¹.

Das Feld-Modell wirft einen neuen Blick auf elektrische Interaktion: Ein Feld existiert auch dann, wenn keine Testladung eingebracht wird. Das Konzept der potenziellen Energie kommt auf. Mitte des 19. Jahrhunderts werden große experimentelle Entdeckungen weniger, theoretische Forschungen wichtiger. Maxwell (1831 – 1879) „übersetzt“ die Feldtheorie in eine mathematische Sprache.

Die besondere Rolle des Äthers zeigt der allerletzte Satz von Maxwells Hauptwerk „Elektrizität und Magnetismus“: „Stimmt man einmal der Hypothese von der Existenz eines Mediums zu, so glaube ich, dass demselben bei unsern Untersuchungen ein hervorragender Platz anzuweisen ist, und dass wir mit allen Mitteln uns eine begriffliche Vorstellung von allen Details seiner Wirkungsweise zu verschaffen suchen sollten. Das war aber stets mein Hauptbestreben, als ich dieses Werk ausarbeitete.“ (zit.n. Herrmann, 1990).

Maxwell definierte das Feld so: „Man bezeichnet den Raum in der Umgebung eines elektrisierten Körpers, insofern sich in demselben die elektrischen Phänomene abspielen, als Electricisches Feld.“

¹ Der Begriff kartesisch bedeutet allgemein „von Cartesius“ eingeführt. Cartesius ist der latinisierte Name von Rene Descartes (1596 – 1650). Descartes lehnte das Gravitationsprinzip ab, glaubte vielmehr an seine „Theorie der Wirbel“: Unter einem Wirbel verstand Descartes eine große Menge Materie, welche sich um einen gemeinschaftlichen Mittelpunkt bewegt. Nach Descartes wären Himmelskörper von sehr feiner, flüssiger Materie umringt, die Planeten und Monde so mit sich reißt, wie etwa Wind in Luft schwebende Körper mit sich führt.

Unter „Raum“ verstand Maxwell nichts anderes als das Medium (Äther). Anders formuliert: Der Äther ist in der Umgebung elektrisch geladener Körper verändert. Diesen veränderten Äther nennt man Feld. Da man vom Äther eine sehr konkrete Anschauung hatte, war auch das Feld etwas sehr Konkretes.

Das Newtonsche und Maxwellsche Modell interpretieren Interaktionen elektrischer Ladungen aus unterschiedlichen ontologischen und erkenntnistheoretischen Blickwinkeln. Es handelt sich nach Furio (1997) um zwei verschiedene „conceptual profiles“.

- „Coulombian Conceptual Profile“: Ontologische Basis ist die newtonsche Mechanik. Die elektrische Ladung hat stofflichen Charakter. Die Ladung eines geladenen Körpers übt „actions at a distance“ aus. Es gibt Analogien zur Gravitationskraft. Elektrische Wechselwirkung findet augenblicklich statt, egal, welches Medium vorhanden ist. Es gibt keine Verbindung zwischen elektrischer und magnetischer Kraft.
- „Maxwellian Conceptual Profile“: Ontologische Basis ist die „Kantian cosmology“². Die „Ausstrahlung“ der elektrischen Wechselwirkung in den Raum erfordert ein neues Konzept: jenes des elektrischen Feldes. Jedem Punkt im Raum wird eine Feldstärke E zugeordnet (Kraft pro Einheitsladung). Die Wichtigkeit einer lokalisierten Ladung schwindet. Die Idee eines sich in den ganzen Raum ausbreitenden Feldes kommt auf. Man muss zwischen elektrischer Kraft und Feldstärke unterscheiden, sie sind voneinander abgegrenzt. Es ist unmöglich, die Wechselwirkung zweier geladener Körper ohne Betrachtung des Mediums zu beschreiben. Das Medium und seine Geometrie werden wichtiger. „Step-by-Step-Action“ steht im Gegensatz zur coulombschen „instant action at a distance“. Die Kraft wirkt nicht augenblicklich.

Die Idee „action at a distance“ war einer der großen Beiträge von Isaac Newton. Als Faraday das Konzept des Feldes einführte, stand ein mächtiges Werkzeug zur Beschreibung der Fernwirkung zur Verfügung. Faraday schrieb dem Feld große Realität zu. Maxwell meinte in „Preface to a Treatise on Electricity and Magnetism“ (1881) dazu: „Faraday sah den Raum mit Kraft-Linien durchzogen, während Mathematiker die Vorstellung von Kraft-Zentren hatten, die in der Distanz

² „Kantian cosmology“ ist die Synthese der Newtonschen und „Cartesian Cosmology“. Immanuel Kant (1724 – 1804) entwickelte in den „Metaphysische[n] Anfangsgründe[n] der Naturwissenschaft“ (1786) die Grundsätze einer besonderen Metaphysik der Natur, die zwischen den apriorischen Grundsätzen des reinen Verstandes und den empirischen Sätzen der Physik vermitteln sollte.

wirken. Faraday sah ein Medium, während Mathematiker nichts anders sahen als Entfernungen. Faraday suchte den Grund für physikalische Phänomene in tatsächlich stattfindenden Reaktionen im Medium, während sich Mathematiker damit zufrieden gaben, „action at a distance“ zu beobachten.“ (zit.n. Törnkvist et.al., 1993). Die spezielle Relativitätstheorie verbannte den Äther – und damit den Träger des Feldes – aus der Physik. Die Maxwellsche Theorie aber blieb unberührt. Es zeigte sich, dass sie für ihre Felder keinen Träger braucht.

1.4 Schülervorstellungen

Fachdidaktische Forschung zum Thema „Elektrische Stromkreise“ wurde schon eingehend betrieben, sowohl auf Oberstufen-, als auch Universitätsniveau (Hartel 1982, Closset 1983, Cohen 1983, Riley 1985, Dupin & Johsua 1987, Shipstone 1984/85 und 1988). Es wurden viele Verständnisschwierigkeiten dokumentiert. Eine davon ist besonders „resistent“ gegenüber dem Unterricht: Schüler tendieren zu einem kosekutiven Denken, glauben, dass sich ein Ereignis an einem gegebenen Punkt des Stromkreises nur „flussabwärts“ auswirken kann. Sie folgen der gewöhnlichen Denkweise, beschrieben von Rozier & Viennot (1991): dem linearen Kausalitäts-Denken. Dieses impliziert eine schrittweise Abfolge von Ereignissen (eines verursacht das nächste). Tatsächlich aber ist ein Stromkreis ein System, dessen Variablen simultan wechseln. Eine lokale Änderung betrifft den ganzen Stromkreis (Viennot, Rainson; 1992).

Das elektrische Feld an sich und Felder generell standen bislang noch nicht im Mittelpunkt fachdidaktischer Forschung (Viennot, Rainson; 1992).

1.4.1 Maxwell vs. Coulomb

Furio und Guisasola (1997) unterscheiden zwischen dem „Coulombian Conceptual Profile“ und dem „Maxwellian Conceptual Profile“ (vgl. Kapitel 1.3.1). Das Maxwellsche Profil hat mehr Stärke, das Coulombsche ist in seiner Anwendung einfacher. Die Folge: In Situationen eines kognitiven Konflikts bevorzugen Schüler das Coulombsche Profil. Einfach darum, weil sie besser damit umgehen können. Es droht folgende Gefahr:

- 1) Es wird zwischen den Größen E und F nicht unterschieden. Der erkenntnistheoretische Status von E ist nicht hoch genug, Schüler reduzieren E zu F , identifizieren E mit F (Viennot, 1992). Aus der Proportionalität $E=F/q$ wird eine Gleichheit.
- 2) Schüler glauben an eine plötzliche, augenblickliche Wechselwirkung. Der Ort der elektrischen Ladung ist wichtig, nicht aber das Medium, von dem die Wechselwirkung übertragen wird. In Aufgabenstellungen, in denen nicht speziell auf das Medium hingewiesen wird, verlassen sich Schüler auf das Coulombsche Konzept.

- 3) Bei komplexen elektrostatischen Wechselwirkungen, etwa dem „Faraday’schen Käfig“, benützen Schüler lieber das Coulombsche Konzept. Sie ignorieren das Medium und seine Geometrie.

Furio und Guisasa (1997) führten eine Erhebung an 245 spanischen Schülern im Alter von 16 bis 21 Jahren durch. Zur Vertiefung folgten Interviews mit 24 Schülern. Das Ergebnis: Nur wenige Schüler unterschieden zwischen elektrischer Feldstärke und Kraft (16-17: 18 %, 17-18: 11%, 18-19: 37%, 20-21: 64%). Viele Schüler glaubten an eine sofortige Wirkung der elektrischen Kraft (16-17: 54%, 17-18: 63%, 18-19: 56%, 20-21: 31%). In Situationen eines kognitiven Konflikts ließ sich ein Trend zum „Coulombschen Konzept“ feststellen.

1.4.2 Ominöse Fernwirkung

Nach Bar, Zinn und Rubin (1997) gibt es drei Voraussetzungen, die einer konkreten Vorstellung von der abstrakten Theorie über Fern-Wirkungen zugrunde liegen. Die Notwendigkeit einer Verbindung zwischen wechselwirkenden Objekten, die Einzigartigkeit der Erde und die Vorstellung, dass unterschiedliche Kräfte miteinander zusammen hängen, einander verstärken bzw. erst ermöglichen.

Die Vorstellungen sind nicht immer konsistent und miteinander vereinbar. In Anwesenheit von Gravitation meinen 50 Prozent der befragten Schüler, dass Luft benötigt wird, damit ein Magnet wirkt. In Abwesenheit von Gravitation, etwa einer Raumschiff-Umgebung, glauben 60 bis 68 Prozent, dass ein Magnet nicht wirken kann. Nur 16 Prozent bleiben bei der Erklärung, dass der Magnet funktioniert, da Luft als übertragendes Medium vorhanden ist. Wird das Geschehen auf den Mond verlagert, konzentrieren sich 45 bis 60 Prozent der Befragten auf den Aspekt der Gravitation, während 15 bis 24 Prozent den Fokus auf die Abwesenheit von Luft richten.

Schülervorstellungen:

- Die Verbindung: Schüler glauben an die Notwendigkeit einer Verbindung zwischen Quelle der Kraft und dem Körper, der die Kraft spürt. Kräfte können im Denken vieler Schüler nur durch Berührung übertragen werden.
- Es gibt einen Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Luft und der Möglichkeit von Fernwirkungen. Luft wird als Medium angesehen, das eine Verbindung herstellt. Viele Kinder glauben, dass Luft eine notwendige Bedingung für Gravitationskräfte ist.
- Kraft als Träger einer anderen Kraft: Im Alltag werden horizontal bewegte Körper von anderen Objekten getragen. Der elementarste Träger ist der Boden unserer Erde. Die

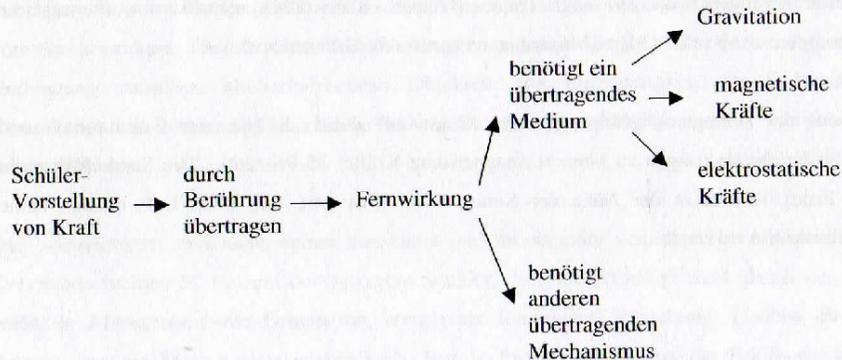
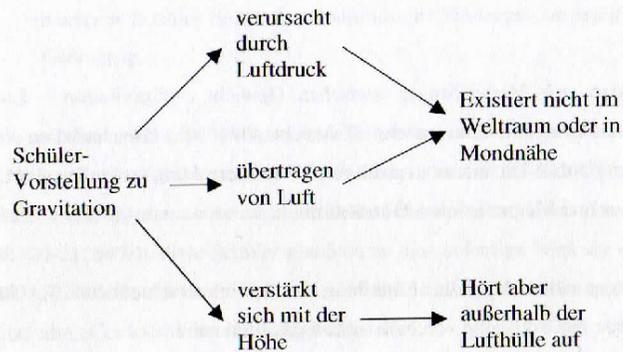
Fähigkeit eines Magneten zu funktionieren, wird mit dem Vorhandensein von Gravitation in Beziehung gesetzt.

In Schüler-Vorstellungen finden sich Verbindungen zwischen Gewicht – Gravitation – Luft, Gravitation – Luftdruck, Trennungen von Gravitation – Gewicht sowie die Gleichsetzung von Gewicht und Masse. Schüler glauben an einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Luft – Gravitation, Luft – Magnetismus und Magnetismus – Gravitation.

Eine Rasterung nach Gesichtspunkten legt die Einteilung in drei unterschiedliche Schüler-Vorstellungen als Ausgangspunkt zur Erklärung von Fernwirkungskräften nahe:

- 1) Die Erde unterscheidet sich von anderen Umgebungen. Die Erde ist einzigartig.
- 2) Es muss ein Kräfte übertragendes Medium vorhanden sein.
- 3) Fernwirkungen benötigen einen Träger. Beispiel: „Gravitation verstärkt und überträgt die magnetische Kraft.“ Oder: „Magnetismus verursacht Gravitation.“

50 Prozent der befragten Schüler glaubten, dass Luft notwendig ist, um Gravitations- und elektrische Kräfte übertragen zu können (magnetische Kräfte: 35 Prozent). „Die Sonne fällt nicht auf die Erde, weil es in der Nähe der Sonne keine Luft gibt, und ohne Luft können keine Gravitationskräfte wirken.“



1.4.3 Die Ursache steckt in der Formel

Untersuchungen von Greca und Moreira (1997) lieferten folgendes Ergebnis: Die meisten Studenten stützen sich beim Versuch, ein Problem zu lösen, auf den routinemäßigen Umgang mit Formeln und Definitionen. Ein Modell ist nicht oder nur kaum entwickelt. Schüler sehen oft gar keine Notwendigkeit darin. Sie haben auch mit ihren (mathematischen) Methoden schulischen Erfolg.

Zu einem ähnlichen Schluss kommen Rainson, Tranströmer und Viennot (1994). Sie orten folgendes Verständnisproblem:

„Die Ursache steckt in der Formel“: Schüler interpretieren Formeln so, als ob die Ausdrücke rechts des Gleichheits-Zeichens die Ursache für die linken Ausdrücke wären. Als Beispiel werden

Schülerzitate in Zusammenhang mit dem Satz von Gauss angeführt: „Um das elektrische Feld zu berechnen, brauche ich nur die inneren Ladungen.“

1.4.4 Das Unverständene mit Unverstandenem erklären

Die Wirkung, die ein Magnet ausübt, ist für den Alltagsverstand schwer erklärbar. Vor allem bei jüngeren Kindern finden sich magische Deutungen. Viele versuchen, sich das Unverständene durch Vergleich mit etwas Bekanntem zu erklären („Klebstoff“). Viele Kinder sind der Auffassung, Elektrizität flösse in den Magneten und mache ihn magnetisch. „Es wird versucht, das Unverständliche mit etwas anderem zu erklären, das aber ebenfalls unverstanden ist“, so Duit (2004).

1.4.5 Orientierung an der Alltagswelt

„Magnetfelder verhalten sich wie diffuse, gerichtete Luftballons.“ Fast ein Drittel der von Heege und Schwaneberg (1985) befragten Schüler hatte zwar die Darstellungsfunktion von Feldlinien begriffen, stellte sich aber die Felder selbst analog zu greifbaren Dingen der Alltagswelt vor. Die Tatsache, dass die Wirkung von Magneten scheinbar nur in einem relativ eng eingegrenzten Bereich um die Pole nachweisbar ist, führte zu der Vorstellung, die an Luftballons mit unscharfer Begrenzung und mit einem Richtungsverhalten erinnern. Zwei Vorstellungen waren vorherrschend:

- Verschieden gerichtete Felder („Ballons“) federn voneinander ab.
- Gleichgerichtete „Ballons“ verschmelzen ineinander.

Man kann die so verstandenen Magnetfelder als dingartige Fortsetzungen der Magnetpole interpretieren.

1.4.6 Verwirrende Feldlinien

„Ein Feld besteht aus Feldlinien.“ Das ist die häufigste Fehlvorstellung, die Heege und Schwaneberg (1985) bei mehr als der Hälfte der von ihnen befragten Schüler vorgefunden haben. Feldlinien werden für das Feld gehalten. Es wird nicht zwischen Darstellungsmitteln und Darzustellendem unterschieden. Die Feldlinien sind nach dieser Vorstellung bereits das Feld. Solche Schüler sind – allein oder durch den Unterricht – häufig zu der Vorstellung gelangt, dass Feldlinien etwas ähnliches seien wie feine, normalerweise unsichtbare Gummibänder, die sich je einzeln verkürzen wollen. Gleichgerichtete Bänder stoßen sich wechselseitig ab; Überkreuzungen sind verboten. Nach dieser Vorstellung bringen Eisenfeilspäne oder kleine Kompassnadeln lediglich einen sonst unsichtbaren, dinghaften Mechanismus ans Licht: Sie machen die sehr feinen, sonst verborgenen Feldlinien sichtbar. Typisch für eine derartige Vorstellung ist die Ansicht,

- dass eine schwimmende, magnetisierte Stricknadel auf einer Feldlinie um einen Stabmagneten herumgeführt wird wie auf einer Leitschiene,
- dass sich zwischen den Feldlinien kein Feld befindet.

Selbstverständlich können Regeln für das Verhalten „gummibandähnlicher“ Feldlinien (Verkürzungs- und Abstoßungstendenz, Kreuzungsverbot) dazu beitragen, Anfänger auf Eigenarten einer Beschreibung von Feldern durch Feldlinien aufmerksam zu machen. Ohne ergänzende und relativierende Information besteht aber die Gefahr, dass die Beschreibungsweise anhand von Feldlinien mit dem Feld selber verwechselt wird. Schüler können Beschreibung und Beschriebenes nicht kontrastieren.

Typische Fragen, die in diese Richtung deuten:

- Warum dürfen sich Feldlinien nicht kreuzen?
- Wo bleibt das Feld, wenn der Magnet von seinem Feldlinienbild (Eisenfeilspäne auf der Glasplatte) entfernt wird?
- Wie „erfahren“ die Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter eigentlich, was sie tun sollen?

Schüler tendieren also dazu, Feldlinien eine zu große Wirklichkeit zuzuschreiben, sie als isolierte Entitäten im euklidischen Raum zu betrachten. Und nicht als ein Satz von Kurven, die eine vektorielle Proportionalität dieses Raumes beschreiben. Viele Schüler sind außerdem unfähig, Wissen von einem akademischen Gegenstand (Mathematik) zu einem anderen (Physik) zu transferieren. Und anstatt einen vorgegebenen Feldlinien-Verlauf mit mathematischen Konzepten (Gleichheit, Stetigkeit, Proportionalität, ...) zu erklären, geben viele Schüler den Feldlinien beinahe schon menschlichen Charakter. Sie messen Feldlinien eine viel zu große Realität bei. Die hierarchische Abfolge der Konzepte Geometrie der Ladung – Feldlinie – Kraftvektor (Beschleunigungsvektor) – Bahn wird nicht vollständig verstanden. Die Vermutung liegt nahe, dass die Verwirrung durch die Art der Darstellung verursacht wird, zumindest teilweise (Törnkvist, Pettersson, Tranströmer; 1993).

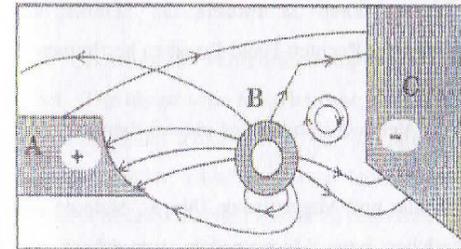
Heege und Schwaneberg (1985) kommen zu folgendem Schluss: Veranschaulichende Darstellungen von elektrischen und magnetischen Feldern werden von vielen gar nicht verstanden, oder sie werden als eigenständige, von anderen Darstellungen losgelöste und in der Regel als handgreiflichdinghafte Gestalten begriffen. Dem Lernenden fehlt nach Heege und Schwaneberg vor allem die Verbindung von den Veranschaulichungen zu

- alltagssprachlichen Beschreibungen.

- möglichen Handlungen und
- rein formalen Darstellungen.

Der Lernende wird sich der Funktion von Vorstellungen nicht bewusst, die darin besteht, primär unanschauliche physikalische Strukturen und Ereignisse in den menschlichen Wahrnehmungshorizont einzubetten.

Törnkvist, Pettersson und Tranströmer (1993) konfrontierten Studenten mit folgendem Feldlinienbild. Es stammt aus der Sammlung physikalischer Probleme von Wilson und Hackett (A. W. Wilson, R. Q. Hackett: „Inquiring into Physics“, Pergamon, Oxford, 1974).



Die Fragenstellung lautete: Die Abbildung ist ein senkrechter Schnitt durch lange, parallele Metallstücke. A und C sind geladen, B ist neutral. Es fließen keine Ströme, das System ist im Gleichgewicht. Es sind elektrische Feldlinien eingezeichnet. Einige sind falsch. Finde die Fehler in der Abbildung! Erkläre, warum die jeweiligen Feldlinien nicht in dieser Art gezeichnet werden dürfen!

Das alarmierendste Ergebnis war, dass 85 Prozent der 545 Studenten den Fehler der kreuzenden Feldlinien nicht erkannten. Nur vier Prozent hatten eine richtige Erklärung dafür, warum eine „abgelenkte“ Feldlinie nicht erlaubt ist. Beide Prozentpunkte deuten darauf hin, dass viele Studenten die mathematischen Konzepte „Stetigkeit einer Funktion“ und „Ableitung einer Funktion“ nicht gut genug beherrschen, sie zumindest nicht in einem nicht-mathematischen Kontext anwenden können.

Weitere Aufgaben bestanden darin, in verschiedenen Feldlinienbildern jeweils den Kraftvektor, der an einer gegebenen Ladung in einem gegebenen Punkt angreift, einzuzeichnen. Die meisten Schüler hatten kein Problem, einen tangentialen Pfeil einzuzeichnen. Die meisten nahmen keine Rücksicht auf die Länge des Vektors. Elf Prozent taten Unerwartetes: Sie extrapolierten die Feldlinien in Richtung des außerhalb der Zeichnung liegenden Pols und zeichneten den Vektor in Richtung

dieses Pols ein! Zehn Prozent zeichneten einen entgegengesetzt zum Feld orientierten Vektor. Das ist auch korrekt, da keine Angabe über das Vorzeichen der Ladung gemacht wurde. 21 Prozent waren der Ansicht, dass der Kraftvektor Teil der Feldlinie ist: Sie bestanden darauf, einen gebogenen Vektor zu zeichnen. 31 Prozent erkannten nicht, dass enger zusammen liegende Feldlinien eine Erhöhung der Feldstärke bedeuten, dass es daher geboten ist, einen längeren Kraftvektor zu zeichnen.

1.4.7 Verwechslungen

Törnkvist, Pettersson und Tranströmer (1993) beobachteten bei ihrer Forschung eine Verwechslung des elektrischen mit dem magnetischen Feld. So versuchten 28 Prozent der Schüler, die Orientierung eines Kraft-Vektors im elektrischen Feld mit der Rechten-Hand-Regel zu bestimmen.

Auch Heege und Schwaneberg (1985) stellten häufige Verwechslungen des elektrischen mit dem magnetischen Feld fest, genauer Verwechslungen ...

- zwischen Begriffen aus den Bereichen Elektrizität und Magnetismus (Nord-, Südpole mit Plus- und Minus-Pole verwechselt; Eisenteilchen bzw. Magneten verwechselt mit geladenen Körpern),
- zwischen Äquipotenziallinien und Feldlinien.

1.4.8 Das Feld in einem Nicht-Leiter

Nach Viennot und Rainson (1992) gibt es zwei Klassen falscher Vorstellungen:

- 1) Die abblockende Eigenschaft eines Nicht-Leiters. Typische Antworten: „Kein Feld, da q (oder M) in einem Isolator ist.“ „Die nicht-leitende Eigenschaft des Körpers hindert das Feld daran einzutreten.“ „Der Punkt M wird durch den Körper geschützt.“ „Der nicht-leitende Körper hindert jegliche Art von Strahlung daran einzudringen.“ Es wird nicht klar zwischen den Wörtern „insulated“ und „isolated“ unterschieden!
- 2) Ladung kann sich nicht bewegen, daher existiert auch kein elektrisches Feld. Typische Antworten: „Es gibt keine freie Ladung rundherum. Daher kann es auch kein Feld geben.“ „Die Ladung erzeugt kein Feld. Andernfalls würde eine Potentialdifferenz erzeugt werden, diese würde einen Stromfluss in Gang setzen. Das ist aber unmöglich, da der Körper ein Nichtleiter ist.“ Schüler akzeptieren die Existenz einer Ursache erst, wenn sie einen Effekt sehen. Beispiel: „In einem Nicht-Leiter können sich keine elektrischen Ladungen bewegen. Daher gibt es dort auch kein elektrisches Feld.“

Manche Studenten glauben, dass die Erzeugung eines Feldes mit der Bedingung verknüpft ist, dass die erzeugende Ladung Elektronen oder Protonen entsendet. „Die Protonen und Elektronen, die q entsendet, können M nicht erreichen, da M in einem Nicht-Leiter liegt.“ Eine andere Fehlvorstellung: Ladungen müssen sich von q aus zu dem Punkt bewegen können, um in diesem ein Feld zu erzeugen. „Die Ladung q kann kein Feld erzeugen, da der Nicht-Leiter jegliche Bewegung der Elektronen verhindert.“ „Da keine Ladungs-Bewegung möglich ist, kann in M auch kein Feld erzeugt werden.“

Eine weitere Schülervorstellung: Die Existenz eines Feldes in M ist mit der Präsenz einer Ladung in M verknüpft. Die Beziehung $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ wird offensichtlich falsch gedeutet.

1.5 Ursachen für Fehlvorstellungen und Lernschwierigkeiten

1.5.1 Die historische Entwicklung als Ursache von Fehlvorstellungen

Ein historischer Zugang hilft bei der Suche nach Lern- bzw. Verständnisschwierigkeiten. Die meisten Schüler, sogar Studenten haben ontologische und erkenntnistheoretische Probleme, das Konzept des elektrischen Feldes zu begreifen (Furio, Guisasola; 1997).

Für Faraday war das Feld ein Konzept, das keine hohen Ansprüche an das Abstraktionsvermögen stellte. Immerhin war der ganze Raum von einem Medium, dem Äther erfüllt. Von diesem hatten er und seine Zeitgenossen eine recht konkrete Vorstellung. Nicht weniger konkrete Gebilde waren Felder: Sie waren Bereiche des Äthers, die sich in einem besonderen Zustand befanden. Im Feldzustand stand der Äther in mechanischer Spannung. Auch für Maxwell war der ganze Raum vom Äther erfüllt. Raum und Äther waren schlichtweg dasselbe, waren identisch. Maxwell definierte das elektrische Feld als „... den Raum in der Umgebung eines elektrischen Körpers, insofern sich in demselben die elektrischen Phänomene abspielen.“ (zit.n. Herrmann, 1989).

Aus dem Michelson-Morley-Experiment und der speziellen Relativitätstheorie folgten allerdings, dass der Äther nicht jene einfachen mechanischen Eigenschaften hatte, die man zunächst angenommen hatte. Ein wohl voreiliger Schluss war, dass es den Äther gar nicht gibt. Dadurch wurde dem Feldbegriff seine Grundlage entzogen. Herrmann: „Vorher war das Feld ein besonderer Zustand des Äthers, nun wurde er zu einem besonderen Zustand von etwas, das nicht existiert!“

Der logische Bruch, der dadurch entstand, wurde allerdings gar nicht als solcher wahrgenommen. Immerhin hatte doch Maxwell selbst das Feld als einen Raumbereich definiert. Die Formulierungen, durch die man heute ein Feld zu definieren pflegt, erinnern noch sehr stark an Maxwells Definition.

- „Das elektrische Feld fasst für alle Punkte im Raum die Richtung und Größe der elektrischen Kraft zusammen. Das Feld in einem beliebigen Punkt des Raumes kann ausgemessen werden, indem die Wirkung der Kraft auf eine kleine positive Testladung (Elementarladung) bestimmt wird, die sich an diesem Punkt befindet. Ein von ruhenden elektrischen Ladungen hervorgerufenen Feld wird als elektrostatisches Feld bezeichnet.“
(Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3).
- „Die Anziehung ... ist von der zwischenliegenden Materie unabhängig und erfolgt auch im leeren Raum, also ohne Materie! Dies gibt dem Raum um einen Magneten eine besondere physikalische Bedeutung; man nennt ihn ein magnetisches Feld.“ (Dorn-Bader, Physik, Mittelstufe, Hannover, 1980, S. 264).
- „Der – auch materiefreie, leere – Raum wird zum Träger einer physikalischen Eigenschaft. Einen solchen Raum nennt man Feld.“ (Metzler Physik, Joachim Grehn (Hg.), Stuttgart, 1991, S. 86.).
- „Hat ein Raum die Eigenschaft, dass in jedem Raumpunkt ein magnetischer Dipol Kräfte erfährt, so sagen wir, in dem Raum bestehe ein Magnetfeld.“ (Felder, Gross Berhag, Stuttgart, 1985, S. 60).
- „Im Raum um einen Magneten werden auf ferromagnetische Körper und andere Magnete Kräfte ausgeübt. Man nennt diese Eigenschaft des Raumes magnetisches Feld.“ (Kuhn, W.: Physik, Band I. Braunschweig 1990, S. 217; jeweils zit.n. Herrmann, 1996).

Während für Maxwell Raum ohne Äther gar nicht denkbar war, haben wir den Äther mittlerweile aus der Physik verbannt. „Dies macht die Formulierung Maxwells außerordentlich unanschaulich“, meint Herrmann. Denn: „Der Lernende stellt sich unter ‚Raum‘ den leeren Raum, also ‚nichts‘ vor. Und diesem Nichts werden plötzlich Eigenschaften, ein Spannungsfeld, zugeschrieben. Nach einer der obigen Definitionen ist das Feld sogar die Eigenschaft selbst. Wer hat aber diese Eigenschaft? Einigen Definitionen zufolge ‚besteht‘ im Raum ein Feld. Warum ‚befindet sich‘ das Feld nicht im Raum? Man kann den Lernenden an diese Sprechweise gewöhnen. Sie wird aber nicht dazu beitragen, eine klare Anschauung vom Feld zu gewinnen. Es ist nicht verwunderlich, wenn der so eingeführte Feldbegriff nicht in die Köpfe der Schüler hinein geht.“

Die Zeit, in der das Feld keine begriffliche Grundlage hatte, hätte gar nicht lange anzudauern brauchen. Bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde immer klarer, dass das elektromagnetische Feld ein physikalisches System ist wie andere auch. „Die begrifflichen Schwierigkeiten hätten vermieden werden können. Kurz nach dem Äther tauchte ein Feldbegriff auf, der dem Maxwellschen an Anschaulichkeit nicht nur ebenbürtig, sondern sogar überlegen war. Leider hat aber der Feldbegriff in dem unschönen Zustand, in den er kurz nach Veröffentlichung der speziellen Relativitätstheorie geraten ist, bis heute überlebt“, so Herrmann (1990, 1996).

Formulierungen wie „gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an“, stammen noch aus vorfaradayscher Zeit, aus einer Zeit, in der man Wechselwirkungen als Fernwirkungen

beschrieb. Sie fördern die Auffassung, als existierten Wirkungen eines Körpers A auf einen entfernten Körper B, an denen kein weiteres System beteiligt ist, welches A und B miteinander verbindet und diese Wirkung vermittelt. Obwohl seit mehr als 100 Jahren kein Naturwissenschaftler an solche Wirkungen glaubt, benutzen wir immer noch die alten Formulierungen und fördern damit natürlich auch die alten Anschauungen (Herrmann, 1989).

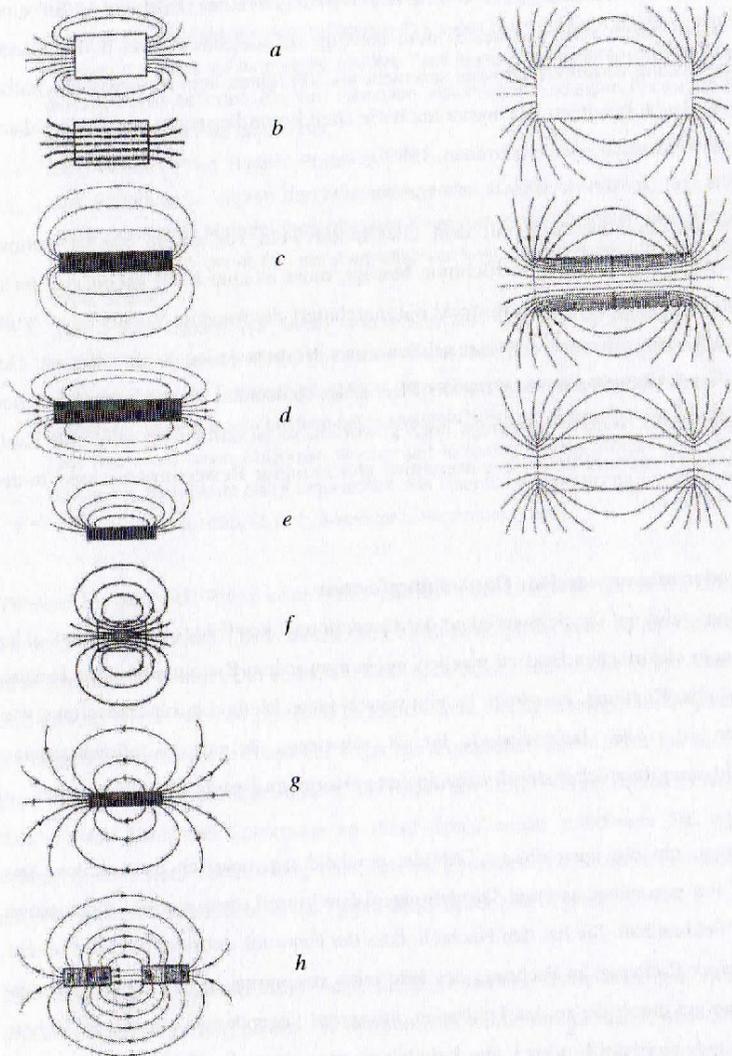
Duit (2004) spricht im Zusammenhang mit dem Gravitations-Feld von einem Kraft-Dilemma: „Wenn sich ein Körper in eine bestimmte Richtung bewegt, muss es eine Kraft geben, die ihn in diese Richtung zieht. Hinter dieser Erklärung steckt die mittelalterliche Impetus-Vorstellung.“ Viele Schüler sind der Auffassung, dass zum Herunterfallen eines Körpers keine Kraft nötig ist. Der Körper kehrt – ganz nach Übereinstimmung mit der Physik des Aristoteles – an seinen natürlichen Ort zurück (Schecker, 1988). Wird er allerdings hoch geworfen, so ist dafür sehr wohl eine Kraft nötig. Nach Newton sind Ruhe und Bewegung prinzipiell gleichrangige Bewegungszustände. In der Alltagssicht ist dies nicht so.

1.5.2 Fehlerhafte oder missverstandene Darstellungsformen

Im Berkeley-Physikkurs wird auf die Schwierigkeit der Darstellung eines Feldes hingewiesen: „Um sich ein Bild von einem elektrischen Feld zu machen, muss man jedem Raumpunkt einen Vektor, also einen Betrag und eine Richtung, zuordnen. Es gibt verschiedene Methoden zur Darstellung von Vektorfeldern. Keine ist völlig befriedigend. Es ist schwierig, in der zweidimensionalen Zeichenebene das Bild einer räumlichen dreidimensionalen vektoriellen Funktion wiederzugeben.“

Man benutzt Feldlinien, um ein unsichtbares Gebilde, ein Feld, zeichnerisch darzustellen. Die Feldliniendarstellung hat gegenüber anderen Darstellungen den Vorteil, dass sie viel quantitative Information über das Feld enthält. Sie hat den Nachteil, dass der Eindruck entsteht, das Feld sei ein Gebilde, das nur in einer Richtung, in Richtung der Feldlinien zusammen hängt. Man könnte ein statisches Feld genauso gut durch die zu den Feldlinien orthogonal liegenden Äquipotenzialflächen darstellen. Dann entstünde wohl der Eindruck, das Feld hänge nur quer zu den Feldstärkerichtungen zusammen.

In vielen Schulbüchern findet man das Feldlinienbild des Feldes eines Stabmagneten. Einige sind falsch. Die Pole eines normalen Stabmagneten sind die Stirnflächen des Stabes. Rechts: das korrekte magnetische Feld im Außenraum des Magneten (Herrmann, 1998).



Eine Unterscheidung zwischen H- und B-Feldlinien ist hier nicht nötig. Beide haben denselben Verlauf. Fehler in Schulbüchern können nicht damit entschuldigt werden, dass andere Polverteilungen vorausgesetzt worden wären. Denn es gibt keine Polverteilungen, die zu den jeweiligen Feldlinienbildern führen.

Folgende Fehler wurden begangen:

- 1) Feldlinien treten nur an den Stirnflächen aus (vergleiche a, b, c). Tatsächlich treten sie auch seitlich aus. Mögliche Ursache: Der Fehlglaube, dass B-Feldlinien im Inneren des Magneten mit den Magnetisierungslinien identisch sind. Dies trifft freilich nicht zu. Die Magnetisierungslinien bilden ein homogenes Feld.
- 2) Feldlinien treten nur senkrecht zur Oberfläche des Magneten aus (vergleiche a, b). Tatsächlich verlaufen nur die Feldlinien in der Mitte der Stirnflächen senkrecht zur Oberfläche. Mögliche Ursache: Der Fehlglaube, dass eine ähnliche Regel gelte wie bei elektrischen Feldlinien an der Oberfläche eines elektrischen Leiters.
- 3) Die an der Seite ein- und austretenden Feldlinien haben an der Oberfläche des Magneten die falsche Richtung (vergleiche d, e, f, g, h). Mögliche Ursache: Die Tatsache, dass das B-Feld divergenzfrei ist, dass B-Feldlinien weder Anfang noch Ende haben, verleitet dazu, B-Feldlinien in Gedanken durch das Innere des Magneten hindurch zu ergänzen. Man macht den Fehler anzunehmen, dass die Feldlinien beim Eintreten in den Magneten keinen oder nur einen möglichst kleinen Knick machen. Noch glatter würden die Feldlinien verlaufen, wenn sie erst gar nicht an den Seiten ein- und austreten würden, sondern nur an den Enden.

Der größte Fehler: Am Nordpol beginnen nicht nur Feldlinien, sondern es enden dort auch welche (h). Oft findet man neben der Skizze auch ein Foto, bei dem der Feldlinienverlauf mit Eisenfeilspänen sichtbar gemacht wurde. In diesem Fall wird dann in ein und demselben Buch die Diskrepanz zwischen Behauptung (Skizze) und Realität (Foto) offenkundig.

Feldlinienbilder müssen natürlich nicht in jeder Hinsicht präzise sein. Sie sollen nur das Wesentliche zeigen. Unwichtige Details dürfen durchaus ausgelassen werden. Obige Fehler sind allerdings keine Vereinfachungen. Es werden Sachverhalte gezeigt, die nicht zutreffen. Falsche Aussagen bleiben durchaus im Gedächtnis des Lernenden. Hilfe: Man zeichne nicht B-, sondern H-Feldlinien. Die Magnetpole sind die Quellen der H-Feldlinien.

1.5.3 Weitere Fehler im Unterricht

Bereits ausgeprägte Fehlvorstellungen scheinen über Jahre zu bestehen, über Jahre, in denen unterrichtet und gelehrt wird. Hinzu kommt, dass viele Lehrer den Fehlvorstellungen der Schüler nicht genügend Beachtung schenken (Ivowi, 1986). Der Unterricht selbst, aber auch Schulbücher sind Ursachen für Fehlvorstellungen (Johnstone & Mughol, 1976; Helm, 1980; Ivowi, 1984). Die Fähigkeit des Lehrers, Verständnisprobleme zu erkennen, ist damit eine wesentliche Voraussetzung eines guten Unterrichts.

- In vielen Schulbüchern wird das Hauptaugenmerk auf homogene Felder gelegt. Nur wenige machen den Übergang von Kraftvektoren zu Feldlinien verständlich. Es ist bekannt, dass Schüler unsicher im Umgang mit Vektoren sind. Die Verwirrung ist komplett, wenn Vektoren unterschiedliche Konzepte repräsentieren (Törnkvist, Pettersson, Tranströmer, 1993).
- Viele Physiklehrer erläutern ihre eigenen veranschaulichenden Darstellungen nicht oder viel zu knapp. Dazu trägt bei, dass korrektes Veranschaulichen häufig mühsam und zeitaufwändig ist, oder aber, dass Veranschaulichungen naturgemäß nicht genau mit dem übereinstimmen, was sie darstellen. Die Folge: Im Physikunterricht wird oft auf Veranschaulichungen verzichtet – zugunsten einer Betonung von rein formalen Elementen (Heege, Schwaneberg; 1985).
- Die magnetische Ladung ist eine Größe, die sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Dies drückt man in der Regel dadurch aus, dass man sagt, es gebe zwei Arten von magnetischen Polen: Nordpole und Südpole. Diese Ausdrucksweise ist irreführend. Sie legt nahe, die magnetische Ladung trete in zwei verschiedenen Qualitäten auf. Auch wenn man Pole, deren magnetische Ladungen gleiches Vorzeichen haben, als „gleichnamig“, Pole mit magnetischen Ladungen entgegen gesetzten Vorzeichens als „ungleichnamig“ bezeichnet, fördert man die Auffassung, es gebe zwei Arten magnetischer Ladung (Herrmann, 1989).
- Meist werden Kraftgesetze für elektrische Ladungen an den Anfang des Unterrichts gestellt. Das Coulombsche Gesetz unterstützt den Glauben an Fernwirkungen, der aus der Zeit vor Maxwell stammt. Auch die Relation $F = Q \cdot E$ fördert nicht die Idee, dass ein Feld ein eigenes System ist. Herrmann: „Man kommt zum Schluss, dass ein Feld nicht mehr ist als eine Verteilung der Feldstärke. Und diese ist nicht mehr als ein nützliches mathematisches Werkzeug zur Berechnung von Kräften. Wird das Feld als eine Art mathematische Konstruktion eingeführt, ist nur schwer einzusehen, dass es einen mechanischen Druck haben soll. Die Eigenschaften Druck und Spannung werden abstrakte Ideen.“

1.5.4 Das Henne-Ei-Problem

Was war vorher da, das Huhn oder das Ei? Ähnlich im Kreis drehen kann man sich bei der Frage: Was war vorher da, das Feld oder die Kraft? Die Existenz des Feldes wird lediglich aus der

Beobachtung erschlossen. Das Feld wird andererseits als tiefer liegendes Prinzip, als Ursache für das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten angesehen. Die Einführung des Feldbegriffs ist also zirkulär. Das Feld muss als ad hoc gemachte Hypothese angesehen werden, die „durch nichts anderes belegt werden kann, als durch Tatsachen, zu deren Erklärung sie eingeführt ist“ (Born, 1969, S. 267; zit.n. Schlichting/Backhaus: Physikunterricht 5-10). Die Begründung ist sozusagen vor den Phänomenen da, die eine entsprechende Erklärung nahe legen. Dass viele Lehrer in diesem Zusammenhang argumentieren, die Schüler würden später ohnehin entsprechende zusätzliche Erfahrungen machen, stellt den Erkenntnisgang auf den Kopf.

1.5.5 Physik schwer gemacht

Der beste Unterricht nützt nichts, wenn sich der Lehrer einer Sachstruktur verpflichtet fühlt, mit der die Schüler wenig anfangen können, weil die Sachstruktur nicht einzusehen ist. Folgendes Unterrichtsbeispiel ist dem Buch Physikunterricht 5-10 (Schlichting/Backhaus, 1981; Seiten 186 – 195), einem Band der Reihe Praxis und Theorie des Unterrichtens, entnommen. Der Titel heißt: „Wie Physik schwer gemacht werden kann: Die Behandlung des (magnetischen) Feldes“. Es handelt sich um eine Unterrichtseinheit in der 5. Klasse der Orientierungsstufe (Deutschland).

Der Lehrer plant, anhand einfacher Phänomene das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten von Magneten sowie deren Abhängigkeit vom Abstand erfahrbar zu machen. „Die Anziehungskraft des Magneten dringt durch viele Körper hindurch – mit Ausnahme von Eisen, Nickel und Kobalt.“ Dieser Satz des Lehrers darf nicht stehen bleiben: Für Schüler ist es schwierig, den scheinbaren Gegensatz zu verstehen, dass diese Materialien einerseits gerade Magnetismus ermöglichen, offenbar auch von diesem durchdrungen werden, andererseits Bleche aus ferromagnetischen Materialien Magnetismus abschirmen.

Der Lehrer formuliert das Problem: „Will man auf einen Körper eine Kraft ausüben, so muss man den Körper berühren oder mit ihm durch ein Seil oder eine Stange verbunden sein. Beim Magneten ist das aber offensichtlich anders.“ Erwartet wird von den Schülern, den Raum um einen Stabmagneten näher zu untersuchen. Stattdessen reagieren die Schüler in einer Weise, die zu erkennen gibt, dass sie nicht nur mit Kräften aufgrund von Berührungen oder Nahwirkung vertraut sind, sondern in gleicher Weise mit Kräften, die über Entfernungen reichen. Ein Schüler: „Dass hier ein Unterschied besteht, liegt daran, dass Ihre Kraft (die Kraft, die der Lehrer unterstellt) nicht durch die Luft geht“, sich also anders verhält als etwa elektrostatische Kräfte, die Schwerkraft, Fernbedienung ... Diese Äußerung wird vom Lehrer ignoriert. Er drängt wiederholt auf die Untersuchung des Raums um einen Stabmagneten. Er erwartet folgende Schülerreaktion:

- Beim Magneten sind die Verbindungen (Seile, Stäbe) durchsichtig.
- Die Schüler stellen ihre Vorstellungen zeichnerisch an der Tafel dar.

Ein Schüler wirft das Schlagwort „Magnetfeld“ in den Raum. Mit der Frage „Was ist das?“ ist der Lehrer auch schon da, wohin er wollte. Nach Ansicht der Schüler ist das Magnetfeld ein rundes oder eckiges Gebilde um einen Magneten. „Im kastenförmigen Bereich um den Magneten zieht der Magnet an, außerhalb nicht.“ Es wird gar nicht versucht, diese Beschreibung aus den unmittelbaren Erfahrungen mit den Magneten (der vorangegangenen Stunden) zu verstehen. Das Magnetfeld stellt im Bewusstsein der Schüler entweder ein formales Additivum zu den beobachteten Phänomenen dar oder bringt eine zusätzliche, durch andere Phänomene (etwa falsch verstandene Phänomene der Weltraumphysik) begründete Eigenschaft zum Ausdruck.

Das Feld wird mit Eisenfeilspänen sichtbar gemacht. Der Lehrer beginnt zunächst zaghaft, dann immer mutiger werdend, die Vorlage zusehends außer Acht lassend, die bekannten Feldlinien anzuzeichnen. Die Schüler protestieren leise. Der Lehrer schaltet die Projektionslampe aus und weist auf das zurückbleibende Tafelbild: „Überall dort, wo Linien sind, wirkt die Kraft. Die Linien sind überall um den Magneten herum. Wo genau das aufhört, kann man nicht sagen. Das ganze Gebilde nennt man Magnetfeld.“ Nach der Stunde rechtfertigt der Lehrer sein Vorgehen so: „Die Schüler hätten die Feldlinien schon gefunden, wenn man ihnen nur genügend Zeit gegeben hätte. Sie waren doch deutlich zu erkennen.“ Aber wahrscheinlich nur für diejenigen, die wussten, was sie sehen sollten.

Fazit: Den Schülern wurde ein abstrakter Begriff förmlich aufgedrückt. Der Unterricht wurde stark aus der Sicht des Wissenden heraus geplant. Auch wenn die Schüler schließlich die Feldlinien zu sehen glauben, so kann dennoch nicht die Rede davon sein, die Schüler hätten eingesehen, dass es sinnvoll ist, in der Nähe des Magneten so etwas wie ein Feld anzunehmen. Dann wäre es überhaupt nicht schlimm gewesen, wenn diese Linien durch die Eisenfeilspäne nur unvollkommen abgebildet worden wären. Denn diese Sichtbarmachung wäre so gesehen nur eine zusätzliche Illustration dessen, was man bereits durch andere Erfahrungen gewusst hätte.

Das Feld besitzt keine Erklärungsmächtigkeit für beobachtete Phänomene, sondern erlangt ein Eigenleben. So entwickelte sich folgendes Unterrichtsgespräch:

S1: Ist das Feld auch da, wenn kein Magnet da ist?

L: Natürlich nicht ...

S2 unterbricht: Darf ich mal was zeigen? (Geht nach vorne, nimmt die Glasplatte mit den geordneten Eisenfeilspänen hoch, entfernt den Magneten, legt die Glasplatte wieder auf den Overheadprojektor.) Das Feld ist noch da.

L unsicher: Ich hab' euch doch gesagt, wir haben doch gesehen, das Feld ist nur gedacht.

Fraglich ist der Nutzen eines aufgezwungenen, unverstandenen, jedenfalls mit abwegigen Phänomenen assoziierten Konzepts, das nichts als die so genannte fachliche Bedeutung als Legitimation hat. Das Magnetfeld gewinnt dann seine Berechtigung, wenn Schüler genügend

voneinander unabhängige Erfahrungen gemacht haben, die durch den Feldbegriff als gemeinsames Erklärungsprinzip zusammengefasst werden könnten.

Die Autoren schließen: „Diese Rolle kann der Feldbegriff erst bei der Behandlung der elektromagnetischen Induktion spielen.“ Er zeige dann nämlich den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Möglichkeiten auf, in einer Spule eine Spannung zu induzieren, indem die Änderung des magnetischen Flusses als Gemeinsamkeit von Vorgängen wie ...

- Relativbewegung zwischen Spule und einem Dauermagneten,
- Drehung der Spule in der Nähe eines Dauermagneten,
- Veränderung der Fläche der Spule in der Nähe eines Dauermagneten oder
- Veränderung der Stromstärke in einer benachbarten zweiten Spule

heraus gearbeitet wird.

Der Feldbegriff erlaubt an dieser Stelle eine starke Vereinfachung der Beschreibung. „Denknotwendig wird er jedoch erst im Zusammenhang mit elektromagnetischen Wellen, wenn nämlich der Wunsch, den Energieerhaltungssatz aufrecht zu erhalten, es erforderlich macht, elektromagnetische Felder als Träger von Energie anzusehen.“

1.6 Konsequenzen für den Unterricht

1.6.1 Unterricht auf Basis vorunterrichtlicher Vorstellungen

Nach Duit (2004) muss ein Lehrer zwei Eigenschaften mitbringen, um einen guten Unterricht zu gewährleisten. „Der Lehrer braucht Zeit und Geduld für ständige Bemühungen, das Verständnis Schritt für Schritt zu entwickeln.“ Es gilt, vorunterrichtliche Vorstellungen beim gesamten Planungsprozess zu berücksichtigen. Gemeint ist keine Vereinfachung der Sachstruktur der Physik, sondern eine didaktische Rekonstruktion (Kattmann et al., 1997; Kircher et al., 2001, 117ff). Es ist zu bedenken, von welchen Vorstellungen ausgegangen werden soll und wie von dort Schritt für Schritt zu den wissenschaftlichen Vorstellungen geleitet werden kann. Die Unterrichtsmethoden sind so auszuwählen, dass Schülern ausreichend Gelegenheit gegeben wird, sich mit den neu zu lernenden Vorstellungen intensiv auseinander zu setzen. Es gibt zwei Möglichkeiten:

- 1) Kontinuierlicher Weg, bruchloser Übergang: Es werden Erfahrungen als Ausgangspunkt gewählt, deren Alltagsverständnis nicht oder möglichst wenig mit dem wissenschaftlichen Vorstellungen kollidiert. Das ist die Variante eines bruchlosen Weges, also der Versuch, einen kontinuierlichen Übergang von vorunterrichtlichen zu physikalischen Vorstellungen zu finden.

- 2) Der diskontinuierliche Weg: Man bemüht sich um eine schlagartige Einsicht und beginnt gerade mit solchen Aspekten, die dem zu Lernenden konträr gegenüber stehen. Es wird versucht, Schüler in kognitive Konfliktsituationen zu bringen, um sie von der wissenschaftlichen Sichtweise zu überzeugen. Es gibt zwei grundsätzliche Möglichkeiten: Entweder einander konträre Vorstellungen (Vorstellungen des Lernenden, naturwissenschaftliche Vorstellung) gegenüber zu stellen, oder Voraussagen der Lernenden zum Ausgang eines Experiments zu sammeln.

Voraussetzung ist, dass Schüler den kognitiven Konflikt tatsächlich so sehen, wie es die Lehrkraft beabsichtigt. Es mangelt häufig an Experimenten, an denen Unterschiede zwischen Schülervorstellungen und wissenschaftlichen Vorstellungen überzeugend aufgezeigt werden können. Außerdem wird sehr viel Unterrichtszeit benötigt, alle Vorstellungen der Schüler seriös durchzudiskutieren. Wiesner (1995) schlägt deshalb vor, Schülervorstellungen nicht explizit anzusprechen, sondern Experimente und Argumentationen zu finden, die einen weitgehend bruchlosen Weg zulassen.

In der Literatur finden sich folgende Unterrichtsstrategien:

- 1) Vertraut machen mit den Phänomenen.
- 2) Bewusstmachen und Diskussion über Schülervorstellungen.
- 3) Die wissenschaftliche Sicht wird von der Lehrkraft eingebracht.
- 4) Anwendungen der neuen Sichtweise auf neue Beispiele, um das Erreichte zu festigen.
- 5) Wichtig ist ein kritischer Rückblick auf die durchlaufenen Lernprozesse.

Kennzeichen erfolgreichen Unterrichts:

- Schülervorstellungen ernst nehmen, sie ausdrücklich bei der Unterrichtsplanung berücksichtigen, sie im Unterricht gegebenenfalls zur Sprache bringen.
- Unterrichtsthemen in sinnstiftende Kontexte einbetten, damit sie den Schülern lernenswert erscheinen.
- Nicht allein Lernangebote machen, sondern diese nachhaltig unterstützen. Freiräume für eigenständiges Erarbeiten des eigenen Wissens schaffen.

Zentral wichtig ist, dass Unterrichtsplanung und Unterrichtsdurchführung auf der konstruktivistischen Sicht des Lernens basiert.

1.6.2 Das Feld als physikalisches System

Herrmann (1989, 1990, 1996) empfiehlt, Felder als ernstzunehmende physikalische Systeme einzuführen. „Dies entspricht erstens der Auffassung der modernen Feldtheorie und ist zweitens leicht zu begreifen.“

Wie andere Systeme auch hat ein Feld Energie, Impuls, Drehimpuls und je nach Zustand Entropie. Wie andere „materielle“ Systeme hat es einen Druck und je nach Zustand eine Temperatur. Wie andere Systeme besteht es auch als Elementarportionen, im Fall des elektromagnetischen Feldes aus Photonen. Herrmann schlägt vor, das Wort „Feld“ nur im physikalischen Sinn benutzen, d.h. nur als Name eines Systems. Warum ist ein Feld ein physikalisches System? Das Feld erfüllt genau jene Anforderungen, die man an ein physikalisches System stellt. Von einem solchen spricht man, wenn es durch Variablen beschreibbar ist, durch bekannte Variablen, die sich in der Physik bewährt haben. Diese Variablen haben in bestimmten Zuständen des Gebildes bestimmte Werte. Der Zusammenhang zwischen diesen Werten ist für jedes System ein anderer, er ist für ein bestimmtes System charakteristisch. Das elektromagnetische Feld hat Energie(dichte), es steht unter mechanischer Spannung, sein Impuls kann von Null verschieden sein, auch seine Entropie. In manchen Zuständen hat die Temperatur eines Feldes einen bestimmten Wert („thermische Strahlung“). Die elektrische Feldstärke ist eine Größe, die eigens zur Beschreibung des elektrischen Feldes gebildet wurde.

Man solle sich laut Herrmann bei der Einführung des Feldbegriffs daran orientieren, wie man materielle Systeme einführt. „Ein elektrisches Feld ist ein Gebilde mit folgenden Eigenschaften: ...“ Wie ungeschickt es sei, ein Feld einzuführen als Raum mit besonderen physikalischen Eigenschaften, erkenne man, wenn man bedenkt, dass es durchaus nicht falsch wäre, zum Beispiel Luft „als Raum mit einer besonderen physikalischen Bedeutung“ oder „als Raum, der eine physikalische Eigenschaft trägt“ zu definieren. Herrmann: „Das würde niemand tun.“

Im Karlsruher Physikkurs stellen sich Schüler das Feld als etwas Unsichtbares, stoffliches Etwas vor. Das unsichtbare „Zeug“ kann an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich dicht sein. Die Dichte nimmt nach außen hin ab. Eine genaue Grenze, an der das elektrostatische Feld aufhört, lässt sich nicht angeben. Das „Zeug“ steht – gesehen von der Oberfläche – in radialer Richtung an jeder Stelle unter mechanischer Zugspannung und senkrecht dazu ebenfalls an jeder Stelle unter mechanischer Druckspannung (Starauschek, 1997). Diese lokale Beschreibung des elektrostatischen Feldes betont den eigenständigen Charakter des Feldes als physikalisches System (Herrmann,

1990). Sucht man ein Mengenmaß für das elektrostatische Feld, so bietet sich dafür die Energiedichte an. Sie ist ein Maß für die Menge des Feldes in einem Raumbereich – und spiegelt damit den stofflichen Charakter des „Zeuges“ wider.

Die elektrische Feldstärke ist eine von mehreren physikalischen Größen, mit denen man dieses System beschreibt. Diese Einsicht wird nach Auffassung des Karlsruher Physikkurses durch die übliche Einführung der Feldstärke über $F = Q \cdot E$ verbaut. Q ist die so genannte Probeladung, E die Feldstärke des Feldes, das sich am Ort von Q befand, bevor Q dort war. Es entsteht die Vorstellung, das Feld sei ein sehr schwieriger und abstrakter Begriff. Die Unterscheidung zwischen den Begriffen Feld (ein physikalisches System, also ein sehr konkretes Gebilde) und Feldstärke (eine physikalische Größe, also ein mathematisches Konzept) wird fast unmöglich gemacht. Im Karlsruher Physikkurs werden elektrische und magnetische Feldstärke auf einem anderen Weg eingeführt: die elektrische über U/d (Spannung durch Abstand), die magnetische über I/d (Stromstärke durch Abstand). Die Elektrodynamik enthält mehrere innere Analogien. Die beiden Feldstärken entsprechen einander im Rahmen derjenigen Analogien, die man bei elektrischer Spannung und elektrischer Stromstärke, elektrischer Ladung und magnetischem Fluss sowie Kapazität und Induktivität findet.

1.6.2.1 Der Stoff, aus dem die Felder sind

„Die Beschreibung des elektrostatischen Feldes legt zu ihrer begrifflichen Abrundung die Einführung einer neuen Bezeichnung nahe, erzwingt sie nahezu“, so Staraschek (1997). Die Schwierigkeit der Schüler, das Stoffliche des Feldes sprachlich mit einem Wort zu benennen, lässt den Verdacht zu, dass sie das Wort hierfür nicht kennen. Der Stoff, aus dem die Felder sind, scheint keinen Namen zu haben. „Dies ist so, als ob man über die Eigenschaften eines Sees spricht, ohne das Wort Wasser verwenden zu dürfen.“ Als Beispiele werden angeführt: „Die Oberfläche eines Sees ist gestiegen oder gefallen.“ Oder: „An Seen kann es Zuflüsse geben. Einen solchen erkennt man daran, dass Körper, die an diesen Stellen an der Oberfläche schwimmen, von diesen Stellen weg getrieben werden. Die Strömungen wirken auch unterhalb der Oberfläche des Sees.“ Es sei sprachlich zwar nicht notwendig, aber sinnvoll, das Wort „Wasser“ zu verwenden. „Ebenso sinnvoll ist es, dem unsichtbaren ‚Zeug‘ einen Namen zu geben.“ Die Bezeichnung für den Stoff, aus dem die Felder sind, soll die Stofflichkeit des elektrostatischen Feldes widerspiegeln. Starascheks Vorschlag lautet: „Feldstoff“. Obwohl dies der schulphysikalischen Lehrmeinung widerspricht, sei die Interpretation des elektrostatischen Feldes als unsichtbarer Stoff mehr als eine geschickte Veranschaulichung. „Die Vorstellung von Feldstoff ist auch physikalisch sinnvoll. Denn: Dem Feldstoff werden lokal eine Energiedichte und eine mechanische Spannung zugeordnet. Darüber

hinaus haben alle physikalischen Größen, mit denen ein Körper beschrieben wird, auch beim elektrischen Feld einen Wert.“ Staraschek schließt: „Das elektrische Feld kann als Gegenstand betrachtet werden, der aus einem unsichtbaren Stoff, dem ‚Feldstoff‘ besteht.“

1.6.2.2 Der Druck eines Feldes

Ein modernerer Zugang zum Elektromagnetismus ist nach Herrmann (1989) folgender: Neben den Maxwell'schen Feldgleichungen wird auch der mechanische Druck eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes eingeführt. Kräfte auf Punktladungen etc. können darauf zurückgeführt werden. Kritiker dieses Zugangs könnten entgegen halten, dass dazu die dem Anfänger unbekannt Tensor-Rechnung nötig sei. „Das ist aber gar nicht der Fall. Das einzige, was der Schüler verstehen muss, ist, dass in Richtung der Feldlinie Spannung bzw. ein Zug herrscht, und senkrecht dazu Druck derselben Größe“, so Herrmann, der folgende Umsetzung im Unterricht vorschlägt.

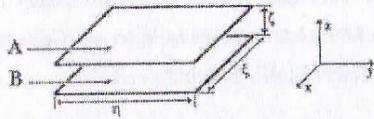
Impuls-Übertragung zwischen zwei Punkten wird möglich gemacht durch eine Feder, Luft oder ein Seil. Zwischen den beiden Punkten muss also eine Verbindung bestehen. Das gilt natürlich auch für zwei elektrische Ladungen. Die Verbindung ist allerdings unsichtbar. Wir nennen diese Verbindung „elektrisches Feld“. Ein elektrisches Feld kann drücken und ziehen. Wir stellen fest: Jedem Punkt des Raumes kann eine Richtung zugeschrieben werden: jene Richtung, in die die Kraft (auf eine Testladung) wirkt. Wird die Probeladung Q_{p0} an derselben Stelle durch eine Probeladung $2 \cdot Q_{p0}$, $3 \cdot Q_{p0}$ etc. ersetzt, verstärkt sich die Kraft um den Faktor 2, 3 etc. Der Faktor, der die Ladung des Testkörpers in Beziehung zur Kraft setzt, ist also charakteristisch für das Feld ohne Testladung. Wir nennen diesen Faktor Feldstärke an der Stelle der Probeladung. Die Feldstärke ist also definiert durch:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot Q_p \quad (1)$$

Wird eine weitere Ladung hinzugefügt, addieren sich die Feldstärken vektoriell. Ladungen sind Stellen, wo Feldlinien beginnen oder enden. Es gilt das Gauß'sche Gesetz:

$$Q = \epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Das Integral erstreckt sich über eine geschlossene Oberfläche, Q ist die Gesamtladung im Inneren der Oberfläche.



Der mechanische Druck in Richtung der Feldstärke: Gegeben ist ein Plattenkondensator (siehe Abbildung). Platte A zieht Platte B an. Daher muss in Richtung der Feldlinien eine Spannung herrschen. Wir berechnen den Wert der Spannung. Wir betrachten die Ladung dQ_B irgendeines Oberflächen-Elements von B als Testladung im Feld der Platte A und erhalten die Kraft

$$d\vec{F}_B = \vec{E}_A dQ_B.$$

Die Gesamtkraft \vec{F}_B , die A auf B ausübt, beträgt

$$\vec{F}_B = \vec{E}_A Q_B. \quad (2)$$

\vec{E}_A ist die Feldstärke, die von Platte A erzeugt wird.

Die Feldstärke zwischen z_1 und z_2 beträgt

$$\vec{E}_A = -\frac{Q_A}{2\epsilon_0 \cdot \xi \cdot \eta} \cdot \vec{e}_z$$

$$\vec{E}_B = \frac{Q_B}{2\epsilon_0 \cdot \xi \cdot \eta} \cdot \vec{e}_z$$

\vec{e}_z ist der Einheitsvektor in z-Richtung.

Da der Absolut-Betrag der Ladung der beiden Platten der gleiche ist, also $Q_B = -Q_A = Q$ gilt, erhalten wir:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_B.$$

Der Feldstärke im Inneren des Kondensators ergibt sich aus der Summe, also:

$$\vec{E} = 2\vec{E}_A = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \xi \cdot \eta} \cdot \vec{e}_z. \quad (3)$$

Wir erhalten als Kraft, die Platte A auf Platte B ausübt, als Funktion der Feldstärke \vec{E} zwischen den beiden Platten, indem wir \vec{E}_A und $Q_B = Q$ in Gleichung (2) durch Ausdrücke in (3) ersetzen:

$$\vec{F}_B = \xi \cdot \eta \cdot (\epsilon_0 / 2) \vec{E}^2 \vec{e}_z. \quad (4)$$

Um den Druck σ_1 im Inneren des Feldes in Richtung senkrecht der Platten, also parallel zu den Feldlinien, zu berechnen, dividieren wir die Kraft durch die Oberfläche $\xi \cdot \eta$, also:

$$\sigma_1 = (\epsilon_0 / 2) \vec{E}^2. \quad (5)$$

Die Spannung ist positiv, ist also eine Zugspannung. Sie hat aufgrund der Homogenität an allen Stellen zwischen den Platten den gleichen Wert. Wir erhalten als Resultat: In jedem Punkt des elektrischen Feldes herrscht Zugspannung in Richtung der Feldstärke. Ihre Größe beträgt $(\epsilon_0 / 2) \vec{E}^2$.

Die Energiedichte: Wir betrachten einen Plattenkondensator mit fester Ladung. Seine Platten haben zunächst den Abstand Null. Die Platten sind senkrecht zur z-Achse orientiert. Nun verschieben wir Platte A in z-Richtung, bis sie die Distanz ζ erreicht. Dabei wird das Feld-Volumen vergrößert, während die Feldstärke gleich bleibt. Die Energie (bzw. Arbeit) W, die zur Trennung der Platten nötig ist, berechnet sich aus

$$W = \vec{F}_A \cdot \zeta \cdot \vec{e}_z.$$

Die Kraft \vec{F}_A , die auf Platte A wirkt, um diese von Platte B zu entfernen, ist die gleiche Kraft, die aus (4) berechnet wird, entspricht also der Kraft, die A auf B ausübt. Daraus folgt:

$$W = \xi \cdot \eta \cdot \zeta \cdot (\epsilon_0 / 2) \cdot \vec{E}^2 \quad (6)$$

und mit (3) ergibt sich:

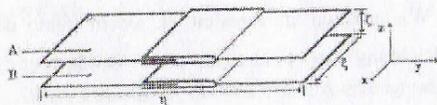
$$W = \frac{Q^2 \cdot \zeta}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \xi \cdot \eta} \quad (7)$$

Die Energiedichte ρ_w berechnet sich aus (6) durch Division durch das Feld-Volumen $\xi\eta\zeta$, also

$$\rho_w = (\epsilon_0 / 2) \cdot \vec{E}^2.$$

Wir sehen also: Ein elektrisches Feld hat Energie. Die Energiedichte hat den gleichen Wert wie die mechanische Spannung und beträgt $(\epsilon_0 / 2) \cdot \vec{E}^2$.

Die mechanische Spannung senkrecht zur Richtung der Feldstärke: Wir betrachten einen Plattenkondensator, dessen Plattenflächen durch Ziehen an den gegenüberliegenden Kanten vergrößert werden können.



Die Kraft, die auf die rechte Hälfte des Kondensators wirkt, um seine Ausdehnung in y-Richtung zu vergrößern, ergibt sich aus (7):

$$\vec{F} = \frac{dW}{d\eta} \cdot \vec{e}_y = -\frac{Q^2 \cdot \zeta}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \xi \cdot \eta^2} \cdot \vec{e}_y,$$

wobei \vec{e}_y der Einheitsvektor in y-Richtung ist. Mit (3) erhalten wir

$$\vec{F} = -(\epsilon_0 / 2) \cdot \vec{E}^2 \cdot \xi \cdot \zeta \cdot \vec{e}_y.$$

Diese Kraft wirkt auf die rechte Hälfte des Kondensators. Da der Kondensator in zwei Hälften geteilt ist, die sich frei bewegen können, kann diese Kraft nicht durch eine Kraft ausgeglichen werden, die von den linken Hälften der Platten direkt auf die rechten wirkt. Es muss durch das Feld übertragen werden. Eine äußere Kraft wirkt auf die rechten Hälften der Platten, dies verursacht einen Feld-Druck, und das Feld drückt gegen die linken Hälften der Platten. Da das Feld homogen

ist, lässt sich die lokale Spannung im Feld in y-Richtung aus der Kraft berechnen, indem wir diese durch den (positiv gezählten) Kondensator-Querschnitt $\xi \cdot \zeta$ dividieren. Also

$$\sigma_n = -\vec{F} / (\xi\zeta) = -(\epsilon_0 / 2) \vec{E}^2. \quad (8)$$

Die Tatsache, dass σ_n negativ ist, bedeutet, dass es sich um Druckspannung handelt.

Wir kommen zum Schluss: In jedem Punkt des elektrischen Feldes herrscht eine Druckspannung in Richtung senkrecht zur Feldstärke. Seine Größe beträgt $(\epsilon_0 / 2) \vec{E}^2$. Wir haben also in jedem Punkt des Feldes Druck und Zug zugleich. Veranschaulichung ist ein Schwamm, der mit beiden Händen umfasst wird, in horizontaler Richtung gedrückt und in vertikaler gezogen wird.

1.6.3 Feldlinienbilder

Das Feldkonzept und Feld-Linien sind Quellen für Verwirrung unter Schülern, aber auch unter Physik-Studenten auf Universitätsniveau. Diese Tatsache legt es nahe, eine neue Lehr-Strategie zu entwickeln, der nicht nur die Theorie zugrunde liegt, sondern die auch Rücksicht auf Verständnis-Schwierigkeiten nimmt (Törnkvist, Pettersson, Tranströmer; 1993). Feldlinienbilder können etwa den Eindruck erwecken, das Feld hänge nur in Richtung der Feldlinien zusammen. Um dies zu vermeiden, beginne man mit anderen Darstellungen: durch Grautönung, durch Punkte und Pfeile (Herrmann, 1989). A.B Arons („A Guide to Introductory Physics Teaching“, Wiley, New York, 1990) macht den Vorschlag, Pfeile unterschiedlich darzustellen, wenn sie im gleichen Bild unterschiedliche Konzepte repräsentieren: Einen normalen Pfeil für Kraft, einen gestrichelten Pfeil für Geschwindigkeit und einen doppelt-gestrichelten für Beschleunigung. Die Verwendung unterschiedlicher Farben erfüllt den gleichen Zweck. Computer bieten sich an, Feld-Linien darzustellen und deren Interpretation zu erleichtern.

Heege und Schwaneberg (1985) raten dazu, von einer Phänomen orientierten Erfahrungsbasis auszugehen, verschiedene Darstellungen nebeneinander zu gebrauchen (Feldlinienbild, Feldvektorenbild, Feldstärke-Ort-Diagramm) und Beziehungen zwischen verschiedenen Darstellungen explizit zum Gegenstand des Unterrichts zu machen.

Elektrisches Feld:

Aus der Maxwellschen Gleichung $\operatorname{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0$ folgen Regeln für Feldlinien-Bilder:

- 1) Elektrische Feldlinien beginnen bei positiven und enden bei negativen elektrischen Ladungen. Die Anzahl der Feldlinien, die bei einer Ladung beginnen oder enden, ist proportional zum Absolut-Wert dieser Ladung.
- 2) Elektrische Feldlinien kreuzen sich niemals.
- 3) Im Vakuum ändert sich die Richtung der Feldlinien niemals plötzlich (Feldlinien sind stetig).
- 4) Im Inneren eines elektrischen Leiters gibt es keine elektrischen Feldlinien.
- 5) Die Feldlinien stehen senkrecht auf die äußere Oberfläche eines Leiters.

Magnetisches Feld:

Aus $\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$ und $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ folgt $\operatorname{div} \vec{H} = -\operatorname{div} \vec{M}$. Nach Einführung der magnetischen Ladungsdichte $\rho_m = -\operatorname{div} \vec{M}$ kann dies geschrieben werden als $\operatorname{div} \vec{H} = -\rho_m / \mu_0$. Diese Gleichung hat die gleiche mathematische Struktur wie $\operatorname{div} \vec{E} = -\rho / \epsilon_0$. Es wurde eine Analogie zur Elektrostatik hergestellt. Es folgen Regeln für magnetische Feldlinien (H-Feld):

- 1) Magnetische Feldlinien beginnen beim positiven (Nord-)Pol und enden am negativen (Süd-)Pol. Die Zahl der Feldlinien ist proportional zum Absolutwert der magnetischen Pol-Ladung.
- 2) Magnetische Feldlinien kreuzen sich niemals.
- 3) Im Vakuum ändert sich die Richtung der Feldlinien niemals abrupt.
- 4) Im Inneren eines weichmagnetischen Materials gibt es keine magnetischen Feldlinien.
- 5) Die Feldlinien stehen im Außenraum eines Weichmagneten senkrecht zu dessen Oberfläche.

Die Regeln 2, 3 und 5 gelten auch für B-Feldlinien. Regel 1 lautet für B-Feldlinien so: B-Feldlinien sind immer geschlossen. Es gibt kein Gegenstück zu Regel 4. Es gibt weitere magnetische Regeln, die kein Pendant in der Elektrostatik haben:

- 6) Im Inneren eines Superleiters gibt es keine magnetischen Feldlinien.
- 7) Die Feldlinien im Außenraum eines Supraleiters sind parallel zu dessen Oberfläche.

1.6.4 Vakuum als moderner Äther

Vielfach herrscht die Meinung vor: Den Äther als Träger von elektromagnetischen Feldern gebe es nicht, er sei eine unnötige Annahme. „Die Vorstellung eines Äthers als Träger elektromagnetischer Wellen im Vakuum wurde erst in der Relativitätstheorie überwunden.“

Herrmann (1999) warnt: „Man kann ein Problem nicht dadurch aus der Welt schaffen, indem man behauptet, es gebe den Gegenstand der Betrachtung gar nicht. Die Existenz des Äthers in Abrede zu stellen, war nur eine Verzweiflungstat. Gelöst wurde das Problem dadurch nicht.“ Das Problem war das merkwürdige Verhalten des Äthers bei Bezugssystemwechsel, das sich etwa im Michelson-Morley-Experiment äußerte. Die Existenz eines Äthers wurde tatsächlich einige Jahrzehnte lang durchaus ernsthaft in Frage gestellt. „Auf jeden Fall wurde er bald nach dieser teilweisen Verbannung offiziell wieder eingelassen, allerdings unter einem neuen Namen.“ Damit wäre die Sache im Grunde wieder in Ordnung gebracht, wenn nicht in sehr vielen Büchern der Raum immer noch leer wäre, was man auch daran sieht, wie der Feldbegriff eingeführt wird: Ein Feld ist ein leerer Raum mit Eigenschaften. Nach moderner Auffassung ist ein Feld ein angeregter Zustand dieses neuen Äthers. Noch ein kleiner Mangel, der aber durchaus mehr als nur ein Schönheitsfehler ist: Der neue Äther trägt den Namen Vakuum. Etwas Vorhandenes bekommt eine Bezeichnung, die gerade ein Nichtvorhandensein zum Ausdruck bringt!

Die Aussagen über leeren Raum können Ursache größerer Lernschwierigkeiten sein: Nämlich dann, wenn man zu verstehen gibt, im leeren Raum befinde sich gar nichts, oder es befinde sich dort das Nichts. „Ein sparsamer Umgang mit dem Begriff des leeren Raumes ist ratsam. Vor allem, wenn es um die Einführung des Feldbegriffs geht, sollte man ihn vermeiden“, meint Herrmann.

Auf keinen Fall sollte Einstein als Zeuge gegen den Äther genannt werden. Albert Einstein (Äther und Relativitätstheorie, Verlag von Julius Springer, Berlin 1920, Seite 12): „Diese raum-zeitliche Veränderlichkeit der Beziehungen von Maßstäben und Uhren zueinander [...], hat die Auffassung, daß der Raum physikalisch leer sei, wohl endgültig beseitigt.“ Seite 15: „Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar; denn in einem solchen gäbe es nicht nur keine Lichtfortpflanzung, sondern auch keine Existenzmöglichkeit von Maßstäben und Uhren, also auch keine raum-zeitlichen Entfernungen im Sinne der Physik. Dieser Äther darf aber nicht mit der für ponderable Medien charakteristischen Eigenschaft ausgestattet gedacht werden, aus durch die Zeit verfolgbaren Teilen zu bestehen; der Bewegungsbegriff darf auf ihn nicht angewendet werden.“ (zit.n. Herrmann 1999).

1.6.5 B oder H?

Der Lehrer muss sich darüber im Klaren sein, an welche der beiden vektoriellen Größen (H oder B) er denkt, wenn er über das Feld spricht. Denn auch qualitative Aussagen über das Feld hängen von dieser Wahl ab. Jede der beiden Größen H (magnetische Feldstärke) und B (Flussdichte) hat ihre Vorteile (Herrmann 1991). Bei Verwendung von H wird die Behandlung der Magnetostatik bedeutend einfacher. Der Aufbau der Magnetostatik ist dann völlig analog zum Aufbau der Elektrostatik. So wie man in der Elektrostatik sagen kann, die E-Feldlinien beginnen an positiven und enden an negativen Ladungen, so gilt in der Magnetostatik, dass die H-Feldlinien an Nordpoladungen beginnen und an Südpoladungen enden. Und genauso, wie Metalle in ihrem Inneren E-feldfrei sind, so sind weichmagnetische Stoffe in ihrem Inneren H-feldfrei (aber nicht B-feldfrei). Die Aussagen der Magnetostatik über die Flussdichte B sind da schon komplizierter. Insbesondere kann man den B-Feldlinien nur schwer ansehen, wo sich die Pole eines Magneten befinden. Die Pole eines Magneten sind nicht jene Stellen, an denen H- oder B-Feldlinien in den Magneten eintreten (außerhalb des Magneten darf man die beiden Größen noch miteinander identifizieren), sondern die Stellen, wo das Magnetisierungsfeld M und demzufolge auch die magnetische Feldstärke H Divergenzen hat.

Die Beschreibung der Induktion wird mit der Verwendung von B einfacher. Der Wert der induzierten Spannung hängt von der Änderung des Flusses des B-Vektorfeldes ab. Da nun B gleich der Summe aus Feldstärke und Magnetisierung ist (bis auf einen konstanten Faktor), $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$, kann eine Induktionsspannung, falls man B nicht verwendet, zwei Ursachen haben, nämlich erstens eine zeitliche Änderung der Feldstärke H und zweitens eine zeitliche Änderung der Magnetisierung M. Die Magnetisierung ist ein Vektorfeld, das den Magnetisierungszustand von Materie beschreibt. Die Quellen und Senken dieses Feldes sind die magnetischen Pole. Das bedeutet, dass man diese Quellen und Senken auch als „magnetische Ladungsdichte“ interpretieren kann. Wenn man das Magnetisierungsfeld eines Körpers kennt, weiß man, wo sich die Pole befinden. Aus der Kenntnis der Polverteilung hingegen kann man nicht eindeutig auf den Verlauf der Magnetisierungslinien schließen. „Der Zusammenhang zwischen Magnetisierungsfeld und Polverteilung ist so einfach, dass man ihn leicht im Unterricht diskutieren kann“, so Herrmann. Bei der Behandlung der Magnetisierung wird klar, dass sich bei Magnetisieren eines Körpers der ganze Körper ändert und nicht nur die Stellen, wo sich die Pole befinden.

Manchmal unterscheidet man zwischen zwei Induktionsexperimenten: Ein Dauermagnet wird in eine ruhende Spule geschoben. Oder eine Spule wird über einen ruhenden Dauermagneten geschoben. Selbstverständlich handelt es sich in den beiden Fällen um dasselbe Experiment. Es

wird nur in verschiedenen Bezugssystemen beschrieben. Herrmann: „Nach unseren Unterrichtserfahrungen fällt es keinem Schüler ein, dass es hier um verschiedene Experimente geht. Logische Schwierigkeiten können tatsächlich erst dann eintreten, wenn man das Problem mathematisch zu beschreiben versucht. Erst dann scheinen die Experimente verschieden zu sein, da im einen eine zeitliche Änderung der magnetischen Feldstärke auftritt, im anderen aber nicht. Man muss dann zeigen, dass sich die Feldstärken bei Bezugssystemwechsel so transformieren, dass die beobachteten Effekte dieselben bleiben. Solange man keine mathematische Beschreibung der Induktion vorhat, erscheint die Unterscheidung der beiden Experimente einfach unnatürlich.“

Es spricht einiges dafür, einiges dagegen, die Elektrostatik ans Ende der Elektrizitätslehre zu stellen. „Ausschlaggebend, dass wir dies (im Karlsruher Physikkurs; Anm.) taten, war, dass wir den Feldbegriff an Hand des magnetischen und nicht des elektrischen Feldes einführen wollten. Die erste Begegnung der Schüler mit Feldern soll nicht die mit einem so kümmerlichen Gebilde wie dem elektrischen Feld sein, einem Feld, dessen Wirkungen man nur erkennt, wenn man eine ganze Reihe von Vorsichtsmaßnahmen trifft“, so Herrmann.

1.6.6 Magnetpole

Als Pole eines Magneten werden jene Stellen bezeichnet, an denen die Anziehung am stärksten ist, oder an denen die meisten Eisenspäne bzw. Nägel hängen bleiben. Die Pole werden durch rote und grüne Färbung gekennzeichnet. Die Beschreibung der Wechselwirkung zwischen magnetischen Polen beschränkt sich auf Aussagen über Anziehung und Abstoßung, also auf die Richtung der Kraft.

Herrmann (1998) ortet bei einer solchen Vorgehensweise Mängel: Die Magnetisierung ist ein Vektorfeld, das die magnetische Dipoldichte beschreibt. Die Pole eines Magneten sind jene Stellen, an denen die Feldlinien der Magnetisierung beginnen oder enden. Die Größe, mit der man magnetische Pole quantitativ beschreiben kann, ist die magnetische Polstärke oder magnetische Ladung Q_m . Sie ist das magnetische Analogon zur elektrischen Ladung, genauer: der gebundenen elektrischen Ladung, wie sie an der Oberfläche eines polarisierten Dielektrikums auftritt. Nun aber werden magnetische Ladungen in den meisten Lehrbüchern gar nicht eingeführt. Ohne sie ist es schwer, Dauermagneten quantitativ zu beschreiben. Bei einem Stabmagneten enden die Magnetisierungslinien an den Stirnflächen. Das heißt, dass hier die magnetische Ladung sitzt. Die Pole sind also die Stirnflächen des Magneten. Diese sind aber nicht identisch mit den Stellen, an denen Weicheisenspäne hängen bleiben. Diese hängen nämlich an denjenigen Stellen eines Dauermagneten, an denen die magnetische Feldstärke einen großen Wert hat. Wo die Feldlinien am

dichtesten sind, hängen die meisten Späne. Feldlinien treten nicht nur an den Polen aus, sondern auch an anderen Stellen, beim Stabmagneten an der Seite. Die Weicheisenspäne sind daher kein Indikator für Pole, sondern für hohe Feldstärken. Die Verwechslung der Orte hoher Feldstärke mit den Magnetpolen wird durch die rot-grüne Färbung gestützt.

Die magnetische Ladung oder magnetische Polstärke ist vielfach aus den Lehrbüchern verschwunden. Herrmann: „Die Ursache ist wahrscheinlich ein Missverständnis. In der Natur existieren keine magnetischen Monopole. Daraus wurde geschlossen, dass man eine Größe, mit der man solche Monopole beschreiben würde, nicht benutzen darf. Nun sind aber physikalische Größen nicht etwas, was man in der Natur vorfindet, sondern Konstruktion des Menschen.“ Dass die Einführung der magnetischen Ladung zweckmäßig wäre, sehe man schon daran, dass man ohne sie das Coulombsche Gesetz des Magnetismus nicht formulieren kann. Herrmann schlägt vor: Man führt die extensive Größe magnetische Ladung ein. Und formuliert den Lehrsatz: „Die Gesamtladung jedes Magneten ist gleich null.“

Die Gültigkeit kann mit einem schon von Maxwell vorgeschlagenen Experiment gezeigt werden: Ein kleiner Stabmagnet schwimmt – versehen mit Korkstückchen – im Wasser. Er dreht sich in Nord-Süd-Richtung, und zwar ohne eine Translationsbewegung auszuführen. Dass beim Durchbrechen eines Magneten neue Pole mit entgegengesetzt gleicher magnetischer Ladung entstehen, ist nur eine weitere Konsequenz dieses Lehrsatzes. Man zeigt, dass die Pole von Hufeisenmagneten die Stirnflächen sind, indem man zwei gleiche Magneten so aufeinander setzt, dass sich die Pole kompensieren. Das zusammen gesetzte Gebilde zieht keine größeren Eisenstücke mehr an.

1.6.7 Klarer sprachlicher Umgang, klare Kennzeichnung

Sätze wie „Das Feld ist der Zustand eines Raumes“ oder Formulierungen wie „Das Feld ordnet jedem Raumpunkt eine lokale Eigenschaft zu“ sind nach Herrmann (1990) zu vermeiden. Diese Aussagen wären zwar nicht falsch, aber wenig geeignet, vom Gegenstand der Betrachtung eine Anschauung zu erzeugen. Herrmann schlägt folgende Ausdrucksweise vor: „An den Polen eines Magneten hängt ein Magnetfeld. Zu den Polen hin wird es dichter. In größerer Entfernung von den Polen befindet sich gar nichts mehr davon.“ Dass man das Magnetfeld nicht sehen kann, sollte den Schülern keine Schwierigkeiten bereiten. Schließlich kann man Luft auch nicht sehen.

Man spricht heute sehr oft so, als würden elektrische und magnetische Kräfte auf Fernwirkungen beruhen (vergleiche Kapitel 1.5.1). „Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich

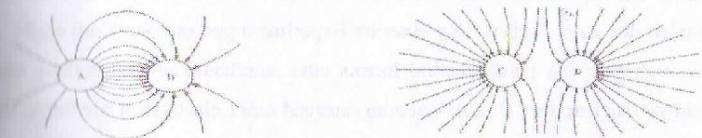
an.“ Solche Aussagen vermitteln die Auffassung, als existierten Wirkungen eines Körpers A auf einen entfernten Körper B, an denen kein weiteres System beteiligt ist, welches A und B miteinander verbindet und die Wirkung vermittelt. Eine solche Fernwirkungsbeschreibung stammt aus der Zeit Newtons. Schon dieser selbst hat die Annahme von Fernwirkungen als einen Mangel seiner Theorie angesehen!

Da diese Beschreibung fast jedem Schüler bekannt ist, übernehmen wir sie zunächst, ersetzen sie dann aber gleich durch eine Nahwirkungsformulierung. Die Anziehung und Abstoßung erklärt man dann etwa so: „Zwei Körper mit Ladungen gleichen Vorzeichens werden von ihrem Feld voneinander weg gedrückt, Körper mit Ladungen verschiedenen Vorzeichens werden zueinander hingezogen.“ Sobald im Unterricht Gravitations-, elektrische oder magnetische Kräfte zwischen zwei Körpern behandelt werden, wird also das entsprechende Feld als dritter Beteiligter eingeführt. Man beschreibt das Feld als genauso real existierendes Gebilde wie die beiden Körper. Herrmann: „Nimmt man das Feld ernst als ein real existierendes Gebilde, so kann man es sich vorstellen wie eine unsichtbare Stahlfeder, die an den wechselwirkenden Polen befestigt ist.“

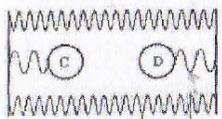
Elektrische Ladungen sind Start- oder Endpunkt von Feldlinien. Das elektrische Feld bewirkt auf eine Ladung eine Zugspannung. Herrmann (1989) rät zum Aufstellen folgender Regeln:

- 1) Das elektrische Feld zieht an elektrischen Ladungen.
- 2) Analog verhält es sich beim Magnetismus: Das magnetische Feld zieht an magnetischen Polen.
- 3) Das magnetische Feld zieht an elektrischen Strömen.

Beispiel: Um aus dem Feldlinien-Bild die Kraft auf einen geladenen Körper abzuleiten, müsse man die Feldliniendichte auf der Oberfläche des Körpers betrachten (siehe Abbildung). Das Feld zieht an A in alle Richtungen. Daher steht A unter mechanischer Spannung. Die Feldlinien liegen an der rechten Seite von A dichter zusammen als an der linken. Daher zieht das Feld mehr zur rechten Seite als zur linken. Man sage: „Das Feld von ungleichen Ladungen zieht die Ladungen zusammen, das Feld gleichnamiger Ladungen drückt die Ladungen auseinander.“ Analog: „Der Teil des Feldes links der Symmetrieebene drückt auf den Teil rechts davon.“



Schematische Darstellung durch ein System mit Federn: Die äußeren Federn stehen unter Druck, die inneren unter Zug:



Zur Farbgebung von Dauermagneten: Es ist üblich, die eine Hälfte des Stabmagneten rot, die andere grün zu kennzeichnen. Dies suggeriert, die rote Hälfte sei der eine Pol, die grüne der andere, oder auch, die Oberfläche des roten Teils sei der eine Pol und die grüne Oberfläche der andere. Tatsächlich befinden sich die Pole an den Stirnflächen des Magneten. Nur diese sollten also farbig gekennzeichnet sein.

1.7 Kapitelzusammenfassung

1.7.1 Feldbegriff

Der Feldbegriff ist für viele Schüler nur schwer zu verstehen. Dies hat für Friedrich Herrmann, der sich im Rahmen des Karlsruher Physikkurses um eine Neuordnung der Physik bemüht, vor allem historische Gründe. Für Faraday und Maxwell war Raum ohne Äther nicht vorstellbar. Ein Feld war ein angeregter Zustand dieses Äthers, also ein Konzept, das keine hohen Ansprüche an das Abstraktionsvermögen stellte. Die (vermeintliche) Verbannung des Äthers aus der Physik entzog dem Feld allerdings seine begriffliche Grundlage. „Vorher war das Feld ein besonderer Zustand des Äthers, nun wurde er zu einem besonderen Zustand von etwas, das nicht existiert.“

Um diese Altlast zu beseitigen, empfiehlt Herrmann, den Feldbegriff in der Schule als physikalisches System einzuführen. Wie andere „materielle“ Systeme auch haben Felder unter anderem Energie bzw. Druck. Staraschek geht sogar noch einen Schritt weiter und rät zur Verwendung des Begriffs „Feldstoff“, weiß aber auch „dass dies der schulphysikalischen Lehrmeinung eigentlich widerspricht“.

Hochschul-Lehrbücher unserer Tage tendieren nämlich zur Auffassung, dass ein elektrisches Feld weniger etwas Dinghaftes ist, als vielmehr einen Faktor in einer Gleichung beschreibt, der mit etwas anderem multipliziert den numerischen Wert einer im Experiment gemessenen Kraft ergibt.

- „Alle Versuche, sich über ein Feldlinienbild hinaus eine ‚anschauliche‘ Vorstellung vom elektrischen Feld zu machen, es z.B. als Spannungszustand eines elastischen Mediums, des ‚Äthers‘, darzustellen, sind gescheitert. Man sollte daher hinter dem Feldbegriff nichts

anderes suchen als er ist, nämlich ein bequemes Darstellungsmittel für die Kräfte, die auf Ladungen wirken.“ (Gerthsen Physik, S. 296 f.).

- „Da elektrische Felder zweckmäßig und brauchbar sind, ist es unwesentlich, was sie wirklich sind.“ (Berkeley Physik Kurs 2, S 11).

1.7.2 Schülervorstellungen

Die Literatur berichtet im Zusammenhang mit dem Feldbegriff unter anderen von folgenden Schülervorstellungen:

- „Ein Feld besteht aus Feldlinien.“ Es wird nicht zwischen Darstellungsmitteln und Darzustellendem unterschieden. Feldlinien sind nach dieser Vorstellung bereits das Feld.
- Häufige Verwechslung des elektrischen mit dem magnetischen Feld.
- Schüler glauben oft an plötzliche, augenblickliche Fernwirkungen. Solche Ideen stammen aus vorfaradayscher Zeit, in der man Wechselwirkungen als Fernwirkungen beschrieben hat.
- Fernwirkung benötigt eine Verbindung der wechselwirkenden Objekte (Stichwort: Kraft wird durch Berührung übertragen) bzw. einen Überträger (Medium, eine andere Kraft, ...).
- Zwischen den Größen E und F wird oft nicht unterschieden.
- Elektrische Felder gibt es nur dann, wenn Ladungen beweglich sind bzw. ausgesendet werden können.
- Viele Schüler stellen sich Felder analog zu greifbaren Dingen der Alltagswelt vor.