

---

## Felder als physikalische Systeme<sup>1</sup>

Verfasser: Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Institut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, Kaiserstraße 12, 7500 Karlsruhe

*Das Feld erscheint im üblichen Unterricht als etwas Schwieriges, Abstraktes. Es soll hier gezeigt werden, daß das nicht so sein muß. Zuerst wird untersucht, woher die Schwierigkeiten bei der Bildung einer Anschauung vom Feld kommen. Dazu werden zunächst einige Betrachtungen zur Geschichte unserer anschaulichen Vorstellungen vom Feld dargestellt, und es wird gezeigt, daß, wenn man die Ergebnisse der modernen Feldtheorie berücksichtigt, sich eine sehr einfache, elementare Vorstellung vom Feld ergibt. Anschließend werden die Konsequenzen für den Unterricht diskutiert.*

### 1 Zur Geschichte der Vorstellungen vom Feld

Das elektromagnetische Feld, und damit das erste Feld überhaupt, wurde erfunden oder entdeckt von FARADAY. Mathematisch beschrieben wurde es von MAXWELL. Zu MAXWELLS Zeit, d. h. in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts, war man fest davon überzeugt, daß der ganze Raum von einem elastischen Medium erfüllt sei, dem Äther, und daß das Licht eine mechanische Welle in diesem Medium sei. Nach FARADAY und MAXWELL waren nun auch das elektrische und das magnetische Feld besondere Zustände dieses Mediums. Wie ernst man den Äther nahm, und für wie wichtig man seine Erforschung hielt, geht zum Beispiel aus dem allerletzten Satz von MAXWELLS Hauptwerk »Elektrizität und Magnetismus« [1] hervor:

*»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.«*

<sup>1</sup> Verkürzte Fassung eines Vortrages auf der 80. Hauptversammlung des Deutschen Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts 1989 in Darmstadt.

HEINRICH HERTZ äußert sich in seinem berühmten Vortrag »Licht und Elektrizität« bei der Versammlung der Deutschen Naturforscher und Ärzte 1889 in Heidelberg in ähnlicher Weise [2]. Er vergleicht den Forscher mit einem Wanderer im Gebirge, und sagt, der Gipfel sei für ihn:

*». . . die gewaltige Hauptfrage nach dem Wesen, nach den Eigenschaften des raumerfüllenden Mittels, des Äthers, nach seiner Struktur, seiner Ruhe oder Bewegung, seiner Unendlichkeit oder Begrenztheit.«*

Wir zitieren nun MAXWELL noch einmal, und zwar um zu zeigen, welche Vorstellung vom Feld er seinen Lesern zu vermitteln versucht [3]:

*»Man bezeichnet den Raum in der Umgebung eines elektrisierten Körpers, insofern sich in demselben die elektrischen Phänomene abspielen, als Electricisches Feld.«*

Der Inhalt dieses Satzes war nun seinerzeit völlig klar und leicht zu verstehen. Man muß dabei nur im Auge behalten, daß der »Raum« für MAXWELL, genauso wie für viele seiner Zeitgenossen, von jenem Medium erfüllt war. »Raum« war also gar nichts anderes als dieses Medium, als Äther. Wir können die Maxwellsche Feldvorstellung auch so beschreiben: Der Äther ist in der Umgebung elektrisch geladener Körper verändert, und diesen veränderten Äther nennt man Feld. »Feld« bedeutet, daß sich der Äther in einem gegenüber dem Normalzustand veränderten Zustand befin-

det. Da man aber vom Äther eine sehr konkrete Anschauung hatte, war auch das Feld etwas sehr Konkretes.

Die Probleme mit der Anschauung vom Feld kamen erst später, nämlich als im Zusammenhang mit der speziellen Relativitätstheorie der Träger des Feldes, der Äther, aus der Physik verbannt wurde. Dieses Ereignis ließ die Maxwellsche Theorie merkwürdigerweise unberührt. Es zeigte sich, daß sie für ihre Felder gar keinen Träger braucht. Man warf daher den Äther aus den Physikbüchern heraus. Dabei passierte nun etwas Bemerkenswertes. An dem Inhalt und Sinn des oben zitierten Satzes, in dem MAXWELL erklärt, was wir uns unter einem elektrischen Feld vorstellen sollen, schien niemand zu zweifeln. Zu Recht, könnte man oberflächlicher Weise argumentieren: der Satz enthält ja das Wort Äther nicht. Nun er enthält nicht das Wort; seine ursprünglich leichte Verständlichkeit beruht aber auf der Existenz des Äthers.

Läßt man ihn stehen, so wird das Feld ein sehr abstrakter, ja fast widersprüchlicher Begriff: die Veränderung eines leeren Raumbereichs. Nach MAXWELL charakterisiert das Feld eine Veränderung des Äthers. Nun ist der Äther weg. Die Veränderung soll aber bleiben? So stellte sich die Sache dar. Und so erscheint sie auch heute noch in unseren Lehrbüchern: wörtlich oder sinngemäß noch die alte Maxwellsche Aussage. Hier ein paar Beispiele:

»Die Ladung setzt den umgebenden Raum in einen Spannungszustand, der elektrostatisches Feld genannt wird.« [4]

»Das elektrische Feld ordnet jedem Punkt im Raum eine lokale Eigenschaft zu.« [5]

»Den Raum zwischen diesen beiden Körpern, das Gebiet der Feldlinien, nennen wir ein elektrisches Feld.« [6]

»Das magnetische Feld ist der Wirkungsbereich eines Magneten; dort wirkt er auf ferromagnetische Körper. Magnetfelder gibt es auch im Vakuum.« [7]

Man beachte, daß in jeder dieser Beschreibungen das Wort Raum oder Bereich wesentlich ist. Unter »Raum« stellt sich aber der Lernende »leeren Raum« vor, »nichts« sozusagen. Und dieses Nichts soll nun Eigenschaften haben, sich in einem Spannungszustand befinden.

Manchmal wird das Unbehagen des Autors beim Schreiben solcher Sätze deutlich. So wird im Hochschul-Grimsehl die Existenz der Faradayschen Spannungen begründet, und man kommt zu dem Schluß:

»Es ist im elektrischen Feld in Richtung der Kraftlinien ein Zug, quer zu ihnen ein Druck vorhanden.« [8]

Die Überschrift zu dem entsprechenden Abschnitt lautet aber »Die fiktiven Spannungen der Kraftlinien«. Was soll sich der Student dabei denken? Existieren diese Spannungen oder existieren sie nicht? Zu FARADAYS und MAXWELLS Zeit waren sie jedenfalls noch ganz real.

Man kann nun den Lernenden an diese Sprechweise gewöhnen. Man wird ihn aber sicher nicht dazu bringen, sich auf Grund solcher Sätze eine klare Anschauung vom Feld zu bilden.

Das Merkwürdige an der Geschichte ist nun, daß diese begrifflichen Schwierigkeiten gar nicht hätten entstehen müssen; denn kurz nachdem der Äther aus der Physik hinausgeworfen worden war, tauchte ein Feldbegriff auf, der dem Maxwellschen an Anschaulichkeit nicht nur ebenbürtig, sondern sogar überlegen war. Leider hat dieser den Weg in die Lehrbücher bis heute nicht gefunden.

Bevor wir zur Darstellung der modernen Auffassung vom Feld kommen, ist noch eine Begriffsklärung nötig: Das Wort »Feld« wird in der Physik in zwei deutlich voneinander unterscheidbaren Bedeutungen benutzt [9]; einmal, um die Ver-

teilung der Werte einer physikalischen Größe im Raum zu beschreiben. So spricht man von einem Temperatur-, einem Druck-, einem Dichte- oder einem Kraftfeld: Jedem Punkt im Raum ist ein Temperaturwert, ein Druckwert, ein Dichtewert oder ein Kraftvektor zugeordnet.

Die zweite Bedeutung hat sich von der ersten erst mit dem Entstehen der modernen Feldtheorie abgehoben. Man bezeichnet nämlich mit dem Wort Feld heutzutage auch eine bestimmte Klasse physikalischer Systeme. Es ist der Name für diese Systeme, genauso wie etwa Körper, starrer Körper, ideales Glas, reibungsfreie Flüssigkeit Namen von Systemen sind. Es gibt mehrere Systeme, die in die Klasse der Felder gehören. Die bekanntesten sind das elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld.

Daß hier ein und dasselbe Wort in zwei Bedeutungen benutzt wird, ist bedauerlich, zumal die beiden Bedeutungen recht nahe beieinander liegen, so daß oft ein begriffliches Durcheinander entsteht. Was ist zum Beispiel gemeint, wenn ein Autor schreibt, zwischen den Platten eines Kondensators befinde sich ein Feld  $E$ ? Will er damit nur die räumliche Verteilung der Feldstärke  $E$  ansprechen, oder meint er das System »elektromagnetisches Feld«, das sich zwischen den Platten befindet? Wir schlagen vor, das Wort Feld nur im physikalischen Sinn zu benutzen, d. h. nur als Name eines Systems. Die Größe  $E$  nennen wir die Feldstärke, und wenn wir eine Aussage über die Funktion  $E(x, y, z)$  machen wollen, sprechen wir von einer Feldstärkeverteilung.

Wie kommt nun die moderne Physik zu der Auffassung, daß das Feld ein eigenständiges physikalisches System sei? Sie kommt dazu, weil das Feld genau diejenigen Anforderungen erfüllt, die man an ein physikalisches System stellt. Man nennt ein Gebilde ein physikalisches System, wenn es beschreibbar ist durch Variablen, genauer, durch die bekannten Variablen, die sich in der Physik bewährt haben. Beschreibbar heißt: Diese Variablen haben in bestimmten Zuständen des Gebildes bestimmte Werte, und diese Werte hängen durch bestimmte Beziehungen miteinander zusammen [10]. Der Zusammenhang zwischen den Werten ist für jedes System ein anderer, er ist für ein bestimmtes System charakteristisch.

Diese Tatsachen sind es, die uns dazu veranlassen, uns etwa von dem System »ideales Gas« eine sehr konkrete Anschauung zu bilden, und sie sollten uns ebenso dazu veranlassen, uns von Feldern konkrete Anschauungen zu bilden.

Daß für ein Feld, etwa das elektromagnetische, die verschiedenen physikalischen Standardvariablen bestimmte Werte haben und daß zwischen diesen bestimmte Beziehungen gelten, sei noch einmal in Erinnerung gebracht.

Genauso wie ein materielles System, wie Luft oder wie Wasser zum Beispiel, hat auch das elektromagnetische Feld Energie und eine Energiedichte. Genauso wie ein fester Körper steht es unter mechanischer Spannung. Genauso wie andere Systeme kann sich auch das elektromagnetische Feld in verschiedenen Zuständen befinden: Seine Variablen haben in den verschiedenen Zuständen verschiedene Werte. In manchen seiner Zustände hat das elektromagnetische Feld einen von Null verschiedenen Impuls, in anderen ist der Impuls Null. In manchen Zuständen hat es eine von Null verschiedene Entropie, in anderen ist die Entropie Null. In manchen Zuständen hat die Temperatur des Feldes einen bestimmten Wert – man nennt diese Zustände »thermische Strahlung« – genauso wie materielle Systeme in manchen ihrer Zustände eine bestimmte Temperatur haben.

Was hat es nun aber mit der Größe Feldstärke auf sich? Dies ist ja eine Größe, die andere Systeme nicht haben. Nun,

tatsächlich ist etwa die elektrische Feldstärke eine Größe, die eigens zur Beschreibung des elektrischen Feldes gebildet wurde. Sie hat den Vorteil, daß man für bestimmte Zustände des Feldes die Werte aller anderen Größen aus ihr berechnen kann; und darum ist sie so beliebt. Aber Achtung: Nur für bestimmte Zustände hat sie diese schöne Eigenschaft, nämlich für diejenigen Zustände, die man gewöhnlich in der Elektrodynamik betrachtet. Zur Beschreibung etwa von thermischer Strahlung ist sie ungeeignet. Sie hat übrigens ein Analogon bei materiellen Systemen: die Psi-Funktion. Auch aus der Psi-Funktion kann man in bestimmten Fällen die Werte aller anderen Größen bestimmen.

Wir können also zusammenfassen: Felder sind genauso reale physikalische Systeme wie materielle Systeme, und wir können uns von Feldern mit demselben Recht eine konkrete Anschauung bilden, wie wir es von materiellen Systemen gewohnt sind.

## 2 Konsequenzen für den Unterricht

Das erste Feld, über das im Unterricht ausführlich gesprochen wird, ist das magnetische Feld. Wir erläutern daher auch die Konsequenzen aus dem bisher Gesagten am Beispiel des magnetischen Feldes.

Eine wichtige Konsequenz betrifft den sprachlichen Umgang mit dem Feldbegriff. Selbstverständlich werden wir nicht Sätze verwenden wie »das Feld ist der Zustand des Raums, etc.«; schließlich sagen wir auch nicht »Luft ist der Zustand des Raums, etc.« oder der Formulierung im Berkeley-Kurs entsprechend: »Die Luft ordnet jedem Raumpunkt eine lokale Eigenschaft zu.« Solche Aussagen sind zwar nicht falsch. Sie sind aber ungeeignet, von dem Gegenstand der Betrachtung eine Anschauung zu erzeugen.

Wie gehen wir sprachlich mit dem Wort Luft um? Wir sagen etwa: »hier ist Luft«, oder »hier befindet sich Luft«. Und wir sagen, über der Erdoberfläche werde die Luft nach oben hin dünner und nach unten hin dichter. Genauso werden wir nun in unserem Unterricht auch vom Magnetfeld sprechen. Wir sagen: »An den Polen eines Magneten hängt Magnetfeld. Zu den Polen hin wird es dichter und in größerer Entfernung von den Polen befindet sich fast gar nichts mehr davon«. Daß man das Magnetfeld nicht sehen kann, hat übrigens in unserem Unterricht nie Schwierigkeiten bereitet – Luft kann man schließlich auch nicht sehen.

Die zweite Folgerung für den Unterricht, die wir empfehlen, ist gar nicht an die moderne Feldauffassung gebunden. Man hätte sie schon zu FARADAYS Zeiten ziehen können. Man spricht noch heute sehr oft so, als beruhten elektrische und magnetische Kräfte auf Fernwirkungen. So sagt man:

»Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an«, oder: »Fließen in zwei parallelen Drähten elektrische Ströme in dieselbe Richtung, so ziehen sich die Drähte an« etc.

Dies ist vorfaradaysche Sprechweise, und diese Sprechweise fördert vorfaradaysche, d. h. Newtonsche, fernwirkungstheoretische Anschauungen, Anschauungen der Naturwissenschaft des 18. Jahrhunderts.

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, und man kann etwa formulieren: »Gleichnamige Pole werden durch ihr Magnetfeld voneinanderweggedrückt, ungleichnamige werden zueinanderhin gezogen.« Oder: »Parallele Drähte, in denen ein elektrischer Strom in dieselbe Richtung fließt, werden durch ihr Magnetfeld zueinanderhin gezogen.

## Literatur

- [1] J. C. MAXWELL: Elektrizität und Magnetismus. Zweiter Band. S. 607. – Berlin: Verlag von Julius Springer 1883
- [2] A. HERMANN: »Heinrich Hertz als Physiker und Philosoph« in *Fridericiana*. – Zeitschrift der Universität Karlsruhe, Heft 42, S. 3 (1988).
- [3] J. C. MAXWELL: Elektrizität und Magnetismus. Erster Band. S. 47. – Berlin: Verlag von Julius Springer 1883.
- [4] C. GERTHSEN – H. O. KNESER – H. VOGEL: Physik. 13. Auflage. S. 212. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1977.
- [5] E. M. PURCELL: Elektrizität und Magnetismus. Berkeley Physik Kurs 2. S. 11. – Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn 1976.
- [6] R. W. POHL: Elektrizitätslehre. 21. Auflage. S. 16. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1975.
- [7] F. DORN – F. BADER: Physik – Mittelstufe. S. 264. – Hannover: Hermann Schroedel 1980.
- [8] GRIMSEHL: Lehrbuch der Physik. Zweiter Band. S. 19. – Leipzig: B. G. Teubner 1959.
- [9] G. FALK – W. RUPPEL: Mechanik, Relativität, Gravitation. S. 133 ff. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1973.
- [10] G. FALK: Theoretische Physik. S. 5 ff. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1968. □