

Faradays Feldkonzept und Hans Christian Oersted

Zum 200. Geburtstag von Michael Faraday

Faradays Lebenswerk

Vor 200 Jahren erblickte Michael Faraday das Licht der Welt, für die Naturwissenschaften sollte dies von besonderer Bedeutung werden. Von ihm wurde die Grundlage für viele Möglichkeiten und Formen unserer heutigen Kultur und Zivilisation geschaffen, Grund genug, sich sein Lebenswerk, wenn auch nur in einer Zeittafel (s. nächste Seite), vor Augen zu führen [1, 2].

Die Originalität, Vielseitigkeit und intellektuelle Kraft dieses Naturforschers setzt einen Leser seiner Arbeiten immer wieder in Erstaunen. Am nachhaltigsten haben Faradays Feldvorstellungen den weiteren Gang physikalischer Forschung beeinflusst. Wie Faraday zu seinen damals so fremd anmutenden Ideen kam, ist in der Wissenschaftsgeschichte großenteils noch eine offene Frage. Im folgenden wollen wir versuchen, hierauf eine Antwort zu geben [3, 4, 6].

Elektromagnetismus und die neue Denkweise

Faradays Debut als Physiker war die Auseinandersetzung mit Oersteds sensationeller Entdeckung des Elektromagnetismus (1820) – und dieses Phänomen mag seine Denkweise besonders geprägt haben [10]. Hierbei kam er auch in direkte Berührung mit der deutschen romantischen Naturphilosophie, denn Oersted zählte zu den Physikern, die die Ideen jener Zeitströmung aufnahmen. In den ersten drei Jahr-

Der 200. Jahrestag der Geburt von Michael Faraday ist ein willkommener Anlaß, die wissenschaftlichen Großtaten dieses Naturforschers, von denen wir alltäglich profitieren, ins Gedächtnis zurückzurufen. Faraday ist der Schöpfer der Feldvorstellungen, also einer der Grundkategorien unseres heutigen physikalischen Weltbildes. Faradays Gedankenwelt wurde maßgeblich von der romantischen Naturphilosophie beeinflusst. Dies ist von Physikhistorikern im Hinblick auf seine Vorarbeit zum Energieprinzip bzw. der Umwandlung von „Kräften“ des öfteren gewürdigt worden. Dagegen blieb die Entstehung der Feldvorstellungen im Zusammenhang mit jener philosophischen Strömung bisher wenig beachtet. Gerade dies steht im Mittelpunkt des folgenden Artikels. Auf uns Heutige wirkt die Gedankenwelt von Faraday und Oersted ungewohnt, ja fremdartig.

zehnten des 19. Jh. übte Schelling mit seiner Naturphilosophie in Deutschland großen Einfluß aus; auch die Naturwissenschaften wurden z. T. in diesen Strudel mit hineingezogen [5]. Die Naturphilosophen glaubten, für die Wissenschaft einen Königsweg gefunden zu haben und Naturgesetze durch reine Überlegungen und Spekulationen ohne Empirie herleiten zu können. Für die Wissenschaftsgeschichte ist diese Periode im allgemeinen kein erfreuliches Kapitel. Einige bedeutende Köpfe wie J. W. Ritter und H. Chr. Oersted verstanden es dennoch, echte Naturforschung mit dieser Zeitströmung zu verschmelzen, und die bald überlebte Bewegung hinterließ bei manchen großen Geistern doch ihre unverkennbaren Spuren: die einheitliche Sicht physikalischer und chemischer Phänomene, die Umwandelbarkeit verschiedener „Kraftformen“, wie chemische Bindungskraft, Elektrizität, Magnetismus, Wärme und Licht, und die Überzeugung von einer Gipfelung der Naturgesetzlichkeit.

Die Einfachheit der Oerstedschen Versuchsanordnung – galvanische Batterie, Leitungsdraht, Magnetnadel – verblüffte damals die Physiker; es war das Ei des Kolumbus. Das Verhalten der Magnetnadel signalisierte allerdings etwas ganz Neues, das im Widerspruch zu den damaligen physikalischen Anschauungen und Theorien stand. Noch bis in die Mitte des vergangenen Jahrhunderts galt das Newtonsche Gravitationsgesetz als Vorbild für ein Elementargesetz, für ein letztes Erkenntnisprinzip. Hier lag aber die Kraft

nicht in der Verbindungsgeraden von Zentren, sondern folgte Kreisen um den Schließungsdraht. Das Newtonsche Gesetz kam ohne Zwischenmedium aus und postulierte eine unendlich große Ausbreitungsgeschwindigkeit. In seinem Rundbrief (zur Anzeige seiner Entdeckung von 1820) beschrieb Oersted den Raum um den Leiter als ganz von Kräften erfüllt. Wenn er dabei von einem „elektrischen Konflikt“ sprach, der spiralförmig um den Draht verläuft und auf die Pole der Magnetnadel wirkt, gebraucht er einen gängigen Terminus aus dem Begriffsschatz der romantischen Naturphilosophie. „Konflikt“ ist gleichbedeutend mit dem Widerspiel oder dem Wechselkampf von Kräften oder Tätigkeiten im Raum. Es war ein erster Schritt hin zur Nahwirkung.

Um Ordnung in die Flut der Arbeiten zu bringen, die sich mit dem neuen Phänomen befaßten, sichtet Faraday das ganze Material kritisch und prüfte alle Versuche nach. In seinem „Historical Sketch of Electro-Magnetism“, der 35 Seiten umfaßt, legte er das Ergebnis seiner Studie in den „Annals of Philosophy“ 1821 und 1822 nieder [7]. Faradays Urteil über Oersted fällt darin recht günstig aus. Im Gegensatz zu manchem seiner Kollegen sieht er die Entdeckung nicht als Zufall, sondern als Frucht eines wohlgedachten Plans an. Aus dem „Historical Sketch“ geht hervor, daß Faraday auch frühere Werke von Oersted durchgearbeitet hat, insbesondere das 1812 verfaßte Büchlein „Ansicht der chemischen Naturgesetze“ [9], allerdings in der französi-

Dr. rer. nat. habil. Karl Heinrich Wiederkehr, Birkenau 24, W-2000 Hamburg 76.

Michael Faraday

| | |
|----------------|---|
| 22. Sept. 1791 | in Newington Butts, Surrey, als Sohn eines Dorfschmieds geboren |
| 1813 | erhält der gelernte Buchbinder eine Stelle als Laborgehilfe bei Humphry Davy in der Royal Institution. Als dessen Begleiter wissenschaftliche Reise durch Europa |
| 1816 | erste wissenschaftliche Veröffentlichung über den Ätzkalk |
| 1821 u. 1822 | Historical Sketch of Electro-Magnetism. Demonstration elektromagnetischer Rotationen (Magnetpol kreist um stromdurchflossenen Leiter und Leiter um Magnetpol). Erste Demonstration magnetischer Kraftlinien („magnetischer Kurven“) |
| 1823 | Verflüssigung von Chlorgas |
| 1824 | Mitglied der Royal Society |
| 1825 | Entdeckung des Benzols Direktor der Royal Institution |
| 1831 | Entdeckung der elektromagnetischen Induktion, Deutung mit dem Schneiden magnetischer Feldlinien |
| 1833 | Grundgesetze der Elektrolyse. Einführung der Begriffe Kathode, Anode, Ion. Voltameter. Erste Ansätze zu den elektrischen Feldlinien |
| 1837 | Untersuchungen der Dielektrika. Entwicklung des Begriffs der elektrischen Feldlinien. |
| 1845 | Magneto-optischer Effekt (Faraday-Effekt), Drehung der Polarisationsebene des Lichts. Entdeckung des Diamagnetismus. Untersuchungen aller Materie auf magnetische Eigenschaften |
| 1850 | Entdeckung des Paramagnetismus von Sauerstoff mit Hilfe der Differentialwaage. Einführung einer Art Leitfähigkeit für magnetische Kraftlinien. |
| 1852 u. später | Spekulationen über die letzte Realität magnetischer Kraftlinien |
| 25. Aug. 1867 | gestorben in Hampton-Court (London) |



Michael Faraday als junger Mann. (Aus L. Pearce Williams: Michael Faraday, A Biography)

sehen Fassung mit dem Titel „Recherches sur l'identité des forces chimiques et électriques“ (1813). Th. Thomson hatte gerade im Jahr zuvor (1819) in seinem Journal, den „Annals of Philosophy“, über das Oerstedtsche Büchlein auf 13 Seiten referiert und es mit den Worten empfohlen [8]: „The book is highly worthy the perusal of all those British chemists who aim at the improvement and the perfection of their science.“

In seiner „Ansicht“ wollte Oersted die chemischen Elemente, Verbindungen und Reaktionen nach neuen, in der Elektrochemie gerade gewonnenen Gesichtspunkten ordnen [10]. Aber auch romantisch-naturphilosophisches Gedankengut eines F. W. Schelling und J. W. Ritter floß hier mit ein. Im Gegensatz zu Ritter, bei dem richtungsweisende experimentelle Ergebnisse von wilden Spekulationen überwuchert wurden, überschritt Oersted bei all seinen gewagten Hypothesen nie die Grenzen ernstzunehmender Naturforschung. Von naturphilosophischen Ideen fasziniert, war Oersted ein entschiedener Dynamiker oder „Dynamist“. Atome, Teilchen von vorgegebener Form und Größe, und das Vakuum lehnte er ab. Die Dynamiker beriefen sich auf Kant, wenn sie auch davon überzeugt waren,

daß dessen These von zwei Kräften (einer abstoßenden und einer anziehenden) nicht ausreichte. Sie sahen die Materie als Kontinuum, bestehend aus mehr oder weniger konzentrierten und sich wandelnden Tätigkeiten. Für den Atomisten war der Kosmos ein Mechanismus, der wie eine komplizierte Uhr abließ. Dem Dynamisten dagegen war die Welt ein riesiger Organismus. Zwischen Anorganischem und Organischem bestand kein prinzipieller, nur ein gradueller Unterschied, nämlich in der Potenzierung der wenigen Grundkräfte, die aber alle aus einer Urkraft hervorgegangen sein sollen. Ein Leitmotiv der romantischen Physiker war die Dualität, die sich bei Lebewesen in der Zweigeschlechtlichkeit äußert. Für Dualität kann bei ihnen auch Polarität, Differenz und Heterogenität stehen. Homogenes kann in Heterogenes übergehen. Dabei braucht die Trennung noch nicht vollzogen, sondern nur in der Tendenz vorhanden zu sein, was einem Spannungs- und Gleichgewichtszustand entspricht. Es kann aber auch zu einem „dynamischen Prozeß“ kommen, zu neuen Kombinationen der Kräfte – ein Beispiel dafür ist die elektrolytische Zersetzung eines Stoffes –, und solche dynamischen Prozesse sollen bis in physiologische und psychische Bereiche hineingehen können.



Hans Christian Oersted. (Aus H. Wußing (Hrsg.): Geschichte der Naturwissenschaften. Aulisverlag Deubner, Leipzig 1983)

Oersted hatte bei der Deutung der Magnetenablenkung zwischen elektrischen und magnetischen Kräften nicht unterschieden. Dem konnte Faraday nicht zustimmen, wenn er auch die kreisförmigen Wirkungssphären übernahm. In seinem „Historical Sketch“ mußte sich Faraday aber auch mit einem anderen Naturforscher auseinandersetzen, nämlich mit André-Marie Ampère. Der geniale Franzose hatte in verblüffend kurzer Zeit bahnbrechende Entdeckungen auf dem Gebiet des Elektromagnetismus gemacht. Er fand die Äquivalenz von stromdurchflossener Spule und Stabmagnet und wollte alle magnetischen Erscheinungen auf fließende Elektrizität zurückführen, man denke nur an seine Hypothese der Molekularströme. 1822 gab Ampère eine erste Formulierung seines Elektrodynamischen Fundamentalgesetzes, das die Kraftwirkungen stromdurchflossener Leiter aufeinander mit Hilfe von Stromelementen erfaßte und sich dabei an das Newtonsche Vorbild hielt. Faraday widersprach der Ampèreschen Auffassung, er schritt auf dem von Oersted gewiesenen Weg weiter. Mit seinen elektromagnetischen Rotationsapparaten demonstrierte er die in Kreisen verlaufenden Kräfte mit Hilfe eines Magnetpols, der um ein stromdurchflossenes

Leiterstück rotierte. Auch mit Ampères elektrischem Doppelstrom in dem Leitungsdraht kann er sich nicht befreunden und scheute sich, wie auch Oersted, die Elektrizität als Substanz (wenn auch imponderabel) zu behandeln.

Die Anziehungen und Abstoßungen stromdurchflossener Leiter deutete Faraday als magnetische Wirkungen. Die magnetischen Kräfte und Wirkungslinien – es sind dies die magnetischen Feldlinien – ließ er mit der Bahn eines Magnetpols nachzeichnen. Experimentell wurde dies durch einen Stabmagnet verwirklicht, der in Quecksilber schwamm und dessen unteres Ende beschwert war. Einander entgegenlaufende Linien können sich „neutralisieren“, d. h. die Kräfte heben sich hier auf, und gleichlaufende Bahnen haben eine Verstärkung der Kräfte (Zunahme der Geschwindigkeit des Magnetpols) zur Folge. Faraday benutzte auch eine schwimmende Magnetenadel, die sich tangential zu den Kurven einstellte und sich im inhomogenen Feld fortbewegte. Zuletzt nahm er Eisenfeilspäne, die im Kraftfeld zu Dipolen wurden und ihm die Verteilung der Kraft vor Augen führten. Zur Erzeugung sog. „magnetischer Kurven“ hatte man Eisenfeilicht schon vorher benutzt.

EXPERIMENTA CIRCA EFFECTUM CONFLICTUS ELECTRICI IN ACUM MAGNETICAM.

Prima experimenta circa rem, quam illustrare aggredior, in scholis de Electricitate, Galvanismo et Magnetismo proxime superiori hieme a me habitis instituta sunt. His experimentis monstrari videbatur, acum magneticam ope apparatus galvanici esse sita moveri; idque circulo galvanico cluso, non aperto, ut frustra tentaverunt aliquot abhinc annis physici quidam celeberrimi. Cum autem haec experimenta apparatus minus efficaci instituta essent, ideoque phaenomena edita pro rei gravitate non satis calculata viderentur, socium adscivi amicis Esmarech, regi a consiliis justitiae, ut experimenta cum magno apparatu galvanico, a nobis conjunctim instructo, repeterentur et auferentur. Etiam vir egregius Wleugel, eques auratus ord. Dan. et apud nos praefectus rei gubernatoris, experimentis interfuit, nobis socius et testis. Praeterea testes fuerunt horum experimentorum vir excellentissimus et a rege summis honoribus decoratus Hauch, cujus in rebus naturalibus scientia jam diu inclavit, vir acutissimus Reinhardt, Historiae naturalis Professor, vir in experimentis instituendis sagacissimus Jacobsen, Medicinæ Professor, et Chemicus experientissimus Zeise, Philosophiae Doctor. Saepius equidem solus experimenta circa materiam propositam institui, quae autem ita mihi contigit detegere phaenomena, in conventu horum virorum doctissimorum repetiri.

In experimentis recensendis omnia praeteribo, quae ad rationem rei invenientiam quidem conduxerunt, hac autem inventa rem amplius illustrare nequeunt; in eis igitur, quae rei rationem perspicue demonstrant, acquiescamus.

Apparatus galvanicus, quo usus sumus, constat viginti receptaculis cupreis rectangularibus, quorum et longitudo et altitudo duodecim aequaliter est pollicum, latitudo autem duos pollices et dimidium vix excedit. Quodvis receptaculum duabus laminis cupreis instructum est ita inclinatis, ut baculum cupreum, qui laminam zinceam in aqua receptaculi proximi sustentat, portare possint. Aqua-receptaculorum $\frac{1}{4}$ sui ponderis acidi sulphurici et pariter $\frac{1}{4}$ acidi nitrici continet. Pars cujusque laminæ Zincæ in aqua submersa Quadratum est, cujus latus circiter longitudinem 10 pollicum habet. Etiam apparatus minores adhiberi possunt, si modo filum metallicum candescere valeant.

Erste Seite des Oersted'schen Rundbriefs über die Entdeckung des Elektromagnetismus, datiert vom 21. Juli 1820. Titelübersetzung: Experimente über die Wirkung des elektrischen Konflikts auf die Magnetenadel.

Entdeckung der elektromagnetischen Induktion

Eintragungen in seinem Labortagebuch, dem „Diary“, und in seinem Notizbuch, das als „Chemical Notes, Hints, Suggestions and Objects of Pursuit“ betitelt ist, zeigen uns, wie sehr Faraday das Problem der Umwandlung verschiedener Naturkräfte beschäftigte, insbesondere die Umwandlung in umgekehrter Richtung wie beim Elektromagnetismus. Ritter hatte schon in den ersten Jahren des vergangenen Jahrhunderts geglaubt, die Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität mit seiner „magnetischen Batterie“ in den Händen zu halten [12]. Die „Batterie“ bestand aus magnetisierten Eisendrahtstückchen, deren Enden in eine leitende Flüssigkeit eingetaucht und die hintereinandergeschaltet waren. Die beiden magnetischen Pole sollten unterschiedliche Oxidierbarkeit besitzen und so eine Art galvanisches Element bilden. In Paris untersuchten Fresnel und Lehot derartige Anordnungen, kamen aber zu dem Schluß, daß keinerlei Wirkungen nachgewiesen werden konnten. Im „Historical Sketch“ bemerkte Faraday hierzu: „... denn da Elektrizität Magnetismus erregt, nahm man an, daß auch Magnetismus Elektrizität erregen könne.“

Um „Magnetismus in Elektrizität zu verwandeln“, machte Faraday zwei vergebliche Anläufe, den ersten im November 1825, den zweiten im April 1828. Das eine Mal war die magnetische Kopplung zu schwach, das andere Mal das Meßgerät zu unempfindlich [13]. Beim dritten Anlauf am 29. August 1831 hatte er endlich Erfolg; auf einen Ring aus Schmiedeeisen hatte er eine Primär- und eine Sekundärspule gewickelt. Aber nur beim Ein- und Ausschalten des Stromes in der Primärspule schlug das Nadelgalvanometer im Sekundärkreis aus. Vielleicht kam Faraday auf diese Versuchsanordnung mit dem Eisenring durch die kreisförmigen magnetischen Kraftlinien um einen Leiter. In seinen „Experimental Researches in Electricity“ stellte Faraday aus didaktischen Gründen einen anderen Versuchstyp voran. Er bestand aus Spulen ohne Eisenkerne, die aufeinander induzierend wirkten, und Faraday nannte diese Art „volta-elektrische“ Induktion. Bei der Erzeugung eines Stromstoßes in einer Spule durch Hineinführen oder Herausziehen eines Stabmagneten sprach er von „magneto-elektrischer“ Induktion. Auch den Versuch mit dem schmiedeeisernen Ring (Elektromagnet) rechnete er dazu. Bei der Suche nach einem anschaulichen Modell, das imstande ist, die gefundenen Tatsachen zu verdeutlichen oder zu erklären und ihn vielleicht zu weiteren Entdeckungen hinführen könnte, greift er schließlich auf die „magnetischen Kurven“, die „magnetischen Kraftlinien“ zurück. Mit Hilfe einer Messerklinge macht er anschaulich klar, wie Induktion durch das Schneiden der magnetischen Kraftlinien zustandekommt und daß Bewegungsrichtung, magnetische Kraft und Stromrichtung dabei senkrecht aufeinander stehen (114–116, [7], vgl. Anmerkung dort).

Identität von elektrischer Kraft und chemischer Bindung

Aufgrund seiner wissenschaftlichen Ausbildung bei H. Davy und seiner bis 1820 fast ausschließlich der Chemie gewidmeten Forschungen lag Faraday die Elektrochemie besonders am Herzen. Mit den verschiedenen Theorien der galvanisch-chemischen Zersetzung gab er sich nicht zufrieden, und er nahm sich vor, eine Theorie zu schaffen, die sich einzig und allein auf „gesicherte Tatsachen“ stützt (450 ff.). Den Vorgang der elektrochemischen Zersetzung betrachtete er als ein Aufheben bzw. Neutralisieren der chemischen Affinität entlang der ganzen „Wirkungslinien“, die er als „Repräsentanten“ des elektrischen Stromes ansah. Was er unter elektrischem Strom verstand, präzierte er so (517): „*Bloss nach den Thatsa-*

chen zu urteilen, liegt bisher nicht der mindeste Grund vor, das Agens, welches in dem, was wir elektrischen Strom nennen, als ein zusammengesetztes oder complicirtes anzusehen. Es ist niemals in einfachere oder elementare Agentien aufgelöst worden und lässt sich vielleicht am besten vorstellen als die *Axe einer aus entgegengesetzten, genau gleich grossen aber entgegengesetzt gerichteten Kräften bestehenden Gesamtkraft*.“

Für Faraday sind alle Körper elektrisch leitend, „von den Metallen bis zu den Lacken und Gasen“, wenn auch graduell außerordentlich verschieden und die elektrische Spannung dabei eine wichtige Rolle spielt (444–447). Längs einer Linie, die der späteren elektrischen Feldlinie entspricht, soll nach ihm die elektrische Kraft auf die Teilchen des Elektrolyten als „innere Corpuscular-Aktion“ einwirken, wobei die Teilchen nach Art einer Nahwirkung sich gegenseitig wahrscheinlich beeinflussen (518). Faraday sprach in diesem Zusammenhang später von einer „elektrolytischen Induction“ (1164 und 1343). Für die elektrische und chemische Aktion, die sich ineinander umwandeln, suchte Faraday nun nach einer quantitativen Beziehung. Zunächst sicherte er die schon vor ihm vermutete Gesetzmäßigkeit ab, daß die zersetzte oder abgeschiedene Stoffmenge einzig und allein von der Elektrizitätsmenge abhängt (1. Faraday-Gesetz der Elektrolyse). Er sah sich am Ziel, als er nachweisen konnte, daß gleiche Elektrizitätsmengen chemisch äquivalente Massen elektrolytisch abscheiden (2. Faraday-Gesetz der Elektrolyse). Die gleiche „elektrische Kraft“, gemessen in ihrer Quantität (Elektrizitätsmenge), ist in der Lage, die Affinitätskräfte eines chemischen Äquivalents zu kompensieren. Die Bedeutung seiner Entdeckung ist Faraday klar, wenn er schreibt (850):

„Durch ihre Thatsachen berührt . . . [die Lehre von der festen elektrochemischen Aktion] unmittelbarer und inniger, als es irgend eine frühere Thatsache oder eine Reihe von Thatsachen gethan, die schöne Idee, dass gewöhnliche chemische Affinität eine blosser Consequenz der elektrischen Anziehungen der Theilchen verschiedenartiger Stoffe sei, . . .“.

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen zur Elektrolyse bestärkten Faraday auch darin, die Ursache der Wirksamkeit eines galvanischen Elements oder einer Voltaischen Batterie als eine rein chemische Aktion zu sehen. Er schreibt dazu (918): „Alle diese Thatsachen zeigen uns, dass die gewöhnlich als chemische Verwandtschaft bezeichnete Kraft mittels der Metalle und gewisser Kohlearten in die Ferne übertragen werden kann, dass der elektrische Strom bloss eine andere Form

der chemischen Verwandtschaftskräfte ist, dass seine Kraft den ihn erzeugenden chemischen Affinitäten proportional ist, . . . dass mit anderen Worten, *die als chemische Affinität und Elektrizität bezeichneten Kräfte ein und dasselbe ist*.“

Betrachten wir dazu Oersteds Vorstellungen über chemische Bindung und elektrolytische Zersetzung. Die zentrale Aussage seiner „Ansicht der chemischen Naturgesetze“ ist, daß chemische und elektrische Kräfte identisch sind [10]. Die Tätigkeiten der beiden elektrischen Grundkräfte, auf die Oersted alles physikalische und chemische Geschehen zurückführen will, haben in der chemischen Bindung nur die Form des „Insichgekehrtheits“ angenommen. In einem galvanischen Element und bei einer elektrolytischen Zersetzung finden wechselseitige Umwandlungen elektrischer Kraft von gebundener und freierer Form statt.

Dielektrikum, elektrisches Feld und Leitungsvorgänge

In den elektrochemischen Arbeiten Faradays waren schon Ansätze einer Theorie des elektrischen Feldes vorhanden. Einen entscheidenden Schritt weiter kam er bei der Betrachtung der Dielektrika. Bei allen elektrischen Vorgängen war seiner Ansicht nach ein fundamentales Prinzip im Spiel, nämlich die elektrische Influenz, von ihm „elektrostatische Induktion“ genannt. Als er Versuche mit Eis als Dielektrikum anstellte, glaubte er, den richtigen Wink erhalten zu haben. Wird Spannung an die Kondensatorplatten angelegt, bilden sich, so meinte er, elektrische Dipole; es findet elektrostatische Induktion statt; die chemische Trennung ist so als Tendenz schon vorhanden. Aber erst beim Schmelzen des Eises zu Wasser kann die Zersetzung in Wasserstoff- und Sauerstoffgas erfolgen, die Induktion nimmt ab und der elektrische Strom fließt (1164). Mit einem Kugelkondensator – Faraday bezeichnete ihn als „Induktionsapparat“ –, bei dem das Dielektrikum austauschbar war, der Zwischenraum evakuiert und mit Gas gefüllt werden konnte, stellte er die relativen Dielektrizitätskonstanten (spezifische Induktionskapazitäten) fest.

Den Begriff der elektrischen Influenz bzw. Polarisation hatten Johann Carl Wilcke und Franz Ulrich Theodosius Acpinus – beide arbeiteten zeitweise eng zusammen – um 1759 schon herausgeschält. Influenz oder Polarisation kann sowohl bei leitendem Metall als auch bei einem sehr schlechten Leiter oder Isolator wie Glas erfolgen. Die Physiker nannten

früher diesen Vorgang der elektrischen Influenz „elektrische Verteilung“. In Verbindung mit Vorstellungen einer Nahwirkung will Faraday einen neuen Weg beschreiten (1165).

„Nunmehr glaube ich“, heißt es bei ihm, „dass gewöhnliche Induction nicht eine auf merkliche Entfernungen sich erstreckende Wirkung der kleinsten Theilchen oder der Massen sei, sondern in allen Fällen eine in einer Art von Polarisation bestehende Wirkung aneinander stossender Theilchen; und wenn diese Ansicht richtig ist, so muß die Erkenntniss und Feststellung derselben auf den weiteren Fortgang unserer Erforschung der Natur der elektrischen Kräfte von grösstem Einfluss sein.“

Faraday konnte nachweisen, daß die Kräfte seiner Induktion auch auf „krummen Linien“ (sie entsprechen den elektrischen Feldlinien) wirken. Er benutzte dazu eine geriebene und so „elektrisierte“ Schellackstange und eine metallene Kugel, Halbkugel oder Scheibe, die er direkt auf die mit einer Höhlung versehene Stange legte oder auch isoliert darüber setzte. Immer wieder beschäftigt er sich mit der Frage und dem Problem, ob positive oder negative Ladung für sich isoliert bestehen könne, und er kam zu dem Schluß, daß dies unmöglich sei. An den Zimmerwänden oder an den Wänden eines Kastens, der die angeblich isolierte elektrische Ladung umgibt, tritt immer eine gleichgroße aber entgegengesetzte Ladung auf, fixiert an den elektrischen Feldlinien (1169 ff.).

Die Polarisation in einem Dielektrikum verdeutlichte Faraday in zwei Modellversuchen, einmal mittels eines Isolators (Seidenfadenstückchen), das andere Mal mit einem Leiter (Bleischrotkugeln). In ein Gefäß, das mit Terpentinöl gefüllt ist, werden die beiden Elektroden einer Elektrisiermaschine, die mit einer isolierenden Glasröhre umgeben sind, eingetaucht und kleingeschnittene Stückchen weißer Seide auf die Oberfläche der Flüssigkeit gestreut. Bei Anlegen der Spannung ordnen sich die Fadenstückchen und bilden von Elektrode zu Elektrode einen Streifen (1350). Für Faraday repräsentieren die Seidenfadenstückchen die polarisierten Moleküle. Der zweite Modellversuch wird nur theoretisch durchgeführt. Man stelle sich Schrotkörner in Terpentinöl vor, wobei sich die Kügelchen allerdings nicht berühren dürfen. Legt man an den Kondensator Spannung an, werden die Metallkügelchen zu elektrischen Dipolen, und bei der Entladung des Kondensators kehren sie in ihren Normalzustand zurück (1679).



Faraday in vorgerücktem Alter. Ehrenämter und Ehrentitel lehnte er als Prediger der kleinen puritanischen Gemeinde der Sandemändianer ab. (Aus L. Pearce Williams: Michael Faraday, A Biography)

Wie interpretiert Oersted in seiner „Ansicht“ die elektrostatischen Vorgänge, in denen die elektrischen Kräfte „in ihrer freiesten Tätigkeit“ sich befinden? Angelpunkt ist auch bei ihm die Influenz oder Polarisation. Die „Verteilung“, die Trennung der beiden elektrischen Kräfte, geschieht im gesamten Raum, der den geladenen Körper umgibt, und zwar innerhalb eines jeden Raumelementes. Allerdings meint Oersted, daß hier die „Mitteilung“, der Ladungsübergang von Raumelement zu Raumelement, mit im Spiele ist. „Verteilung“ und „Mitteilung“ werden oft nicht klar genug getrennt [10]. Doch bedenken wir, daß bei bestimmten Glassorten beides, die Dipolbildung und das Eindringen elektrischer Ladung in das Glas, zusammen auftritt. Die Annahme, daß sich die elektrischen Kräfte in dem umgebenden Raum von Zone zu Zone ausbreiten, hängt mit der Vorstellung einer Nahwirkung eng zusammen.

Faraday will alle elektrischen Vorgänge unter einem gemeinsamen Gesichtspunkt, in „Unterordnung unter ein allgemeines Gesetz“ deuten (1165). Zwischen Isolatoren und Leitern sah er, wie schon erwähnt, keinen prinzipiellen, sondern nur einen graduellen Unterschied. Alle Körper schienen ihm Dielektrika zu sein und zuerst der elektrischen Influenz zu unterliegen. Er sagt (1338):

„ . . . so stelle ich mir vor, dass die erste Wirkung eines elektrisirten Körpers auf benachbarte Körper in der Hervorrufung eines Polarisationszustandes ihrer Theil-

chen besteht, und das ist die Induction. . . . Bleibt die Induction ungeschwächt, so bedeutet dies vollkommene Isolation, und je höher der Polarisationszustand ist, welchen die Theilchen annehmen oder unterhalten können, desto höher ist die Intensität, welche den wirkenden Kräften gegeben werden kann. Wenn dagegen die aneinander grenzenden Theilchen nach Annahme des Polarisationszustandes die Fähigkeit haben, ihre Kräfte mitzuthemen, so findet Leitung statt, und die Spannung ist vermindert, denn Leitung ist ein besonderer Entladungsvorgang zwischen benachbarten Theilchen.“

Bei der Deutung des elektrischen Leitungsvorgangs folgte Faraday also nicht Ampères Vorstellung vom elektrischen Strom, der aus zwei einander entgegengesetzten elektrischen Fluida (positives und negatives Fluidum) bestehen soll. Elektrische Ladungen waren bei Faraday keine Substanzen, sondern „Kräfte“, und er benutzte die von der Elektrostatik her bekannten Begriffe „Verteilung und Mitteilung“.

Ähnlichkeit zu Oersteds Auffassung ist auch hier vorhanden, wenn bei ihm auch manches unklarer erscheint. „Verteilung“ und „Mitteilung“ spielen bei dem Leitungsvorgang ebenfalls eine maßgebliche Rolle. Innerhalb des Leiters soll eine Art Dipolbildung erfolgen, die „Gegensätze“ sich dann in unmerklich kurzer Zeit ausgleichen [10]. Durch eine elektrische Spannung werden die Teilchen des Leiters in den besonderen Zustand einer „inneren Tätigkeit“ versetzt – bei Metallen genügt dazu schon eine sehr niedrige Spannung –, und diese Tätigkeit im Leiter soll eine Fortpflanzung der Elektrizität bewirken.

Magnetische Eigenschaften der Materie und des leeren Raumes

In der Physikgeschichte wird der Beginn von Faradays Feldtheorie oft mit dem Zeitpunkt seiner Untersuchungen über die Dielektrika gleichgesetzt. Bei Faradays ersten Untersuchungen zum Elektromagnetismus (1821) findet man aber schon Elemente einer Nahwirkung. Muß der Beginn zurückdatiert werden? Die Sache ist etwas komplizierter. Elektrische Influenz kann, wie Faraday feststellte, bei allen Körpern erfolgen. Magnetisch affiziert werden gemäß seinem Kenntnisstand bis zur Entdeckung des Diamagnetismus (1845) aber nur die Metalle Eisen, Nickel, Kobalt, das Mineral Magnetit und der Raum um einen stromdurchflossenen Leiter (255). Anscheinend lag hier kein durchgängiges Prinzip vor wie bei der

elektrischen Influenz. Mit der Entdeckung des Dia- und Paramagnetismus änderte sich dies grundlegend. Faraday schrieb hierzu (2420): „Die Materie scheint der magnetischen Kraft ebenso allgemein unterworfen zu sein wie der Schwerkraft, den elektrischen, den chemischen oder Cohäsionskräften.“

Zunächst deutete Faraday den Diamagnetismus mit der Entstehung magnetischer Pole von entgegengesetzter Art wie bei Eisen (2429). Doch vier Jahre später widerrief er diese Ansicht, obwohl andere Forscher wie J. Plücker und W. Weber die Polarität bei Wismut (stark diamagnetisch) einwandfrei nachgewiesen hatten [11]. Diamagnetismus und Paramagnetismus erfaßte Faraday dann mit der Einführung eines speziellen Leitungsvermögens der magnetischen Kraft (2640 ff.). Man kann dies, so meinte er, am Verlauf der magnetischen Kraftlinien ablesen; sie können sich konzentrieren und divergieren. Gewöhnlicher Magnetismus hieß bei Faraday Paramagnetismus (und dazu gehörte auch der Ferromagnetismus); er stand im Gegensatz zum Diamagnetismus, und Magnetismus wurde als Gesamtbegriff gebraucht. Die ferromagnetischen Stoffe wurden dadurch herausgehoben, daß er ihnen eine eigene Polarität zuerkannte.

Faraday ging nun daran, auch für die magnetische Kraft ähnliche Modellvorstellungen zu entwickeln, wie er es vorher bei den elektrischen Kraftlinien getan hatte. Auch die magnetischen Kräfte sollen die innere Molekularkonstitution der Körper (feste, flüssige, gasförmige) verändern.

Werfen wir zu diesem Punkt wieder einen Blick in Oersteds Büchlein „Ansicht“ [10]. Dort liest man, „daß eigentlich alle Körper einigen Magnetismus anzunehmen fähig sind, . . . nur in höchstverschiedenen Wirkungsgraden.“

Spätestens 1850 war sich Faraday sicher, daß Elektrizität und Magnetismus „ähnliche Kraftformen mit polarem, dualem und antithetischem Charakter“ darstellen (2703). Dem Vakuum schrieb Faraday ebenfalls magnetische Eigenschaften zu und ein spezielles magnetisches Leitvermögen. Aber auf den leeren Raum ließ sich das Modell einer magnetischen Polarisation nur sehr schwer übertragen, und so stellte Faraday 1852 und später Spekulationen über die physikalischen Ursachen, über die innere physikalische Natur der magnetischen Kraftlinien an (und im Prinzip auch über die Natur der elektrischen Kraftlinien im Vakuum) (3243 und 3305). Haben sie Ähnlichkeit mit den „dynamischen“ elektrischen Kraftlinien in

einem Leiter, liegt ein Spannungszustand oder ein Schwingungszustand des hypothetischen Äthers vor, fragt er sich, oder ist es eine Art von Strömung (3269)? Über den materiellen Äther kann Faraday nichts Näheres aussagen, nur soviel, daß darin Kraftlinien, die für ihn eine „physikalische Wahrheit“ darstellen, möglich und von „antithetischer“ (also polarer) Natur sind (3277).

„Alles, was ich zu sagen vermag“, schreibt er, „ist, daß ich mir im Raum, er mag (um mich des gewöhnlichen Ausdrucks zu bedienen) leer oder mit Materie erfüllt sein, nirgends etwas anderes als Kräfte und die Linien, in denen sie sich äußern, denke.“

Schlußbemerkung

Auf den ersten Blick erscheint Faradays Denkweise uneinheitlich, ja widersprüchlich. Einerseits bemühte er sich, „auf inductivem Wege des Experiments von dem in . . . [einem] Wissenszweige Bekannten zum Unbekannten fortzuschreiten“ (2641), und damit allein wird Faradays Schaffen oft charakterisiert. Andererseits liegt seinen Forschungen eine philosophisch-metaphysische Überzeugung als Leitfaden zugrunde, die unserer Ansicht nach von der romantischen Naturphilosophie her, insbesondere von Oersted stark geprägt ist. Denken wir nur an seinen unerschütterlichen Glauben an die Umwandelbarkeit der Wirkungsformen einer Urkraft, aber auch auf die hier aufgezeigten Ähnlichkeiten zu Oersteds Vorstellungen, in denen, so meinen wir, die Keime von Faradays Feldtheorie liegen. Faraday lehnte Spekulationen nicht rundweg ab, sondern betrachtete sie als „wundervolle Hilfsmittel in den Händen des Experimentators“ (3244). Die beiden Vorgehensweisen sind gewissermaßen sich ergänzende Komponenten erfolgreicher Naturforschung.

Literatur

- [1] *L. Pearce Williams*: Michael Faraday, A Biography. Chapman and Hall, London 1965.
- [2] *A. Hermann*: Michael Faraday. In: Die Großen der Weltgeschichte. Bd. 7, S. 516–529. Kindler, Zürich 1976.
- Zum Einfluß Oersteds und der romantischen Naturphilosophie auf Faraday:
- [3] *L. Pearce Williams*: The Origins of Field Theory. Univ. Press of America. Boston 1967.
- [4] *B. Gower*: Speculation in Physics.

The history and practice of Naturphilosophie. In: Studies in History and Philosophy of Science 3 (1973).

- [5] *A. Hermann*: Der Dynamismus – ein Paradigma Anfang des 19. Jahrhunderts, Phys. Bl. 37 (1981) 322.
- Einen Überblick über die z. T. konträren Ansichten zum Ursprung und der Genese von Faradays Feldtheorie gibt:
- [6] *N. J. Nersessian*: Faraday's Field Concept. In *D. Gooding* und *F. A. J. L. James* (Hrsg.): Faraday rediscovered. Stocton Press, Southhampton 1985.
- [7] *M. Faraday*: Historical Sketch of Electro-Magnetism. In *Th. Thomson* (Hrsg.): Annals of Philosophy, New Series Vol. 2 (1821) and Vol. 3 (1822). – Auch in Faradays „Experimental Researches in Electricity“ aufgenommen. Deutsche Übersetzung *S. Kalischer*: *M. Faraday*, Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. 3 Bde., Springer, Berlin 1889–1891. Hier 2. Bd., S. 265–297. Der Einfachheit halber wird, wenn möglich, nur auf Faradays Artikelnummern verwiesen. Sonstige Zitate: Bd. 2, S. 119, 276 und 255; Bd. 3, S. 411, 413 und 598.
- [8] Annals of Philosophy, Vol. 13 und 14 (1819). Zitat Vol. 13, S. 369.
- [9] *H. Chr. Oersted*: Ansicht der chemischen Naturgesetze, durch die neueren Entdeckungen gewonnen. Real-schulbuchhandlung Berlin 1812 (im weiteren abgekürzt: „Ansicht“). Ins Französische übersetzt von Marcel de Serres, Paris 1813.
- [10] *K. H. Wiederkehr*: Oersteds „Ansicht der chemischen Naturgesetze“ (1812) und seine naturphilosophischen Betrachtungen über Elektrizität und Magnetismus. In: Gesnerus 47. Sauerländer, Aarau 1990. – Ders.: Elektromagnetismus – Schlüsselphänomene für Faraday. In: Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht: H. 3, Jg. 44 (1991).
- [11] *K. H. Wiederkehr*: Wilhelm Weber, Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität. Wissenschaftl. Verlagsges., Stuttgart 1967 (Band 32 Große Naturforscher). – Ders.: Zur Deutung magnetischer Phänomene im 19. Jahrhundert. Physikal. Blätter 44 (1988) 129.
- [12] *M. C. Harding*: Correspondance de H. C. Oersted avec divers savants. 2 Teile. H. Aschehoug, Kopenhagen 1920. Hierzu: 2. T., S. 84, 135 und 136; 1. T. S. 280.
- [13] *A. Hermann*: Michael Faraday: In: Bild der Wissenschaft 1967, S. 647–657.