

**OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 292**

**Experimental-Untersuchungen
über
Elektricität**

Erster Band

**von
Michael Faraday**

Verlag Harri Deutsch

OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 292

Richard Feys

Erkenntnis
1912-1913

Deutsche Übersetzung
A. Kricheldorf



Verlag Hanser München



Michael Faraday
22.9.1791 - 25.8.1867

**OSTWALDS KLASSIKER
DER EXAKTEN WISSENSCHAFTEN
Band 292**

**Experimental-Untersuchungen
über
Elektricität**

*In drei Bänden
Erster Band*

von
Michael Faraday

Einleitung von
Friedrich Steinle

Deutsche Übersetzung
S. Kalischer



Verlag Harri Deutsch

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 3-8171-3292-1

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und das Speichern und die Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Die Druckvorlage wurde freundlicherweise von der Bibliothek des Instituts für Geschichte der Naturwissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main zur Verfügung gestellt.

© Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH,
Frankfurt am Main, 2004

1. Auflage 2004

Druck: Rosch-Buch Druckerei GmbH, Scheßlitz
Printed in Germany

Inhalt

Einleitung	
Michael Faraday und seine „Experimental Researches in Electricity“ von F. Steinle	III
Vorwort des Übersetzers (S. Kalischer)	XXXV
Vorwort des Verfassers (M. Faraday)	XXXVI
Inhaltsverzeichnis der Experimental-Untersuchungen	XXXIX
Experimental-Untersuchungen über Elektrizität	1
Register	502

Einleitung

Michael Faraday und seine „Experimental Researches in Electricity“

von
Friedrich Steinle

„Faraday is, and must always
remain, the father of that enlarged
science of electro-magnetism“
(J.C. Maxwell, 1873)¹

Kaum etwas hat die Entwicklung von Elektrizität und Magnetismus im 19. Jahrhundert so stark geprägt wie die Arbeiten Michael Faradays. Maxwell selbst, dessen Name hier gleichrangig zu nennen wäre, hat sich wesentlich und ausdrücklich auf Faraday gestützt. Faradays Entdeckungen haben neue Forschungsfelder eröffnet und die großmaßstäbliche Verwendung von Elektrizität ermöglicht, seine begrifflichen Innovationen den Gang der theoretischen Entwicklung in völlig neue Bahnen gelenkt. Die wichtigsten seiner zahlreichen Einzelaufsätze fasste er selbst unter dem Titel „Experimental Researches in Electricity“ in Buchform zusammen, und es ist keine Übertreibung, wenn man diese drei Bände als das wichtigste Werk der Elektrizitäts- und Magnetismusforschung im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts bezeichnet. Sie werden hier im Nachdruck der deutschen Übersetzung von 1889-91 erstmals wieder leicht zugänglich gemacht. In der Einleitung soll es, neben Skizzen zur Person Faradays, den Eigenheiten und der Bedeutung seiner Arbeiten, vor allem um eine knappe Übersicht zu diesem durchaus monumentalen Text gehen.

1 Maxwell, J. C., „Scientific Worthies I. - Faraday“, *Nature* 8 (1873), 397-9, hier 398.

Michael Faraday: ein aussergewöhnlicher Werdegang

Im frühen 19. Jahrhundert gab es das typische Berufsbild eines Naturforschers noch nicht, und gerade in England war Naturforschung immer noch häufig eine Sache von finanziell unabhängigen „Gentlemen of science“, die in der Royal Society of London ihre Forschungsergebnisse austauschten.² Wenngleich Faraday nicht der einzige war, der andere Wege nahm, so fällt doch selbst bei aller Varietät sein Werdegang besonders auf. 1791 als eines von vier Kindern eines zeitweilig arbeitslosen Grobschmiedes im Westen Londons geboren, erhielt er nur eine elementare Schulbildung. Während seiner Lehre als Buchbinder frönte er ausgedehnter Lektüre, vor allem naturwissenschaftlicher Werke. Er schloss sich der „City Philosophical Society“ an, einer Gruppierung ähnlich gesinnter Jugendlicher, die naturwissenschaftliche Themen gemeinsam behandelten. Nach einer kurzen Zeit der Berufsausübung bemühte er sich um eine Anstellung in der Naturforschung. Dass dieser sehr ungewöhnliche und wenig erfolversprechende Schritt letztlich erfolgreich war, hatte mit Faradays Talent und mit Zufällen gleichermaßen zu tun. Die Royal Institution of London, bei der Faraday eine Anstellung fand, war eine private Stiftung und ursprünglich als Volkshochschule intendiert gewesen, hatte sich aber zu einem Treffpunkt der oberen Mittelschicht entwickelt.³ Ihr Erfolg gründete sich wesentlich auf die didaktische und rhetorische Brillanz des Chemikers Humphry Davy. Faraday hatte mit geschenkten Eintrittskarten an Davys Vorlesungen teilgenommen, durch die Zusendung ausgearbeiteter Mitschriften wurde Davy auf Faradays Begabung aufmerksam und stellte ihn wenig später für die zufällig freigewordene Stelle als Laborassistent ein.

2 S. etwa Cardwell, D. S. L. (1957), *The organisation of science in England*. London, oder Morrell, J. & Thackray, A. (1981), *Gentlemen of science: Early years of the British Association for the Advancement of Science*. Oxford.

3 Näheres zur Royal Institution in Berman, M. (1978), *Social Change and Scientific Organization: The Royal Institution, 1799-1844*. Ithaca, NY: Cornell University Press. James, F.A.J.L., (Hg.) (2002), *The common purposes of life: science and society at the Royal Institution of Great Britain*. Aldershot, Ashgate.

Schon wenig später begleitete Faraday Davy auf einer eineinhalbjährigen Reise durch Europa (ab Oktober 1813), auf der er die Bekanntheit vieler Forscher auf dem Kontinent machte, jedoch in seinen Erwartungen hinsichtlich der moralischen Qualitäten von Naturforschern ernüchtert wurde.⁴ In den folgenden Jahren arbeitete er, neben der Laborassistenten, auch an der Herausgabe des wissenschaftlichen Hausjournals der Royal Institution mit und eignete sich autodidaktisch das ganze Gebiet der Chemie an, theoretisch und experimentell gleichermaßen. Die Royal Institution bot dazu beste Ressourcen: neben einer gut ausgestatteten Bibliothek gab es ein Forschungslabor, das Davy zu einem der besten in ganz Europa entwickelt hatte. Faraday veröffentlichte kleinere Aufsätze zu chemischen Themen und nahm kommerzielle Aufträge für chemische Analysen an. 1821 wurde er an der Royal Institution zum Hausmeister und -verwalter ernannt, die in diesem Zuge bereitgestellte größere Wohnung ermöglichte ihm die Heirat mit Sarah Barnard, und schließlich legte er sein Bekenntnis zur religiösen Sekte der Sandemanier ab, wie Sarah schon zuvor – drei Schritte, die in ihrer Bedeutung kaum überschätzt werden können.

Die Entdeckung der elektromagnetischen Rotation, die Faraday im selben Jahr gelang, verschaffte ihm erstmals internationale Bekanntheit. In den Folgejahren arbeitete er, stark durch Aufgaben an der Royal Institution in Anspruch genommen, vornehmlich auf dem Gebiet der chemischen Analytik. Seine Entdeckung der Verflüssigung von Gasen (1823) trug wesentlich dazu bei, dass er 1823 zum korrespondierenden Mitglied der Académie des Sciences und 1824 zum Fellow der Royal Society ernannt wurde. 1825 wurde er zum Direktor der Labors der Royal Institution befördert, 1827 erschien die einzige von ihm jemals verfasste Monographie: ein Handbuch für das Arbeiten im chemischen Labor⁵. Im Zuge der zunehmenden Verantwortlichkeiten an der Royal Institution begann er, in großem Umfang öffentliche Vorträge über wissenschaftliche Themen zu halten und nahm überdies eine gut dotierte Lehrtätigkeit an der Königlichen Militärakademie in Woolwich bei

4 Sein Reisetagebuch wurde vor wenigen Jahren veröffentlicht: Bowers, B. & Symons, L. (1991), „*Curiosity Perfectly Satisfied*“: *Faraday's Travels in Europe 1813-1825*. London: Peter Peregrinus.

London an. 1833 wurde er auf eine Stiftungsprofessur in Chemie („Ful-lerian Professor“) an der Royal Institution berufen. Im Alter von Anfang 40 Jahren hatte Faraday eine konsolidierte Stellung innerhalb der wissenschaftlichen Welt erreicht. Wohlbekannt und akzeptiert, stand er in Kontakt mit Forschern innerhalb und außerhalb Großbritanniens; dazu kamen große Erfolge in seiner Lehr- und Vortragstätigkeit. Die finanzielle Knappheit und die existenziellen Sorgen waren endgültig beseitigt: Faraday sollte sein ganzes Leben hindurch an der Royal Institution verbleiben.

Dass Faraday in den 1840er und -50er Jahren der vielleicht populärste Wissenschaftler Englands war, hing wesentlich mit seiner Vortragsarbeit an der Royal Institution zusammen. Er organisierte neue Vortragsreihen und trat häufig auch selbst als Vortragender auf, u.a. zur Tunnelbautechnik unter der Themse oder zur astronomischen Fotografie. Aus seinen beliebten Vortragsreihen für Jugendliche ging u.a. die „Naturgeschichte einer Kerze“ hervor, eines seiner meistpublizierten und -übersetzten Werke. Zu seiner Zuhörerschaft zählten bisweilen Mitglieder des britischen Königshauses. Als einer der wenigen Wissenschaftler ist er auf einer Banknote – der britischen 20 £-Note – porträtiert, bezeichnend genug, als Vortragender. Mit solcherlei Kontakten, als Mitglied vieler gelehrter Gesellschaften und Empfänger vieler Ehrungen, kann er durchaus als Teil des wissenschaftlichen „Establishments“ der Jahrhundertmitte gelten.

Diese „Vom Tellerwäscher zum Millionär“-Entwicklung Faradays trägt allerdings dadurch besondere Züge, dass er sich vom Leben der gehobenen Mittel- und Oberschicht, mit der er als Vortragender und Manager zu tun hatte, im privaten Bereich zeitlebens deutlich abhob. Hier war er fast ausschließlich auf den kleinen Kreis der Sandemanischen Sekte beschränkt, die den zu weltlich und hohl erscheinenden

5 Faraday, M. (1827), *Chemical manipulation; being instructions to students in chemistry, on the method of performing experiments of demonstration and research with accuracy and success*. London: Phillips. Sehr rasch ins Deutsche übersetzt: Faraday, M. (1828), *Chemische Manipulation oder das eigentlich Practische der sichern Ausführung chemischer Arbeiten und Experimente*. Weimar: Verlag des Landes-Industrie-Comptoirs.

Lebensweisen der anglikanischen Staatskirche ein Leben nach dem unmittelbaren Gebot der Bibel entgegensetzen wollte. So wurde etwa die Teilnahme an anglikanischen Gottesdiensten strikt vermieden; in der Gemeinde gab es keine Priester, wichtige Entscheidungen wurden in einem Gremium von Ältesten getroffen, dem auch Faraday zweimal angehörte. Im Gegensatz zur britischen Gesellschaft der Zeit spielten Standesunterschiede keine Rolle: außer der Aristokratie waren alle Bevölkerungskreise vertreten. Das Leben der Faradays war durch solche Bindungen wesentlich geprägt. Faraday nahm Predigt und soziale Aufgaben sehr ernst und ließ gar, um einen Kranken pflegen zu können, eine angekündigte Abendvorlesung ausfallen. Anders als in seiner wissenschaftlichen Arbeit konnte er hier Isolation nicht ertragen. Sein Freund, Biograph und Nachfolger an der Royal Institution, John Tyndall, charakterisierte, trotz seiner eigenen, ganz areligiösen Grundhaltung, die Bedeutung von Faradays religiösem Leben sehr treffend: „I think that a good deal of Faraday's weekday strength and persistency might be referred to his Sunday Exercises. He drinks from a fount which refreshes his soul for the week“.⁶

Der Elektromagnetismus

Im Sommer 1820 löste die Bekanntgabe einer neuen Entdeckung durch den dänischen Forscher Hans-Christian Ørsted in ganz Europa große Aufregung und eine Welle von Forschungsarbeiten aus. Ørsted hatte erstmals eine Wirkung des Galvanismus auf Magnete bemerkt – eine Magnetnadel wurde durch einen in die Nähe gebrachten stromführenden Draht aus ihrer Nord-Süd-Position abgelenkt – und damit ein weiterer Zusammenhang verschiedener Naturkräfte aufgewiesen.⁷ Der

6 Tagebuch Tyndalls vom 24. Oktober 1852: RI MS JT/2/6, S. 164, mit freundlicher Genehmigung der Royal Institution of Great Britain.

7 Ørsteds als Privatdruck versandter Aufsatz: *Experimenta circa effectum Conflictus electrici in Acum magneticam* wurde rasch übersetzt und in wissenschaftlichen Journalen gedruckt, etwa: „Versuche über die Wirkung des elektrischen Conflicts auf die Magnetnadel“, *Annalen der Physik (Gilbert)* 66 (1820), (11. Stück [November]): 295-304.

Befund wurde von am deutschen Idealismus orientierten Forschern freudig begrüßt, war doch hier ein weiterer Hinweis auf die vermutete Verwandtschaft oder gar Einheitlichkeit verschiedener Naturkräfte gegeben. Zugleich aber widersetzte er sich eklatant einer Erfassung in den traditionellen Begriffen von Anziehung und Abstoßung, die unabhängig von spezielleren theoretischen Vorstellungen allem Nachdenken über Naturvorgänge selbstverständlich zu Grunde gelegt wurden. Besonders stark wurde die damit gegebene Herausforderung in Paris empfunden: dort waren diese Begriffe in Form von rein entfernungsabhängigen Fernkräften mathematisch präzisiert worden und bildeten die Grundlage des Programms der Mathematisierung der Naturforschung. Der wesentliche Vertreter der Laplaceschen Physik⁸ – Jean Baptiste Biot – machte sich zusammen mit seinem damaligen Assistenten Felix Savart sofort an Messungen und stellte als Resultat ein Kraftgesetz vor (1820), das bis heute unter dem Namen der beiden bekannt ist. Allerdings musste er dabei die zunächst unüberschaubare und rätselhafte räumliche Komplexität der elektromagnetischen Wirkungen weitgehend ignorieren. Sein schärfster Konkurrent André-Marie Ampère griff hier deutlich weiter aus; dementsprechend hatte das von ihm noch vor Biot vorgestellte Kraftgesetz eine kompliziertere Form. Ampère entdeckte überdies die Wechselwirkung zweier stromdurchflossener Leiter und machte sie zur Grundlage seiner Theorie der „Elektrodynamik“.⁹ In Halle machte sich der Professor für Chemie und Physik (und Herausgeber des viel gelesenen *Journal für Chemie und Physik*), Johann S. C. Schweigger, sofort an experimentelle Untersuchungen und schlug vor, den Effekt durch mehrmaliges Herumführen des Drahtes zu verstärken und diesen „Multiplikator“ als Messinstrument für den Effekt der galvanischen Batterie zu verwenden. Ein ganz ähnliches Instrument wurde unter dem Namen „Kondensator“ von dem Berliner Medizinstudenten

8 Für diese Schule s. Fox, R. (1974), *The Rise and Fall of Laplacian Physics*“, *Historical Studies in the Physical Sciences* 4: 89-136.

9 Ampère, A.-M. (1820), „Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courants électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants“, *Annales de Chimie et de Physique* 15 (1820): 59-76 und 170-218, und Ampère, A.-M. (1826), *Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience*. Paris: Mequinon-Marvis.

Johann Christian Poggendorff vorgeschlagen, der durch den Akademiker Paul Erman zu seinen Arbeiten angeregt worden war. Humphry Davy und William Hyde Wollaston in London, David Brewster in Edinburgh, James Cumming in Cambridge, Thomas Seebeck in Berlin, Tobias Mayer in Göttingen, Ludwig Wilhelm Gilbert in Leipzig, Charles Pictet und Charles Gaspard de la Rive in Genf, François Arago in Paris, Jacob Berzelius in Stockholm, Guiseppe Gazzeri und Cosimo Ridolfi in Florenz, Pietro Configliachi in Pavia – schon diese Auswahl von Namen und Orten verdeutlicht, wie stark die Forschungsaktivitäten zu der Ørstedschen Entdeckung in Europa waren. Binnen Jahresfrist war Ørsteds Bericht in 5 Sprachen übersetzt und in mindestens 11 Journalen abgedruckt worden, eine Flut von daran anknüpfenden Forschungsarbeiten erschienen. Ein solcher Widerhall war allenfalls vergleichbar mit demjenigen, den 20 Jahre zuvor Voltas Erfindung der nach ihm benannten Säule – der ersten elektrischen Batterie – hervorgerufen hatte. Obgleich sich Ørsteds Befund als leicht nachvollziehbar erwies, äußerten viele ihr Befremden über seine Eigenheiten und artikulierten den Eindruck, dass hier ein ganz neues Forschungsfeld eröffnet worden sei.¹⁰

Veranlasst durch die Nachfrage eines Freundes, veröffentlichte Faraday im Sommer 1821 anonym einen umfassenden Überblick zum Elektromagnetismus, zu dessen Erarbeitung er systematisch alle Experimente nachvollzogen hatte. Davon ausgehend untersuchte er die elektromagnetischen Bewegungen in asymmetrischen Konstellationen und entdeckte einen spektakulären Effekt – eine elektromagnetische Rotationsbewegung. Überdies bemerkte er, dass sich auch die komplexeren Bewegungen auf diesen „einfachen Fall“ der Rotation eines Drahtes um einen Magnetpol „zurückführen“ ließen. Das war eine kühne Behauptung, zumal er sich als Neuling damit in direkten Konflikt zu etablierten Autoritäten wie Biot und Ampère stellte.¹¹ In den darauf folgenden Jahren konnte Faraday auf Grund anderer Verpflichtungen das Thema nicht weiter bearbeiten, berichtete aber im Journal der Royal

10 Für einen Überblick zur Rezeption von Ørsteds Ergebnis s. Steinle, F. (im Druck für 2004), *Explorative Experimente. Ampère, Faraday und die Ursprünge der Elektrodynamik*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag, Kap. 2.

Institution regelmäßig darüber. Erneut aufgreifen konnte er es erst 10 Jahre später, und wieder gelang ihm gleich zu Anfang eine spektakuläre Entdeckung: die des lange und von vielen gesuchten elektromagnetischen Induktionseffektes. Nun entschied sich Faraday, das Resultat in den prestigösen *Philosophical Transactions* der Royal Society zu veröffentlichen, und gab dem Aufsatz den Titel „Experimental Researches in Electricity“.¹² Dieser Anfangserfolg, aber auch die vielen Fragen, die die Entdeckung aufwarf, trugen wohl dazu bei, dass Faraday nun an dem Thema blieb – für die nächsten 25 Jahre sollten Elektrizität und Magnetismus seine hauptsächlichen Forschungsgebiete bleiben. Seine Resultate machte er in einer fortlaufenden Reihe von Aufsätzen bekannt, allesamt unter demselben Haupttitel, aber stets mit spezifizierenden Untertiteln. Der letzte dieser Aufsätze, die „30. Reihe“, wurde 1856 gedruckt, 24 Jahre nach dem ersten. Für den größten Teil dieser Zeitspanne hatte Faraday eine unbestrittene Spitzenstellung in der Forschung zu Elektrizität und Magnetismus inne. In drei Etappen – 1839, 1844, und 1855 – fasste Faraday seine Aufsätze in Sammelbände zusammen. Die deutsche Übersetzung dieser Sammelbände liegt hier in einem Nachdruck vor.

11 Diese Arbeiten sind im zweiten Band der vorliegenden Ausgabe abgedruckt: S. 115-147 und 265-297. Für eine Diskussion s. etwa Gooding, D. C. (1990), *Experiment and the making of meaning: Human agency in scientific observation and experiment*. Dordrecht: Kluwer, ch. 4 & 5, oder Steinle, F. (1995), „Looking for a ‚simple case‘: Faraday and electromagnetic rotation“, *History of Science* 33: 179-202, oder Steinle, F. (im Druck für 2004), *Explorative Experimente. Ampère, Faraday und die Ursprünge der Elektrodynamik*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag, Kap. 6.

12 *Philosophical Transactions* 122 (1832), 125-162.

Die „Experimental Researches in Electricity“: Eine Übersicht

Die „Experimental Researches in Electricity“ (kurz: ERE) bilden einen sehr dichten Text, in dem detaillierte Beschreibungen von Experimenten und Instrumenten und weitgehende begriffliche Erwägungen oft in jähem Wechsel zur Sprache kommen. Schon dem damaligen und erst recht dem heutigen Leser sind sie deswegen, und auf Grund ihrer Fülle, schwer zugänglich. Um den Einstieg in die Lektüre zu erleichtern, soll in den folgenden Abschnitten eine überblickshafte Darstellung wesentlicher Themen gegeben werden, die Faraday bearbeitet hatte. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Werk und seinen inhaltlichen Linien; für das hier nur knapp angerissene historische Umfeld sei auf die in den Fußnoten und am Schluss angegebene Literatur verwiesen.

Elektromagnetische Induktion. Wie schon erwähnt, bildete der elektromagnetische Induktionseffekt den Gegenstand des 1. und 2. Aufsatzes. Der neue Effekt hatte verwirrende Eigenheiten und war mit traditionellen Mitteln nicht gesetzmäßig formulierbar. Faraday unternahm nach verschiedenen Versuchen den gewagten Schritt, die schon lange bekannten, aber nie als besonders bedeutsam angesehenen Linien, die sich mit Eisenfeilspänen um Magnete zeigten („magnetische Kurven“), als Referenzsystem einzuführen (§ 114). Damit ließ sich zunächst nur eine bestimmte Klasse von Induktionseffekten in ein Gesetz fassen, das er aber schon wenig später durch Einführen der Vorstellung von beweglichen „magnetischen Kurven“ (§ 238) auf alle Induktionseffekte überhaupt erweitern konnte. Mit diesem einheitlichen Induktionsgesetz (§ 231) ließen sich viele zuvor rätselhafte Effekte verständlich machen. Der Aufsatztext weist einige Spuren der manchmal turbulenten und keinesfalls geradlinigen Entwicklung auf; am deutlichsten wird das in Bezug auf den sog. „elektrotonischen Zustand“. Faraday hatte zunächst einen solchen Zustand des von der Induktion betroffenen Drahtes postuliert, um den nur vorübergehenden Charakter des Induktionseffektes zu erfassen, und ihm einen ganzen Abschnitt im Aufsatz gewidmet. In der weiteren Arbeit wurde ihm klar, dass er gerade durch die Verallgemei-

nerung des Induktionsgesetzes diese Annahme nicht mehr benötigte. Sein erster Aufsatz stand zu diesem Zeitpunkt schon kurz vor dem Druck, so konnte Faraday den besagten Abschnitt nicht mehr herausnehmen, sondern nur noch in einer Fußnote gleich zu Anfang darauf verweisen, dass die ganze Spekulation hinfällig sei, die dann auf den folgenden (immerhin sieben) Textseiten ausgearbeitet wurde!¹³ Nach der Entdeckung des Induktionseffektes etwa war ihm überdies klar, dass hier eine neue und unvergleichlich stärkere Elektrizitätsquelle vorlag. Ihre technische Ausgestaltung verfolgte er aber nicht weiter, sondern konzentrierte sich auf die Erarbeitung der grundlegenden Naturgesetze – das sollte zeitlebens für seine Arbeit charakteristisch bleiben. Schon 1832 stellte der junge Instrumentenbauer Antoine-Hyppolite Pixii in Paris den ersten elektromagnetischen Generator vor.

In der schnell anschließenden 3. Reihe ging es Faraday um die Frage, ob man denn so verschiedene Effekte wie sie durch den Zitterrochen, die Elektrisiermaschine, Temperaturdifferenzen, chemische Wirkungen und nun Induktion hervorgebracht wurden, zu Recht unter einem gemeinsamen Namen – Elektrizität – summieren dürfe. Das Problem hatte schon andere vor ihm beschäftigt und war nicht abschließend beantwortet. Faraday unternahm breite experimentelle Untersuchungen und zog aus den in einer Tabelle zusammengestellten Resultaten (§ 360) den Schluss, dass es sich tatsächlich in all diesen Fällen um ein und dieselbe Naturkraft handle. Diese Arbeit gab ihm den Anstoß zu einer allgemeineren Untersuchung von unterschiedlichen Leitungsvorgängen, etwa in Festkörpern und Flüssigkeiten (4. Reihe). Charakteristisch genug, befasste er sich ausführlich gerade mit den Übergängen zwischen diesen verschiedenen Zuständen und formulierte das allgemeine Gesetz, dass die Leitfähigkeit von flüssigen Stoffen beim Erstarren verloren gehe, und dass die meisten festen Stoffe beim Schmelzen leitfähig werden (§ 394, 412).

13 S. 15, Fußnote 2, dann ausführlicher in der 2. Reihe, § 231. Für eine Diskussion s. Steinle, F. (1996), „Work, Finish, Publish? The formation of the second series of Faraday's ‚Experimental Researches in Electricity‘“, *Physis* 33: 141-220.

Elektrochemie. Die Frage der elektrochemischen Zersetzung, die hierbei ins Blickfeld rückte,¹⁴ war denn auch Gegenstand einer sehr ausführlichen Untersuchung, die ihn über ein Jahr lang beschäftigte und in vier Aufsätzen (5. bis 8. Reihe) ihren Niederschlag fand. In ausführlichem Experimentieren und nicht weniger umfassender Sichtung der bestehenden Auffassungen, insbesondere von Grotthus und Davy,¹⁵ entwickelte er eine eigene Theorie, bei der er deutlicher als andere vor ihm betonte, dass die „Pole“ im wesentlichen als Begrenzungen der Flüssigkeiten anzusehen seien, die eigentlichen Zersetzungs Vorgänge aber im Innern der Flüssigkeit stattfinden müssen (etwa § 524). Der elektrische Strom oder, vorsichtiger, das „Agens, welches in dem, was wir elektrischen Strom nennen, ... vorhanden ist“ bildet dabei wesentlich eine „Achse“ der wirkenden Kräfte (§ 517). Für Faradays Untersuchungen bildete dementsprechend die Kontaktfläche Metall – Flüssigkeit eine entscheidende Rolle, an der ja die Gasbildung stattfindet. Um elektrochemische Effekte von solchen zu unterscheiden, die an diesen Flächen auch ohne Elektrizität auftreten, stellte Faraday umfangreiche Untersuchungen an (6. Reihe), in der u.a. die allgemeine katalytische Wirkung des Platins ausführlich behandelt wird.

Damit vergewisserte er sich seiner elektrochemischen Befunde so weit, dass er sie in der 7. Reihe in einer neuen Anordnung zusammenfassen konnte. Gleich zu Beginn wagte er sich mit einem weitreichenden Vorschlag hervor (§ 661-677): Ihm war im Laufe seiner Arbeiten deutlich geworden, wie sehr die bisherige Terminologie auf dem Felde, insbesondere die Rede von „Polen“, stets spezifische theoretische Vorstellungen nahe legte, insbesondere von anziehenden und abstoßenden Kräften, Vorstellungen, die sich als unpassend für die Formulierung von Gesetzen erwiesen, in jedem Fall aber hypothetisch waren und vor allem der Forschungsarbeit die nötige Unbefangenheit nahmen. Um dem entgegenzuwirken, schlug er deshalb vor, statt von „Polen“ künftig

14 S. dazu James, Faraday A. J. L. (1989), „Michael Faraday's First Law of Electrochemistry: How Context Develops New Knowledge“, in J. T. Stock & M. V. Orna (Hg.), *Electrochemistry, Past and Present*, Washington DC: American Chemical Society, 32-49.

15 Für eine Übersicht s. die klassische Darstellung von Ostwald, W. (1896), *Elektrochemie; ihre Geschichte und Lehre*. Leipzig: Veit & Co.

von „Elektroden“ zu sprechen, (in Form von „Anode“ oder „Kathode“), diejenigen Körper, die sich durch Elektrizität zersetzen lassen, als „Elektrolyte“ zu bezeichnen (dementsprechend auch „Elektrolyse“, „elektrolytisch“), und die Körper, die sich innerhalb der Flüssigkeit bewegen, als „Ionen“, in Form von „Anionen“ oder „Kationen“. All diese Vorschläge hatte er im Austausch mit zwei Freunden entwickelt:¹⁶ dem Cambridger Philosophen, Altertumswissenschaftler und Naturwissenschaftler William Whewell, und dem Arzt Whitlock Nickol; dabei haben stets die Ziele möglichst großer Einfachheit und Unbelastetheit von Hypothesen im Vordergrund gestanden.¹⁷ Im Anschluss daran formulierte er die nach ihm benannten Gesetze der Elektrolyse: das erste, besagte, dass die Menge des zersetzten Stoffes nur von der Menge des durchgegangenen Stromes abhängt (§ 704, 732). Entscheidend war hier das „nur“: Es hatte einen immensen experimentellen Aufwand gekostet, zu zeigen, dass eben andere Faktoren wie Größe und Material der Elektrode, Intensität und Ursprung der Elektrizität, Natur des Lösungsmittels usw. keine Rolle spielten. Umgekehrt konnte Faraday auf Grund gerade dieses Ergebnisses nun vorschlagen, die Menge der zersetzten Substanz als Maß für die Menge der Elektrizität zu verwenden – in einer Zeit, in der die Quantifizierung der Elektrizität sowohl begrifflich als auch experimentell noch weitgehend im Dunkeln tappte, war das ein entscheidender Schritt, über dessen Bedeutung sich Faraday wohl bewusst war (§ 739).

Die bis heute als „zweites Faradaysches Gesetz“ bezeichnete Regel, wonach die von gleichen Elektrizitätsmengen abgeschiedenen Stoffe einander chemisch äquivalent sind, wurde von ihm als das Gesetz von der „festen chemischen Action“ der Elektrizität eingeführt (§ 783, 806, 807, ...) und ausführlich für zahlreiche Stoffklassen aufgewiesen. Das kulminierte in einer Tabelle der Äquivalentzahlen von Ionen (wir würden von Atom-/ Molekulargewichten sprechen), für die Faraday einen detaillierten Abgleich zwischen chemischen und elektrochemischen

16 Ross, S. (1961), „Faraday consults the scholars: the origins of the terms of electrochemistry“, *Notes and Records of the Royal Society of London* 16: 187-220.

17 Brief von Faraday an Whewell vom 24. April 1834 (= Nr. 711 im Band 2 der vierbändigen *Correspondence*, s. Literaturverzeichnis am Schluss).

Verfahren durchgeführt hatte (§ 846). Seine breite Erfahrung in präziser chemischer Analytik kam ihm hier wesentlich zugute. Zu den dabei unmittelbar aufscheinenden Perspektiven auf einen evtl. atomistischen Aufbau von Materie *und* Elektrizität gleichermaßen, skizzierte er einige Überlegungen, hielt sich aber von abschließenden Folgerungen zurück (§ 852-874).

In der 8. Reihe schließlich wandte er sich vor dem Hintergrund seiner vorigen Ergebnisse der notorisch ungelösten Frage nach dem Ursprung der elektromotorischen Kraft in der Voltaschen Batterie zu. In einem detaillierten Argumentationsgang zeigte er, wie diese Aktion elektrochemisch verstanden werden konnte und sich umgekehrt daraus Rückschlüsse für die Handhabung und Verbesserung der Batterie ziehen ließen. Eine Fortsetzung fanden diese Überlegungen in der 10. Reihe, die in unmittelbarem Anschluss erarbeitet, aber erst mit einem Jahr Verzögerung gedruckt wurde. Gewissermaßen in diese Reihe elektrochemischer Arbeiten eingeschoben stellte Faraday eine Untersuchung der eigenartigen Effekte vor, die sich beim Unterbrechen eines Stromkreises ergaben, der eine Spule enthielt, aber ohne Spule eben nicht auftraten (9. Reihe). Er war dem systematisch nachgegangen und zu einem Verständnis der Befunde als spezielle Induktionseffekte gelangt, nämlich als Selbstinduktionseffekte der Spule (§ 1092). Dieser damit erstmals entworfene Begriff blieb seither zentraler Bestandteil aller Elektrizitätsforschung und -technik.

Diese ersten 10 Aufsätze entstanden innerhalb von ca. drei Jahren (1831-1834) mit einem Arbeitsaufwand, der nicht weniger monumental war als die Ergebnisse. Einige der Themen waren durchaus zu einem Abschluss gekommen. Nicht zuletzt damit mag es zu tun haben, dass nun eine längere Pause eintrat. Wohl stellte Faraday seine Ergebnisse einem breiteren Publikum vor, etwa in Vorträgen an der Royal Institution, die eigentliche Forschungsarbeit aber ruhte.

Elektrostatik. Erst gegen Ende 1835 sind in Faradays Labortagebuch wieder elektrische Experimente verzeichnet. Er hatte sich nun ein neues Thema vorgenommen: die Elektrostatik. Das war insofern gewagt, als hier die Mathematisierung und Formalisierung am weitesten fortge-

schritten war, in der Faraday keinerlei Ausbildung besaß.¹⁸ Nicht zuletzt deshalb dauerte es einige Zeit, bis er im November 1837 einen ersten Aufsatz vorlegte, dem dann allerdings rasch drei andere folgten (11. bis 14. Reihe). Als Resultat dieser Arbeiten nahm sich das Feld der Elektrostatik grundlegend anders aus als zuvor, zumindest für Faraday. Ausgangspunkt war das Phänomen der (elektrostatischen) Induktion, insbesondere die Frage, ob ein Körper elektrisch geladen werden könne, ohne dass zugleich andere in der Umgebung ebenfalls elektrische Veränderungen erfuhren (etwa § 1169). Unter den zahlreichen Apparaten und Experimenten, die er hierzu konstruierte, war auch der berühmt gewordene sog. „Faradaysche Käfig“: ein großer, ganz mit Metall überzogener Holzkasten, in den sich Faraday hineinsetzen konnte, um zu prüfen, ob er darin isolierte Körper elektrisch aufladen konnte – mit negativem Ergebnis (§ 1173). Sehr ausführlich verwendete er das empfindlichste Messinstrument der Elektrizitätsforschung – die Coulombsche Torsionswaage – und einen Apparat, den wir heute als Kugelkondensator bezeichnen würden (Tafel VII des ersten Bandes). Die Ergebnisse seiner aufwändigen Messreihen konnte er nur durch die Annahme einer „Induktion auf gekrümmten Linien“ kohärent formulieren, die er (fälschlicherweise, wie sich später zeigte) für unvereinbar mit der traditionellen Fernwirkungstheorie hielt und durch den Begriff der „Induktionslinie“ (später „elektrische Kraftlinie“) zu präzisieren suchte (§ 1231). Ebenso bemerkte er beim Variieren des zwischen den Kondensatorschalen liegenden Materials eine komplexe Abhängigkeit des Induktionseffektes vom Material, der er schließlich durch den Begriff der „spezifischen Induktionskapazität“ Rechnung trug (§ 1252, 1296) – heute sprechen wir von der „relativen Dielektrizitätskonstante“.

18 Poisson, S. D. (1812), „Mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs“, *Mémoires de la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut Imperial de France* 12 (1811): 1-92 und 163-274. S. dazu Grattan-Guinness, I. (1990), *Convolution in French Mathematics, 1800-1840*. Basel: Birkhäuser, Kap. 7.6.4. Arnold, D.H. (1983-84), „The ‚Mécanique physique‘ of Siméon Denis Poisson: the evolution and isolation in France of his approach to physical theory (1800-1840)“, *Archive of History of Exact Sciences* 28 & 29: 243-367, 37-94, 287-307. Garber, E. (1990), „Siméon-Denis Poisson: Mathematics versus Physics in Early Nineteenth-Century France“, in E. Garber (Hg.), *Beyond History of Science: Essays in Honor of Robert E. Schonfield*. London & Toronto: Associated University Presses, 156-76.