

„Electrischer Conflict“ mit Potential

Ørsted's Entdeckung des Elektromagnetismus stieß ganz unterschiedliche Entwicklungen an.

Friedrich Steinle

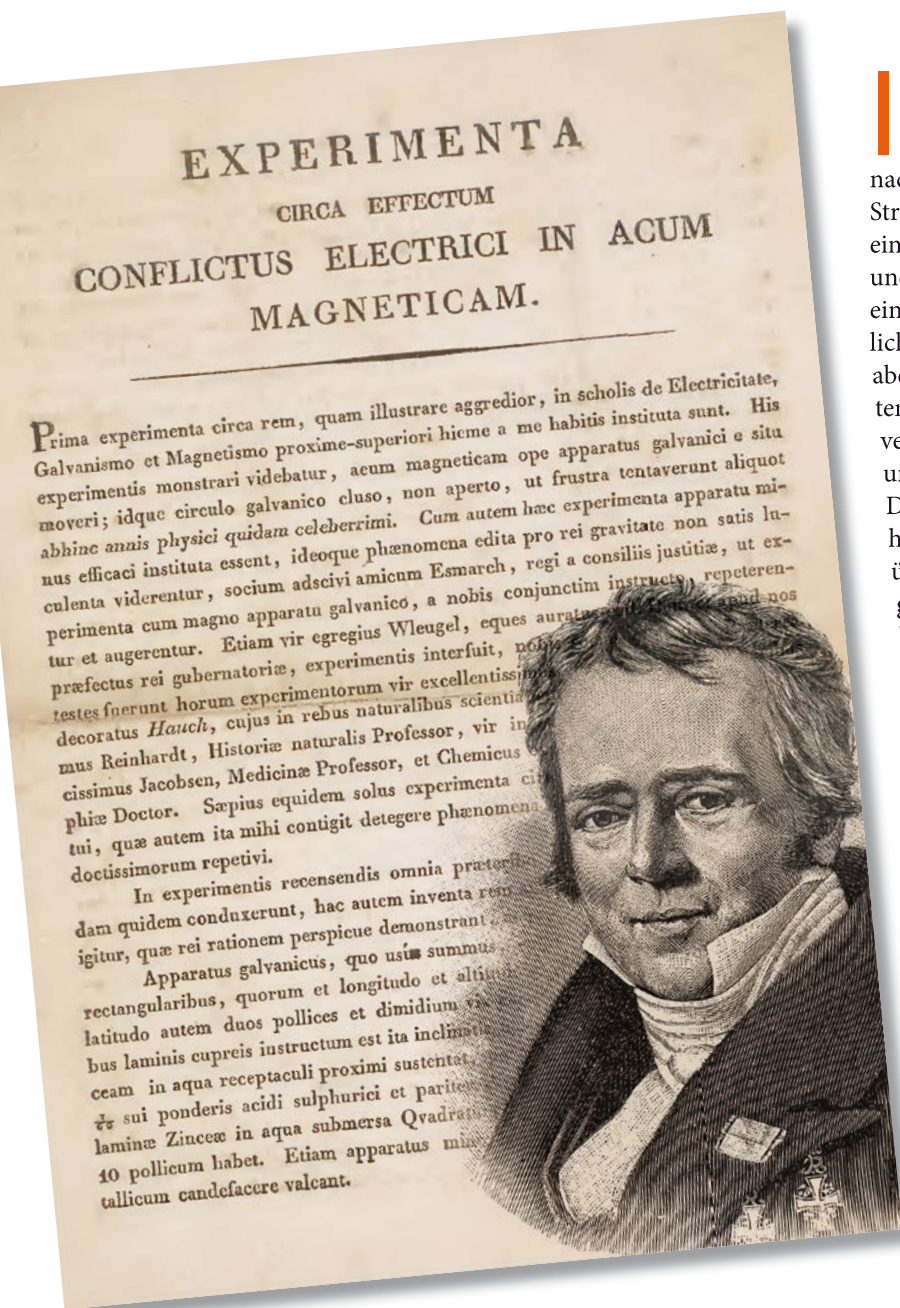


Abb. 1 Ørsted veröffentlichte seine berühmte Entdeckung auf Latein, das zwar in den Naturwissenschaften der Zeit kaum mehr verwendet, aber als integraler Bestandteil jeder universitären Ausbildung noch in ganz Europa verstanden wurde.

Am 21. Juli 1820 gab der dänische Physiker Hans Christian Ørsted eine Entdeckung bekannt, die unmittelbar eine Welle weiterer Forschungen nach sich zog. In ihrer Folge veränderte sich nicht nur die technische Welt, sondern auch das physikalische Denken fundamental.

In seiner vierseitigen Druckschrift von 1820 beschrieb Hans Christian Ørsted die Wirkung von Elektrizität auf eine Magnethülse (Abb. 1). Seit Voltas Einführung der nach ihm benannten „Säule“, der ersten kontinuierlichen Stromquelle, hatte man zwanzig Jahre lang vergeblich nach einer solchen Wirkung gesucht. Manche hatten aufgegeben und sie gar für unmöglich erklärt. Wohl wissend, dass er eine Sensation verkündete, hatte Ørsted einen ungewöhnlichen Veröffentlichungsweg gewählt: Statt des üblichen, aber langwierigen Wegs über wissenschaftliche Zeitschriften hatte er in höchster Eile auf Latein einen dichten Text verfasst, auf eigene Kosten gedruckt und an Autoritäten und Multiplikatoren der Physik in ganz Europa versandt. Das war kostspielig, aber effektiv: Binnen kürzester Zeit hatten andere den Text in viele europäische Sprachen übersetzt und in allen wichtigen Fachzeitschriften abgedruckt. Damit war die Entdeckung in Europa breit bekannt und fest mit Ørsted's Namen verbunden.

Dieser hatte sich in der väterlichen Apotheke schon früh für Naturwissenschaft interessiert. Während seines Pharmaziestudiums in Kopenhagen beschäftigte er sich mit der idealistischen Naturphilosophie, die – bisweilen spekulativ – von einer Beziehung zwischen natürlichen und geistigen Dimensionen ausging. Prägend für sein wissenschaftliches Arbeiten war ein Aufenthalt von 1801 bis 1804 in deutschen Ländern und in Frankreich. Er vertiefte seine Beziehung zur später „romantisch“ genannten Physik mit ihrer Überzeugung vom Zusammenhang aller Naturkräfte und schloss Freundschaft mit ihrem naturwissenschaftlich produktivsten Vertreter, Johann W. Ritter, der unter anderem die UV-Strahlung entdeckt und die Elektrochemie mitbegründet hatte. Ørsted schätzte diesen weiten Denkraum, bestand aber zugleich immer auf nüchternen Empirie. Der mathematisch orientierten Physik, die er in Paris kennenlernte, konnte er nicht viel abgewinnen. Ab 1806 war er Professor in Kopenhagen, ab 1815 überdies Sekretär der Königlich Dänischen Gesellschaft der Wissenschaften.

Als eine der einflussreichsten Persönlichkeiten in der dänischen Naturforschung initiierte er die Einrichtung einer Polytechnischen Lehranstalt in Kopenhagen. Seine Forschungen richteten sich auf Chemie (so entdeckte er das Aluminium), Elektrizität, Galvanismus, Magnetismus und Elektromagnetismus, aber auch auf akustische Figuren, Kompressibilität von Wasser, Kapillarität, Wärme- und Lichttheorie [1]. Die idealistischen Überzeugungen blieben ihm erhalten: 1850 veröffentlichte er das umfangreiche Werk „Aanden i Naturen“ („Der Geist in der Natur“).

Ein neues Forschungsfeld

Ganz im Sinne der „romantischen“ Physik war Ørsted davon überzeugt, dass auch zwischen Elektrizität und Magnetismus eine Wechselwirkung bestehen müsse. An experimentelle Untersuchungen machte er sich allerdings erst im Frühjahr 1820 und vor allem in einer mehrwöchigen Arbeitsperiode im Juli [2]. Er stellte fest, dass ein gestreckter Draht eine in der Nähe befindliche Magnetnadel aus der Ruhelage ablenkte, wenn er mit den Enden eines galvanischen Elementes verbunden wurde. Aus seinen Laboraufzeichnungen wird klar, wie intensiv Ørsted experimentierte, um den Effekt regelhaft zu erfassen: Er variierte Materialien, Drahtlänge und -stärke, Batteriestärke und die räumlichen Konstellationen (**Abb. 2**) – ein markanter Fall eines „explorativen“ Experimentierens in unbekanntem Terrain.

Dabei ging es um experimentelle Schwierigkeiten, aber vor allem um die begriffliche Erfassung: Physikalische Wirkungen wurden bisher als Anziehung und Abstoßung gedacht, aber so ließ sich der neue Effekt gerade nicht fassen. Um die drei Raumrichtungen von Draht, Nadel und ihrer Bewegung in Zusammenhang zu bringen, gab es keine entwickelte Begrifflichkeit. Ørsted nahm hilfsweise auf die Himmelsrichtungen Bezug und beschrieb die zwei möglichen Richtungen im Verbindungsdraht der Batterie (die Rede von „Strom“ schien ihm zu theoretisch belastet) durch Bezugnahme auf die beiden Pole. Die Vorgänge im Draht nannte er „elektrischen Konflikt“ und postulierte, dass dieser sich über den Draht hinaus in dazu senkrechten Kreisen ausbreite. Leicht zu lesen war der Bericht wahrlich nicht.

Gleichwohl war die Reaktion in Europa fulminant. Allerorten wurde das Experiment nachgebaut und variiert, zahlreiche Berichte veröffentlicht, ganze Journalhefte dem Elektromagnetismus gewidmet. Ørsteds Systematisierungsversuch mit dem Verweis auf Kreise fand allerdings ebenso wenig Resonanz wie sein Begriff des elektrischen Konflikts. Nicht nur der Befund als solcher faszinierte, es gab rasch auch Anwendungsideen: An fünf verschiedenen Orten in Europa wurden unabhängig voneinander Instrumente vorgeschlagen, die den Effekt durch Mehrfachwindungen verstärkten und zur Quantifizierung des Batterieeffekts, also der Stromstärke, nutzten und bald als Galvanometer bezeichnet wurden. Gleich im Oktober 1820 schlug Ampère in Paris die Konstruktion eines elektromagnetischen Telegraphen vor – die gesellschaftliche Bedeutung und der militärische Nutzen der bis dato optischen Telegraphie war in den Napoleonischen Kriegen überdeutlich geworden. In Anbetracht eines neuen Forschungsfeldes herrschte Aufbruchstimmung in Europa. Allerdings waren die Reaktionen im Einzelnen lokal sehr unterschiedlich.

Mathematisierung in Paris

Am markantesten zeigte sich das in Paris, wo das Denken in Begriffen von Anziehung und Abstoßung mathematische Ausdrucksformen erhalten hatte – allen voran in der Himmelsmechanik, aber nach diesem Vorbild auch in Elektrizität (Elektrostatik), Magnetismus, Optik, Wärmelehre oder Kapillaritätsforschung. Namen wie Coulomb, Poisson,

Biot, Dulong oder Malus illustrieren die Prominenz und den Erfolg des Programms einer „Laplaceschen Physik“ [3], das sich seit dem späten 18. Jahrhundert mit Unterstützung Napoleons etabliert hatte. Eine Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus hatte darin keinen Platz und war trotz sorgfältiger Experimente auch in Paris nicht gefunden worden. Nicht von ungefähr taten viele Pariser Akademiker als einzige in ganz Europa den Bericht Ørsteds zunächst als blanken Unsinn ab: Das Urteil „encore une reverie allemande“ zielte auf die verpönte Naturphilosophie. Erst nach erfolgreichem Vorführen folgte die Anerkennung. Noch herausfordernder war die Abhängigkeit des Effekts von anderen, schwer zu fassenden räumlichen Parametern. Nicht umsonst hob François Arago, der den Effekt in Paris vorführte, gerade diesen Befund besonders hervor [4].

Vor dem Hintergrund dieser Herausforderung entstand in Paris ein Wettlauf: Jean-Baptiste Biot, Professor für Physik am renommierten Collège de France, war als exponierter Vertreter der Laplaceschen Schule zentral gefordert, konnte aber erst verspätet seine Arbeit aufnehmen und ging dann umso hektischer daran. Zusammen mit seinem Assistenten Felix Savart unternahm er Messungen der Abstandsabhängigkeit der Kraft zwischen Draht und Magnetnadel (**Abb. 3**). Abweichend vom Standardprogramm musste er als weiteren Parameter den Winkel ω zwischen Draht und Schwingungsebene der Magnetnadel einführen und stellte nach drei Monaten ein mathematisches Gesetz vor, das wir in moderner Notation als Biot-Savart-Gesetz kennen: $F \sim \sin \omega / r^2$. Die räumliche Komplexität der Effekte blieb in dieser hochsymmetrischen experimentellen Konstellation weitgehend außen vor.

Einen ganz anderen Zugang hatte sein schärfster Konkurrent genommen: André-Marie Ampère, Mathematikprofessor an der École Polytechnique, teilte zwar das Ideal der Mathematisierung, befand aber den spezifischen Zugang der Laplaceschen Schule als zu eng und voraus-

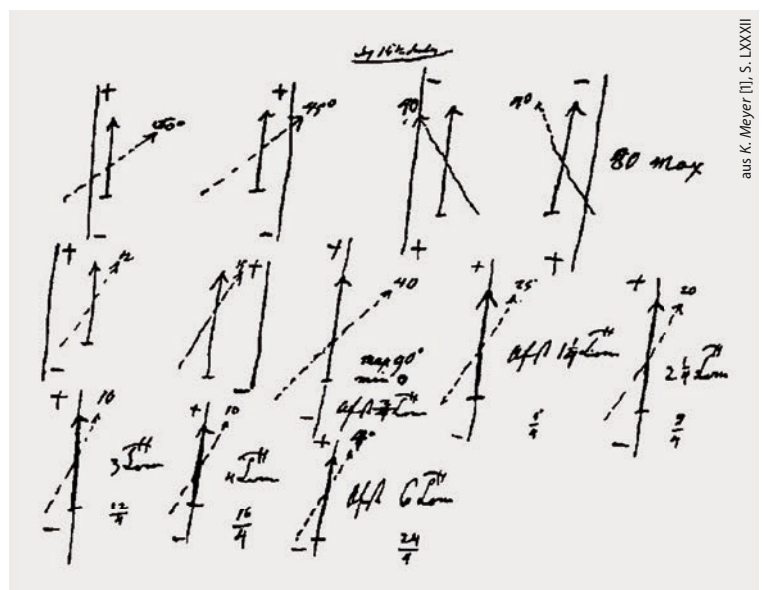


Abb. 2 Mithilfe graphischer Darstellungen versuchte Ørsted, das Verhalten der Magnetnadel in Regeln zu fassen.

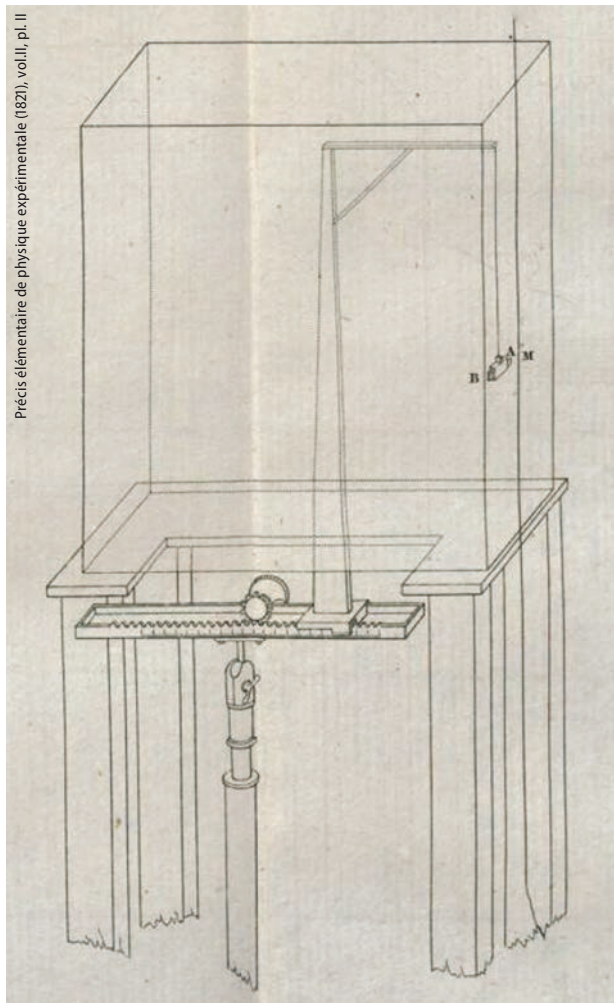


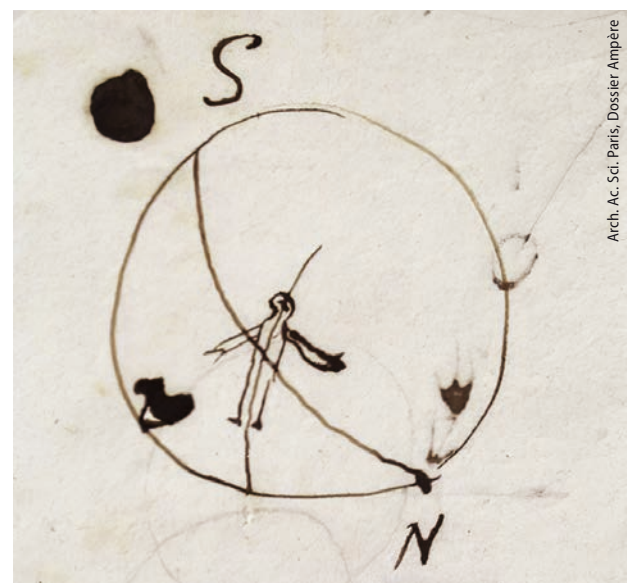
Abb. 3 Um die Abhängigkeit der Kraft vom Abstand zwischen Draht und Magnet zu messen, bestimmte Biot die Frequenz der Schwingungen des Stabmagneten AB als Funktion des variablen Abstands zum Draht. Die zeitliche Instabilität der Batterie erforderte ausgeklügelte Messroutinen und Interpolationsverfahren. Die gemessene $1/r$ -Abhängigkeit rechnete Biot in eine $1/r^2$ -Abhängigkeit für die Wechselwirkung zwischen punktförmigen Elementen um.

setzungsreich. Die Schwierigkeit mit dem neuen Effekt schien diese Beschränktheit zu illustrieren. Ampère ging mit Feuereifer an seine Untersuchung, obgleich er anders als Biot nie experimentiert und auch keinen Zugang zu Laboratorien hatte. Unter erheblichen eigenen Kosten kooperierte er mit einem Instrumentenbauer und profitierte von dessen Erfahrung. Ampère ist vor allem als Begründer der Elektrodynamik bekannt, und erst seit kurzem wissen wir, dass er mit einer ganz anderen Forschungsagenda eingestiegen war [5]. Er nahm die Komplexität von Ørsted's Befund zentral in den Blick und versuchte, die Wirkung des Drahts auf die Nadel in allgemeine Regeln zu fassen. Schon nach wenigen Tagen hektischer Arbeit formulierte er, dass der Nordpol der Nadel sich immer in Richtung „rechts vom Strom“, der Südpol hingegen nach „links vom Strom“ bewegte. Es ist höchst charakteristisch für die begriffliche Situation der Zeit, dass er neue physikalisch-geometrische Begriffe erfand, um den Effekt zu erfassen: „Rechts“ und „links“ vom Strom wurde durch die Rechts-Links-Richtungen eines Schwimmers illustriert, der sich in Draht- und Stromrichtung befand und dessen Blick zur Magnetnadel gerichtet war. Bis weit ins

20. Jahrhundert hinein war in Physiklehrbüchern von der „Ampèreschen Schwimmerregel“ die Rede.

Angeregt durch das Bild des Schwimmers gelangte Ampère auch zur Hypothese, dass der Erdmagnetismus auf gigantischen elektrischen Kreisströmen im Erdinnern beruhen könnte (**Abb. 4**). In kühner Verallgemeinerung dehnte er die Hypothese sogleich auf allen Magnetismus und mikroskopische Kreisströme aus. Er setzte enorm viel Geld und Arbeit ein, um sie zu testen, und hatte nach nur drei Wochen einen ersten Erfolg: Er konnte zeigen, dass zwei stromführende Spiralen sich bei gleicher Stromrichtung anzogen, bei verschiedener Stromrichtung abstießen. Damit war nicht nur nochmals ein neuer Phänomenbereich entdeckt, den Ampère sogleich als „Elektrodynamik“ bezeichnete, sondern vor allem ein möglicher Weg zu der in Paris so hoch geschätzten Mathematisierung in Aussicht gestellt. Mit dieser Perspektive änderte Ampère abrupt seine Forschungsrichtung: Er brach das Explorieren der räumlichen Komplexität ab und fokussierte sich nur auf das Formulieren eines mathematischen Gesetzes der Anziehung und Abstoßung von Strömen. Seine berühmte „Stromwaage“ war dazu nur der erste Schritt. Wie die Laplacesche Schule ging er von mikroskopischen Kraftzentren aus, versah diese aber entgegen der Tradition mit Raumrichtungen und stellte nach weiteren Experimenten und Postulaten im Dezember 1820 ein Kraftgesetz vor – fast zeitgleich mit Biot. In den nächsten Jahren verfeinerte er die mathematische Formulierung (**Infokasten**) und stellte das Gesetz 1826 zusammenfassend dar [6]. In kurzer Zeit entstanden somit in Paris unterschiedliche Mathematisierungen des neuen Feldes, und zugleich geriet die experimentelle Breite und Komplexität aus dem Blick.

Abb. 4 Auf einem Notizzettel skizzierte Ampère seine Überlegung zur Ablenkungsrichtung der Magnetnadel und zu den terrestrischen Kreisströmen.



Explorieren und neue Begriffe

Andernorts in Europa stand hingegen gerade diese Vielfalt der Erscheinungen im Fokus, und dabei ging es nicht weniger begrifflich-konzeptuell zu. Stellvertretend sei ein besonders markanter Fall in London skizziert. Im Sommer 1821 war das Feld des Elektromagnetismus schon so breit und unübersichtlich geworden, dass der Herausgeber der wissenschaftlichen Zeitschrift „Annals of Philosophy“ einen jungen, chemischen Analytiker bat, den Stand der Forschung in einem Überblicksartikel zusammenzufassen. Michael Faraday, aus einfachen Verhältnissen stammend und nur mit elementarer Schulbildung, hatte sich während seiner Buchbinderlehre autodidaktisch in die Chemie eingearbeitet und war seit 1813 als Gehilfe im Labor der Royal Institution of London, eines privaten Vereins zur Volksbildung, angestellt. Die brillanten Vortragserfolge des Chemikers Humphrey Davy hatten dem Verein so viel Geld eingespielt, dass Davy das Labor zu einem der bestausgestatteten in Europa ausbauen konnte. Der durchaus ehrgeizige Faraday nahm die Herausforderung an: Er arbeitete sich in das ihm neue Feld durch umfassende Lektüre und eigenes Experimentieren ein. Neben dem Labor nutzte er auch die hervorragende Bibliothek der Royal Institution und verfasste mit dem „Historical Sketch of Electro-Magnetism“ (1821) den bis dato umfangreichsten Bericht zum Stand des Feldes. Die mathematische Behandlung durch Ampère blieb ihm zwar verschlossen, aber nicht dessen Exploration der räumlichen Konstellation. Er erfand zahlreiche Darstellungsweisen, um diese visuell in einiger Allgemeinheit darstellen zu können (Abb. 5) – ein Verfahren, das er zeit lebens außerordentlich produktiv verwendete.

Überdies erkannte er scharf den Punkt, an dem Ampère sein Unterfangen unfertig hatte liegen lassen: Die Untersuchung der Konstellationen, in denen der Batteriedraht nicht parallel, sondern senkrecht zur Rotationsebene der Magnetnadel verlief. In einer an den Bericht anschließenden Arbeitsphase wandte sich Faraday diesem Problem ausführlich zu. In engster Verschränkung von experimen-

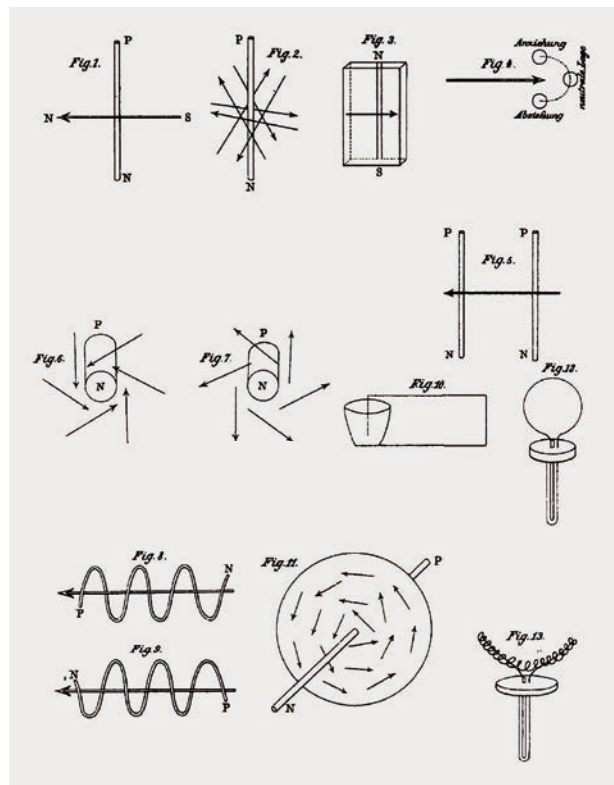


Abb. 5 Faraday erreichte allgemeine Formulierungen elektromagnetischer Regelmäßigkeiten mithilfe eines äußerst flexiblen Wechsels zwischen verschiedenen raumgeometrischen Darstellungen.

tellem Arbeiten und fortwährender Schematisierung der Befunde in wechselnden Darstellungsformen gelangte er zu der markanten Entdeckung, dass ein Magnetpol um einen Batteriedraht rotierte und umgekehrt [8] (Abb. 6). Damit hatte er erstmals eine kontinuierliche elektromagnetische Rotation realisiert – eine Art Motor – und Ørstedts Vermutung von Kreisen eine ganz unerwartete Realisierung gegeben. Viel weitergehend kam er auch zu der Überzeugung, dass nicht Anziehung und Abstoßung, sondern diese Rotationsbewegung zwischen Magnetpol und Draht der

Ampères Formeln

Ampère hatte bei der Entwicklung eines Kraftgesetzes zwischen Stromelementen zunächst direkte Messungen geplant, die sich allerdings als nicht realisierbar erwiesen. Stattdessen formulierte er ein Additionspostulat, das ihm erlaubte, von qualitativen Befunden auszugehen: Volle Anziehung bei parallelen, volle Abstoßung bei antiparallelen und keine Wechselwirkung bei orthogonalen Stromelementen. Die erste Formulierung in Winkelfunktionen verallgemeinerte er später durch die Einführung von Richtungsableitungen.

- **25. September 1820 – Grundidee:** reine Zentralkräfte (kein Drehmoment!) zwischen infinitesimalen Stromelementen, abhängig von der Winkelkonstellation
- **Anfang Oktober – erste Vermutung zur mathematischen Gestalt** (nicht veröffentlicht): $F \sim 1/r^2 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma$
- **Oktober:** Die direkte Messung der Winkelabhängigkeit erweist sich als nicht durchführbar.
- **Oktober/ November – Postulat eines „Additionsprinzips“:** Ein Stromelement lässt sich in drei orthogonale „Komponen-

ten“ zerlegen. Die von einem Stromelement ausgeübte Kraft ist identisch mit der Überlagerung der Kräfte, welche die Komponenten ausüben. Plausibilität wird später durch eine makroskopische Apparatur nachgereicht. Mit dem Postulat kann die Gesamtkraft auf die Kräfte zwischen parallelen, antiparallelen und orthogonalen Stromelementen zurückgeführt werden.

- **4. Dezember 1820 – erste publizierte Version des Kraftgesetzes:** $F = gh/r^2 \cdot (\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + n/m \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta)$
Der zweite Term erfasst die Wirkung aufeinander senkrecht stehender Ebenen. Ampère fügt den Term der Allgemeinheit halber hinzu, geht aber von seinem Verschwinden aus.
- **März bis Juni 1822 – schrittweise Verallgemeinerung:**
Umschreiben in differentielle Form:
 $dF = ii' ds ds' (\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + k \cos\alpha \cdot \cos\beta) / r^2$
Verallgemeinern der trigonometrischen Funktionen durch Richtungsableitungen:
 $dF = -ii' ds ds' \cdot r^{1-n-k} / (1+k) \cdot \partial^2(r^{1+k}) / \partial s \partial s'$

Basiseffekt aller elektromagnetischen Wechselwirkung sei. Er zeigte, wie sich alle elektromagnetischen Bewegungen darauf „zurückführen“ ließen. Wenngleich dieser grundlegende Punkt kaum Widerhall fand, rief die Entdeckung der Rotationsbewegung großes Echo hervor, so etwa bei Ampère, mit dem Faraday trotz aller Rangunterschiede sogleich kommunizierte. Faraday erlangte große Bekanntheit, und die Entdeckung bildete zusammen mit seinen chemischen Erfolgen (unter anderem der Verflüssigung von Chlor und anderen Gasen) die Grundlage für seine Aufnahme in die Royal Society 1824.

Eine prägende Anfangsphase

In der kurzen Spanne von anderthalb Jahren hatte das durch Ørsted eröffnete Feld des Elektromagnetismus eine bemerkenswerte Entwicklung genommen. Experimentelle Verfahren hatten sich stabilisiert, neue Effekte waren entdeckt, Galvanometer entwickelt worden, und technische Perspektiven zeichneten sich ab. Der Londoner Mathematiker Peter Barlow stellte 1822 den Rotationseffekt in einer leichter zu handhabenden Form dar, Motoren mit Kraftabgabe nach außen wurden ab den späten 1820er-Jahren entwickelt. William Sturgeons Erfindung eines Elektromagneten (1824) stieß eine technische Entwicklung an, die ihrerseits für die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion (Faraday 1831) und darauf aufbauend des elektromagnetischen Gene-

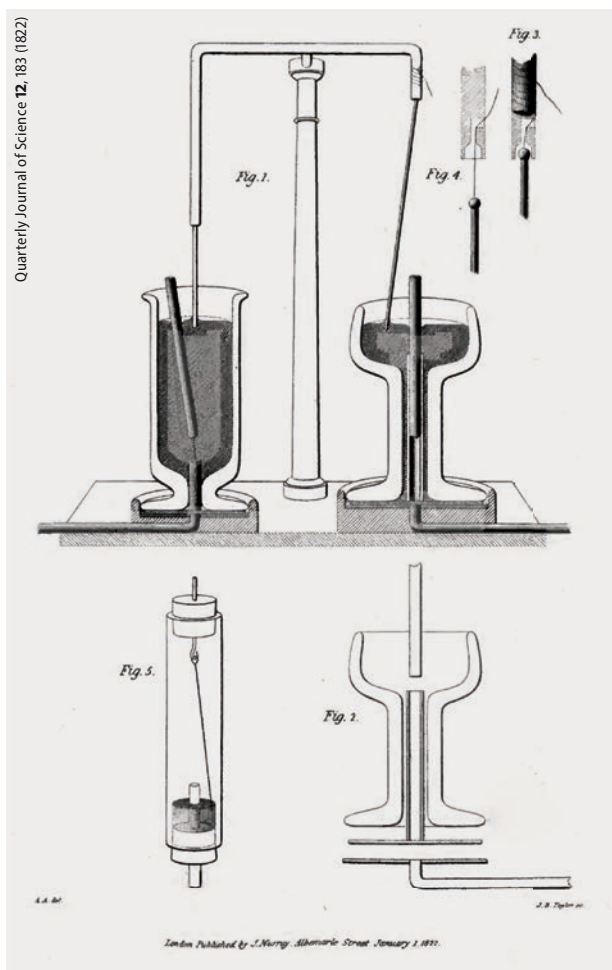


Abb. 7 Aus den späteren Jahren von Hans Christian Ørsted existiert diese Daguerreotypie.



Nordiska museet Stockholm / Mats Landin (Wikimedia CC0.1.0)

rators (Pixii 1832) wichtig wurde. In großem Maßstab sollte sich die Technik dann in den 1830er-Jahren entwickeln.

Auch zur begrifflichen Erfassung des Elektromagnetismus zeigte sich im Frühjahr 1822 eine markante Konstellation unterschiedlicher Herangehensweisen, exemplifiziert durch die vier genannten Forscher. Ørsted, Ampère (in seiner ersten, bald abgebrochenen Arbeitsphase) und Faraday ging es vor allem darum, die Komplexität des neuen Effektes experimentell zu explorieren und zu erfassen. Dafür bildeten sie neue Begriffe, vor allem um die räumlich-geometrischen Verhältnisse zu erfassen. In unterschiedlich starker Ausprägung lässt sich eine solche explorative Herangehensweise für die meisten Forscher in Europa konstatieren. Demgegenüber stand – zunächst ausschließlich in Paris – ein Vorgehen, das die an der Himmelsmechanik entwickelten, analytischen Verfahren auf Elektromagnetismus und Elektrodynamik erweiterte und dazu von wenigen, spezifischen experimentellen Befunden ausging, die der Messung und mathematisch-analytischen Auswertung zugänglich waren, aber die Breite und hohe Komplexität der elektromagnetischen Konstellationen außer Acht ließen. Diese beiden Forschungsansätze sollten sich in den folgenden Jahrzehnten nicht auflösen, sondern verschieben, zuspitzen und in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in den Antagonismus zwischen den mit traditionellen Begriffen arbeitenden Fernwirkungstheorien à la Weber und Neumann und der durch Faraday entwickelten und durch Maxwell mit neuen Verfahren mathematisierten Feldtheorie münden – eine in dieser Ausprägtheit durchaus einzigartige Konstellation wissenschaftlichen Wissens.

Der Elektromagnetismus illustriert in besonders markanter Weise, dass unterschiedliche wissenschaftliche Denkrahmen (man könnte mit Ludwik Fleck von Denkstilen oder mit Thomas Kuhn von Paradigmen sprechen)

Abb. 6 Den neu entdeckten Rotationseffekt zwischen Magnetpol und Draht stellte Faraday in einem Apparat in seinen beiden reziproken Varianten dar. Zur leichteren Reproduzierbarkeit versandte er überdies kleine „Hand-Rotatoren“.

ein und dieselbe Entdeckung nicht nur unterschiedlich interpretieren, sondern auch zu verschiedenen, ja divergierenden Entwicklungen Anstoß geben können. Nicht dass Ørsted 1820 davon etwas wissen konnte, aber das hohe Potenzial seiner Entdeckung hatte er wohl erkannt, wenn er beim Versand seiner Druckschrift vermutete, dass „die Folgen meiner Entdeckung sehr weitreichend sein könnten“ [9].

Anmerkungen und Literatur

- [1] Zu Oersteds Leben siehe: *K. Meyer*, H. C. Oersted: Naturvidenskabelige Skrifter – Scientific Papers, Kopenhagen 1920, Introduction; *R. M. Brain*, *R. S. Cohen* und *O. Knudsen* (Hrsg.), Hans Christian Ørsted and the Romantic Legacy in Science, Springer, Dordrecht (2007); *D. Christensen*, Hans Christian Ørsted: Reading Nature's Mind, Oxford (2013). Eine Auswahl seiner naturforschenden Arbeiten findet sich in englischer Übersetzung in: *K. Jelved*, *A. D. Jackson* und *O. Knudsen* (Hrsg.), Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted, Princeton University Press, Princeton (1998)
- [2] Zum Entdeckungsweg siehe etwa: *H. A. M. Snelders*, Oersted's Discovery of Electromagnetism, in: *A. Cunningham* und *N. Jardine* (Hrsg.), Romanticism and the Sciences, Cambridge University Press, Cambridge (1990), S. 228
- [3] *R. Fox*, Historical Studies in the Physical Sciences **4**, 89 (1974)
- [4] *F. Arago*, Annales de chimie et de physique **14**, 418 (1820)
- [5] *F. Steinle*, Explorative Experimente, Steiner, Stuttgart 2005 (engl. Version Pittsburgh University Press 2016), darin weiterführende Literaturangaben
- [6] Ausführliche Untersuchung von Ampères Veröffentlichungen: *C. Blondel*, A.-M. Ampère et la création de l'électrodynamique (1820 –

1827), Bibliothèque Nationale, Paris (1982)

- [7] Eine Rekonstruktion des Entdeckungsweges und weitere Literatur gibt Steinle, [5], Kap. 6
- [8] *M. Faraday*, Quarterly Journal of Science **12**, 74 (1821)
- [9] Ørsted an Christopher Hansteen, 22. Juli 1820, in: *M. D. Harding* (Hrsg.), Correspondance de H. C. Ørsted avec divers savants, H.Aschehoug & Co, Copenhagen (1920), Bd. I, S. 120

Der Autor



Friedrich Steinle studierte Physik in Karlsruhe und promovierte 1990 in Geschichte der Naturwissenschaften an der U Tübingen, gefolgt von Forschungsaufenthalten in Göttingen, Paris, Cambridge (MA) und am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. 2000 habilitierte er an der TU Berlin. 2004 übernahm er eine Professur an der U Lyon I und wechselte im selben Jahr an die U Wuppertal, bevor er 2009 eine Professur für Wissenschaftsgeschichte an der TU Berlin übernahm. Seine Forschungsinteressen sind Geschichte und Philosophie des Experiments, von Elektrizität und Magnetismus und Farbenforschung.

Prof. Dr. Friedrich Steinle, TU Berlin, Institut für Philosophie, Literatur-, Wissenschafts- & Technikgeschichte, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin



In the Art of Making Lasers

High performance lasers
with dependable
excellence



C-WAVE. Tunable Lasers.



Cobolt. Single & Multi-line Lasers.



C-FLEX. Laser Combiners.