

Das technische Experiment am Beispiel des Elektromotors im Kontext von Naturwissenschaft, Geschichte und Didaktik

Peter Röben, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Bislang unveröffentlichtes Manuskript zum gleichnamigen Vortrag auf der GDGP-Schwerpunkttagung Experimentieren in Münster, 29.5.2015

Im Folgenden soll das technische Experiment und seine Bedeutung für die Didaktik betrachtet werden. Dem Unterschied zwischen einer technischen und einer naturwissenschaftlichen Perspektive auf das Experiment soll hier einige Aufmerksamkeit gewidmet werden. Daraus ergeben sich nämlich wichtige Hinweise für eine didaktische Interpretation des Experiments und des Experimentierens. Um die Unterschiede an einem konkreten Beispiel hervorzuheben, habe ich mich für den Elektromotor als Objekt von technischen und naturwissenschaftlichen Experimenten entschieden. Denn er ist sowohl in der Physik als auch in der Technik anzutreffen und seine Entwicklung und Verbreitung spielte eine große Rolle bei der Abspaltung der Elektrotechnik von der Physik als eigenständige ingenieurwissenschaftliche Disziplin¹. Die Unterschiede der Verschiedenen Perspektiven von Physik und Ingenieurwissenschaft werden vielleicht deutlicher, wenn das Objekt der Betrachtung gleichbleibt.

Zur Differenz zwischen Technik und Physik

In der heutigen Zeit fällt es schwer, zwischen den verschiedenen naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen an den Universitäten scharfe Scheidelinien auszumachen. An der Universität Oldenburg gibt es z.B. das Zentrum für Windenergieforschung ForWind². Nicht nur arbeiten in den Arbeitsgruppen Physiker und Ingenieure eng zusammen, sondern die Gegenstände, die erforscht werden, lassen sich kaum noch einer Wissenschaft allein zuordnen. Das liegt daran, dass man beim Bau und Weiterentwicklung von Windturbinen auf die Physik genauso angewiesen ist wie auf die Ingenieurwissenschaften, z.B. den Maschinenbau. Bei der Realisierung von technischen Artefakte, wie den Flügeln der Windturbine, stößt man auf ungelöste physikalische Probleme, wie z.B. die genaue Bestimmung des Strömungsfelds an einem Flügel. Die statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten wird in den zurzeit in der Industrie verwendeten Modellen extrem vereinfacht. So treten große Veränderungen der Windgeschwindigkeiten in realen physikalischen Messung alle paar Tage auf, während sie nach den Modellen nur alle 1000 Jahre auftreten sollten (vgl. Peinke, Heinemann und Kühn 2014). Mit anderen Worten: „Interessanterweise gibt es in der wissenschaftlichen Literatur keine überzeugenden Konzepte dazu, was Windböen sind.“ (a.a.O., S. 37). Die Weiterentwicklung der Technik erfordert also die Weiterentwicklung der benötigten physikalischen Grundlagen, insbesondere wenn es darum geht, die Turbulenz in Gestalt von Windböen technisch in den Griff zu bekommen. Andererseits liefern Fortschritte in der Physik immer wieder neue Grundlagen für die Weiterentwicklung der Technik.

Diese grundsätzlichen Unterschiede der technischen und naturwissenschaftlichen Wissenschaften in Hinblick auf das Ziel des Erkenntnisprozesses führen natürlich auch zu Unterschieden beim Experiment

¹ 1883 wurde Erasmus Kittel an der TH Darmstadt auf den ersten Lehrstuhl für Elektrotechnik berufen. Weiter unten im Text wird berichtet, dass der erste „richtige“ Elektromotor 1834 geschaffen wurde. Erstaunlicherweise kam man in der Vergangenheit also fast 50 Jahre ohne universitäre Elektrotechnik aus und das obwohl es ab 1800 die erste Stromquelle (die Voltasäule) gab, die zusammen mit der Entdeckung des Elektromagnetismus 1820 durch Örsted eine der Grundlagen für die elektrische Telegrafie legt, die ab ca. 1832 einen raschen Aufschwung nahm und schon 1866 die Kontinente Amerika und Europa durch ein im Atlantik verlegtes Kabel verband.

² <https://www.forwind.de/>

selbst. Doch bevor darauf eingegangen wird, soll zunächst kurz dargelegt werden, was hier aus technikdidaktischer Perspektive unter dem Begriff Experiment verstanden wird.

Das Experiment

Eine naive Vorstellung über das Experiment besagt, dass die Natur in ihm zu uns spricht. Und das, was sie uns da mitteilt, wurde am Beginn der Neuzeit als Enthüllung eines Geheimnisses verstanden, dessen Kenntnis einen enormen Machtzuwachs darstellt. Aber wie das so ist: Geheimnisse werden nicht einfach preisgegeben, sondern es bedarf einer gewissen Überredungskunst:

„Schon in dem bürgerlichen Leben treten der Verstand und die geheimen Neigungen und Empfindungen der Seele bei Demjenigen, der in das Treiben desselben gestellt ist, besser hervor, als bei Dem, der fern davon steht, und ähnlich offenbaren sich die Geheimnisse der Natur mehr dem Pressen und Drängen der Kunst, als wenn Alles in seinem natürlichen Laufe fortgeht.“ (Bacon Organon 98)

Dieses Pressen und Drängen darf man allerdings nicht missverstehen:

„Wissen und Können fällt bei dem Menschen in Eins, weil die Unkenntnis der Ursache die Wirkung verfehlen lässt. Die Natur wird nur durch Gehorsam besiegt; was bei der Betrachtung als Ursache gilt, das gilt bei der Ausführung als Regel.“ (Bacon Organon 3)

Es ist also schon ein Interesse am Werk, wenn man sich der Natur so zuwendet, wie es Bacon hier beschreibt. Interesse macht sich als Aufmerksamkeit geltend und beim Übergang von der Wahrnehmung zur Beobachtung findet eine Fokussierung statt, also eine Zielgerichtetheit, ein Ausrichten, das schon mehr als Tun zu verstehen ist und nicht mehr nur als ein Geschehen.

Der Übergang zum Experiment besteht in der zielgerichteten Veränderung von Realität und der Beobachtung der Folgen. Wissen wird aus dem Experiment aber erst dann geschöpft, wenn die Folgen vor dem Hintergrund der Erwartungen interpretiert werden. Ohne dieses geistige Tun der Interpretation lässt sich den empirischen Daten nichts Wissenswertes entnehmen.

Der experimentelle Akt in dieser Keimform ist allerdings noch keine wirkliche Wissenschaft. Dazu wird erst durch Anforderungen, die den Umkreis der Subjektivität des Einzelnen überschreiten. Als erstes wäre da die Wiederholbarkeit zu nennen: Lässt sich das, was man einmal durch den experimentellen Eingriff an Folgen bewirkt hat, wiederholen? Weitere Anforderungen der Wissenschaft betreffen die Angaben über den Eingriff und die Angaben über die Folgen: Lassen sie sich auch von anderen Subjekten wiederholen? Kann man Angaben über ihre Größe unabhängig von der subjektiven Wahrnehmung machen, lassen sich also Maße für die Größe des Eingriffs und die Stärke ihrer Wirkung angeben? In den Tempel der Wissenschaft zieht das Experiment erst dann vollständig ein, wenn die Erwartungen über seinen Ausgang auf der Basis einer Theorie formuliert werden.

Da mit dem Fortschreiten in den Wissenschaften der Bestand an gesichertem Wissen immer weiter wächst, gehen auch in die Experimente immer mehr Wissensinhalte ein, deren Kenntnis vor allem bei der Interpretation der Messdaten vorausgesetzt werden muss, damit die in der Wissenschaft gezogenen Schlussfolgerungen nachvollzogen werden können.

Grundsätzlich muss man bei einem Experiment unterscheiden, was als gesichertes Wissen eingeht und was als Annahme. Bei einer Messung des elektrischen Stroms gehen z.B. die im Amperemeter verwendeten Gesetzmäßigkeiten zur Realisierung der elektrischen Messung als gesichertes Wissen verdinglicht im technischen Aufbau des Messgeräts ein. Zudem muss die technische Realisierung des

Messgerätes und das Verfahren seines Einsatzes während der Messung sicherstellen, dass der mit ihm durchgeführte Messprozess, wirkliche Messdaten liefert und keine Hausnummern.

Das unsichere Wissen geht in Form einer Hypothese ein, d.h. eine schon auf das Experiment bezogene Frage, die als Folie für die Interpretation der Resultate des Experiments verwendet werden kann. Ohne die durch die Frage in die Welt gebrachte Zielrichtung wäre nicht erklärbar, ob der Versuchsaufbau tatsächlich die Daten liefert, deren Interpretation in nachvollziehbaren Zusammenhang mit der Hypothese gebracht werden kann. Am Beispiel des berühmten und wohl auch in den Schulen häufig behandelten Experiments zur Elementarladung: Nur durch die Hypothese einer nicht weiter teilbaren Elementarladung und ihrer Vielfachen werden die beobachteten Verteilungen der Geschwindigkeiten zu einem experimentellen Beleg der Elementarladung. Dieses Experiment eignet sich eigentlich hervorragend, um die Elementarladung überhaupt empirisch greifbar zu machen, es wird in den Schulen aber wohl vorrangig zur *Berechnung* des Werts der Elementarladung verwendet. Aus Schülersicht wird damit bloß ein Wert reproduziert, den man in jedem Tabellenbuch nachschlagen kann. Aber das die eigenen Messergebnisse ein Muster zeigen, wie in Abbildung 1, wäre erst einmal mit der behaupteten Eigenschaft des Elektrons in Verbindung zu bringen. Auf diesen Umstand hat schon Millikan selbst in seiner Nobelpreisrede hingewiesen:

„There remained, however, some doubters, even among those of scientific credentials, for at least two decades - men who adopted the view that the apparent unitary character of electricity was but a statistical phenomenon; and as for educated people of the non-scientific sort, there exists today among them a very general and a very serious misconception as to the character of the present evidence.“
(Millikan 1923, S. 55)

“The most direct and unambiguous proof of the existence of the electron will probably be generally admitted to be found in an experiment which for convenience I will call the oil-drop experiment. “
(a.a.O.)

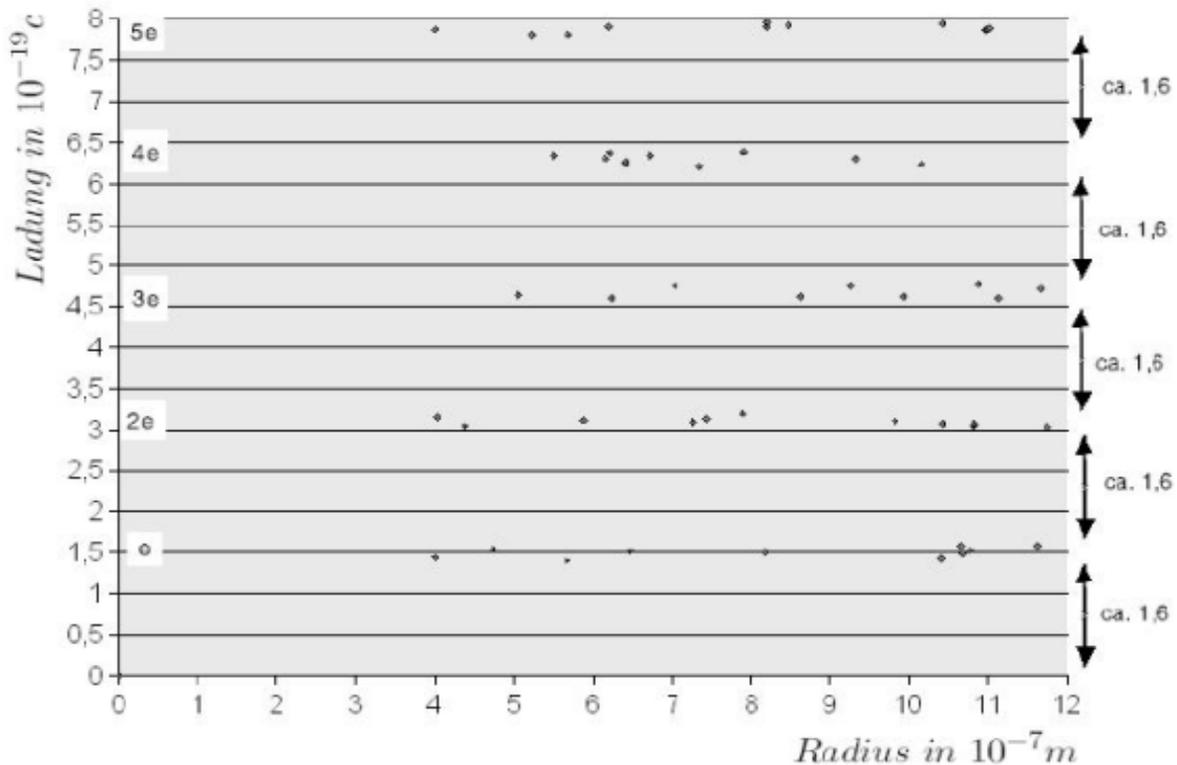


Abbildung 1 Das experimentelle Resultat des Millikan-Versuchs. Hier allerdings schon die berechneten Elementarladungen. In die Rechnung gegen als Messgröße u.a. die Geschwindigkeit der Öltröpfchen ein. Im Grunde liefert das Experiment das Resultat, dass die Geschwindigkeiten sich nicht beliebig einstellen, sondern nur in Vielfachen einer unteren Geschwindigkeit (im Gleichfeldversuch)³.

Millikan stellt also nicht die Messung des Werts in den Vordergrund, sondern den Beweis der Existenz des Elektrons. Noch 1923 war die Vorstellung vom Elektron eben noch nicht so verbreitet wie heute.

Das Experiment in der Physik ist also ein Mittel der Theorie. Es dient zur Erkenntnis der Natur, hier der Natur des Elektrons. In der Technik greift man auf diese Erkenntnis zurück, z.B. wird es bei der Konstruktion der Elektronenstrahlröhre für die technische Auslegung des Geräts benutzt, z.B. für die Dimensionierung der Spulen und die Berechnung der zu erwartenden Auslenkung⁴. Sollte die Erkenntnis der Physik fehlerhaft sein, wird sich der beabsichtigte technische Zweck nicht wie gewünscht einstellen und der Fernseher zeigt z.B. kein ordentliches Bild⁵.

Diese noch sehr schematische und gedrängte Darstellung der Beziehung zwischen Technik und Physik soll an einem technischen Gegenstand, der sich zugleich eines großen Interesses in der Physik erfreut (zumindest in den Lehrbüchern), eingehender erörtert werden: Dem Elektromotor.

³ Von Benutzer:Ixitixel - selbst in Openoffice erstellt), GFDL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40077655>

⁴ Dafür benötigt man natürlich Experimente, die den genauen Wert der Elementarladung liefern. In der Physik ist der Wert der Elementarladung außerdem von höchster Bedeutung für die Feinstrukturkonstante. Aber vermutlich ist dies für die Schülerinnen und Schüler weniger bedeutsam als für die Physikerinnen und Physiker.

⁵ Für die jüngeren Leser: Früher (vor 2000) wurden Fernseher durch Elektronenstrahlröhren realisiert, aber das ist inzwischen auch schon wieder Technikgeschichte.

Seine Geschichte ist sehr spannend und weil dieser technische Gegenstand sich der eingehenden Aufmerksamkeit vieler Physiker des 19. Jahrhunderts erfreute, lässt sich an ihm auch die Differenz in der experimentellen Herangehensweise von Physikern und Ingenieuren aufzeigen. In der Anfangszeit des Elektromotors beschäftigten sich einerseits viele Physiker mit ihm, andererseits aber auch viele Praktiker und Erfinder. Zum Gegenstand einer wissenschaftlichen Befassung durch Ingenieure kam es erst ab ca. 1875 als man anfing Generatoren und Elektromotoren zur Kraftübertragung zu verbinden. Die Geburtsstunde der eigenständigen ingenieurwissenschaftlichen Disziplin Elektrotechnik war eng mit der Notwendigkeit der Konzeption von Experimenten verbunden, die es erlaubten, die Eigenschaften eines neu konstruierten Elektromotors einigermaßen verlässlich zu berechnen und diese Berechnungen auch experimentell zu überprüfen.

Am Beginn der Geschichte des Elektromotors stehen allerdings Geräte, die den Namen Elektromotor aus der Sicht der Technik noch nicht wirklich verdienen, weil der Begriff des Motors auf seine Funktion als Antriebsmittel verweist. Die Rotationsapparate, die ab 1820 das Licht der Welt erblickten, waren aber kaum imstande irgendetwas anzutreiben. Mit ihnen demonstrierte man einen Effekt. Der erste, der dies mit Erfolg zeigte, war Faraday.

Die Zeichnung (Fig. 1) zeigt eine Version des Rotationsapparates, den der Instrumentmacher John Newmann 1821 für Faraday hergestellt hat. Man konnte mit ihm demonstrieren, wie ein beweglicher Magnet um einen ruhenden, stromführenden Leiter rotiert (links). Rechts ist zu sehen, wie ein stromführender Leiter um einen ruhenden Magneten rotiert. Die Leiterenden sind mit den Polen einer elektrischen Batterie verbunden.

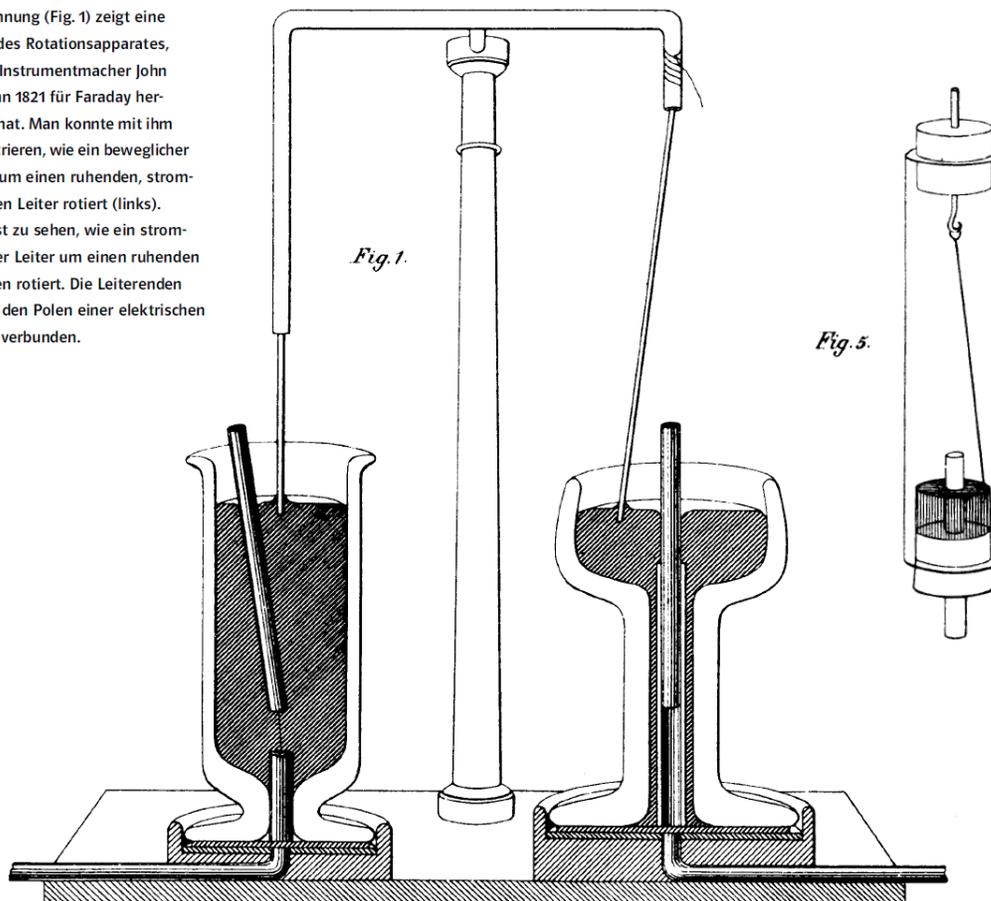


Abbildung 2 Rotationsapparat von Faraday 1821⁶.

⁶ http://www.energiegeschichte.de/cps/rde/xbcr/avacon-museum/Sammelblatt_11_Elektrizitat.pdf

Dieser Apparatur sieht man an, dass sie keineswegs mit einem Motor zu verwechseln ist, denn sowohl der rotierende Magnet im linken Teil der Abbildung 2 als auch der um den feststehenden Magneten rotierende bewegliche Leiter der rechten Seite sind nicht für mehr ausgelegt als sich selbst zu bewegen. Sie demonstrieren allerdings eine Antriebskraft, nämlich das sich um den elektrischen Leiter ausbildende magnetische Feld und zeigen so etwas für die damaligen Zeitgenossen außerordentlich Verblüffendes: Eine Kraftwirkung, die nicht entlang der Verbindungslinie zwischen den durch die Kraftwirkung verbundenen Dingen wirkt, sondern in einem Winkel von 90° zu dieser Linie. Dieses kontraintuitive Verhalten hat einen tiefen Eindruck auf die Zeitgenossen gemacht und auch heute noch sollte dieses Experiment in keiner Experimentalsammlung fehlen. 1822 wurde ein durch die Arbeiten von Faraday angeregtes weiteres Experiment, das Barlow-Rad, durch Peter Barlow, Professor für Mathematik und Physik in Woolwich, präsentiert. Weil das Rad eine Achse antreibt, kann man dieser Anordnung schon den Namen Motor, genauer Unipolarmotor, zuordnen. Da die erzeugten Drehmomente aber sehr klein waren, reichte es ebenfalls nur zur Demonstration. Abwandlungen dieses Prinzips (mit Batterie, Schraube und ein wenig Draht) erfreuen übrigens unter der Bezeichnung „kleinster Elektromotor der Welt“ die Netzwelt⁷ und werden gerne nachgebaut.

Will man den physikalischen Effekt, den Barlow und Faraday demonstrierten, für technische Zwecke nutzen, dann muss man ihn verstärken, damit die erzeugte Wirkung größer wird. Mit der Erfindung des Elektromagneten gab es ab 1823 die Möglichkeit, das Drehmoment zu vergrößern. Die folgenden Ausführungen greifen aus der großen Zahl der ab 1823 durchgeführten Experimente⁸ nur einige wenige heraus. Die Möglichkeiten, die sich mit der neuen Naturkraft des Elektromagnetismus auftaten, haben viele gereizt und zu Konstruktionen animiert, aber ob man dies als „Modeproblem“, wie Doppelbauer es auf seiner Seite zur „Erfindung des Elektromotors“ etwas Nase rümpfend mitteilt⁹, bezeichnen kann, sei dahingestellt. Aus der Sicht eines heutigen Instituts für Elektrotechnik mag dies nachvollziehbar sein, aber aus der Sicht der damaligen Zeit sicherlich nicht. Denn die Frage nach einer Antriebskraft, die als Alternative zum Dampftrieb auch für wesentlich kleinere Leistungen und unter wesentlich einfacheren Bedingungen (keine Feuerung, kein Dampfkessel) anwendbar war, kam den Zeitgenossen überhaupt nicht abwegig vor. Und so beschäftigten sich auch Menschen außerhalb der Universitäten wie z.B. der Hufschmied Davenport in den USA mit der Entwicklung einer elektrischen Antriebsmaschine. Dieser behauptete sogar, sie sei preisgünstiger als die Dampfkraft, wie Vosselmann de Heer 1839 in den Annalen der Physik erkennbar skeptisch berichtete (S. 80).

Allerdings kann man für diese Zeit konstatieren, dass sie weniger zielstrebig als eher explorativ war:

„Für die Entwicklung der magnetelektrischen Maschinen bis 1840 ist der Umstand entscheidend gewesen, daß keine rechte Aufgabe für sie da war, daß nicht irgendeine praktische Notwendigkeit dazu zwang, ganz eindeutige Forderungen zu erfüllen und bestimmte Eigenschaften zu züchten. Die Maschinen dieser Zeit waren nichts als Demonstrationsgeräte und Spielzeug, für die sich aber unter dem

⁷ Z.B. unter <http://www.experimentis.de/experimente-versuche/elektrizitaet-magnetismus/kleinst-elektromotor-der-welt/> wo sich auch einige Videos finden.

⁸ Lindner (1986, S. 1-5) schätzt die Zahl der Konstrukteure von Elektromotoren auf knapp 100. Er unterscheidet nicht zwischen Erfindern und Konstrukteuren, weil sich nicht mehr feststellen lässt „wer welche Ausführungen und wann nach eigenen oder fremden Ideen gebaut oder nachgebaut hat.“ (a.a.O.)

⁹ <https://www.eti.kit.edu/1376.php> Auf diesen Seiten von Martin Doppelbauer aus dem Elektrotechnischen Institut des Karlsruher Institut für Technologie findet man eine detaillierte chronologische Zusammenstellung ausgewählter Stationen der Geschichte des Elektromotors mit vielen Abbildungen und Einschätzungen für die Bedeutung aus heutiger Sicht, sowie ein Video eines funktionierenden Nachbaus von Jacobis Elektromotors.

Eindruck von Faradays Entdeckung ein großer Kreis interessierte. Solche Vorrichtungen ohne praktischen Zweck konnte jeder Mechaniker gestalten wie er wollte.“ (Mahr 1941, S. 27)

Hier deutet sich schon eine Scheidelinie zwischen Physik und Technik an. In den physikalischen Experimenten ging es darum, den physikalischen Effekt möglichst deutlich herauszustellen. Ein technisches Experiment würde hingegen versuchen, den physikalischen Effekt einer Nutzenanwendung zuzuführen und muss daher „bestimmte Eigenschaften züchten“.

Auf dem Weg zu einer Maschine im technischen Sinn waren noch viele Probleme zu lösen, aber diese Frühzeit als Spielerei abzutun und ihnen jeden praktischen Wert abzusprechen, scheint mir etwas geschichtsvergessen, was sich vielleicht durch die folgenden Ausführungen nachvollziehen lässt. Die Vergrößerung des Drehmoments durch Spulen war der erste Schritt zur Maschine und machte die Erfindung des Kommutators notwendig, was 1833 durch Ritchie geleistet wurde (siehe Abbildung 3). Nach einigen Quellen hat Ányos Jedlik aus Ungarn schon 1827 einen Drehapparat mit Stromwender gebaut, aber dieses Modell erst Jahrzehnte später veröffentlicht.

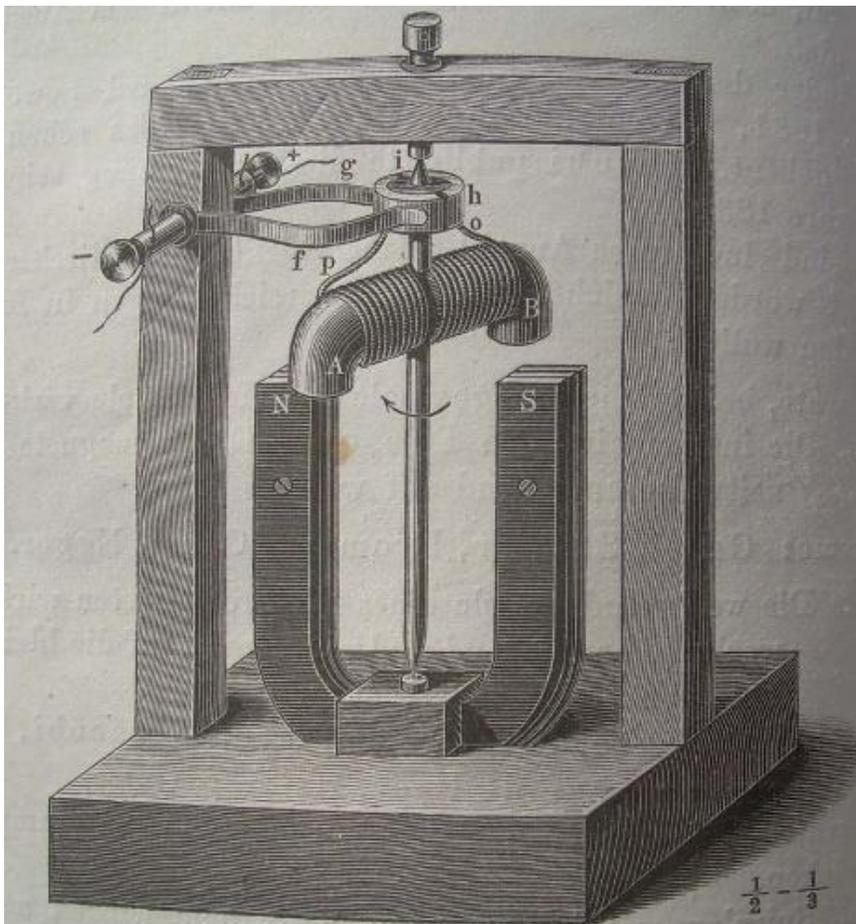


Abbildung 3 Ritchie-Motor. Hier wurde der erste Kommutator eingesetzt. Auch dieses Gerät ist noch nicht zum Antrieb geeignet, sondern demonstriert die Wirkung der Spulen¹⁰.

¹⁰ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Motor_Ritchie_LehrbuchPhysik_S504.jpg

Die ersten Modelle, die erkennbar darauf angelegt waren, über das selbsttätige Drehen hinaus einen Antrieb zu Verfügung zu stellen, also einen Elektromotor im technischen Sinn darstellten, waren jene von denen auch Leistungsdaten übermittelt wurden. Hier kann man also erste „Züchtungsversuche“ von technisch gewünschten Eigenschaften durchaus beobachten. So berichtet Vorsselmann de Heer über den Elektromotor des Physikprofessors Botto aus Turin, dass dieser 1834 eine Leistung von 1/25 PS aufwies. Allerdings war dies ein Motor, der einem Metronom glich, von zwei Elektromagneten hin und her bewegt wurde, was durch ein Kurbelgestänge auf ein Schwungrad übertragen wurde (Abbildung 4).



Abbildung 4 Der Elektromotor von Botto mit einer Leistung von einem 1/25 PS. Die Bewegung wird durch das Hin- und Herpendeln des Schenkels auf der rechten Seite auf den Kurbeltrieb übertragen.
<https://catalogo.museogalileo.it/galleria/MotoreElettricoBotto.html>

Der erste Elektromotor, der diese Bezeichnung auch in den Augen eines heutigen Ingenieurs¹¹ verdient, ist der von Jacobi, der in Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie bereits im Januar 1834 erwähnt wird. Jacobi studierte Kameralwissenschaft in Berlin und Göttingen, bildete sich aber nach Lindner (1986, S. 2-4f) soweit in Mathematik, dass er sogar für eine mathematische Professur in Frage kam. Er hatte sehr vielfältige wissenschaftlichen Interessen und beschäftigte sich mit Hegels Logik ebenso wie mit der Anthropologie. Seine Anstellung als Regierungs-Conducteur brachte Jacobi dazu, sich mit Dampfmaschinen zu befassen. Seine Vorschläge, die auf Erfahrungsgrundsätzen beruhenden Regeln für ihre Klassifizierung auf wissenschaftliche Grundlagen zu stellen, waren seinem Vorgesetzten wohl nicht recht und er ging nach Königsberg, wo sein berühmter Bruder Carl Gustav Jacob Jacobi¹² lehrte. Die dortige Anstellung lies genug Raum für seine Beschäftigung mit dem Elektromagnetismus als bewegende Kraft und er konstruierte dort seinen ersten Elektromotor. Seine Kritik an der nach seiner Ansicht unwissenschaftlichen Art der Konstruktion der Dampfmaschinen formulierte er in dieser Zeit in einem Aufsatz in dem Journal für die Baukunst (a.a.O. S. 2-8). Interessant ist dies in diesem Zusammenhang, weil er die Maschine als ein System begreift (in seinen Worten „Totalorganismus“), dessen innerer Aufbau und Funktion sich den Gesetzen der Physik verdankt, das aber nach außen einen ökonomischen Effekt verursacht. Dieses Verständnis einer Maschine als ein System mit eigenen Regeln liefert auch den Hintergrund für seine Konstruktion des Elektromotors. In einem solchen technischen System werden die physikalischen Gesetze berücksichtigt und genutzt, um den „ökonomische Effekt“ zu optimieren¹³, also eine Nutzenanwendung zu realisieren, die sich in der Praxis bewährt. Ein solches System kann daher nicht auf die physikalischen Gesetzmäßigkeiten allein zurückgeführt werden. Der „ökonomische Effekt“ des Elektromotors liegt natürlich in seiner Anwendung als Antriebsmaschine, die nutzbringende Arbeit verrichtet. Da damals die Dampfmaschine als Antriebsmaschine bereits verbreitet war, wusste man auch die ökonomischen Aufwendungen für die nutzbringende Arbeit zu bestimmen, nämlich die Kosten, die für die Kohle aufgebracht werden müssen, in ein Verhältnis mit der nützlichen Arbeit zu setzen. Darin war die Dampfmaschine nun mit dem Elektromotor vergleichbar, der seine Elektrizität aus den damals üblichen galvanischen Zellen (Daniell-Zellen) bezog. Die Aufgabe, die sich Jacobi stellte, bestand darin, eine Maschine nach dem elektromagnetischen Prinzip so zu konstruieren, dass sie prinzipiell geeignet war, wie die Dampfmaschine nutzbringende Arbeit in Unternehmen und Institutionen zu verrichten. Ein Merkmal der Maschine von Jacobi sticht beim Vergleich mit den Vorgängern sofort ins Auge: Während beim Ritchie-Motor die Übertragung der Kraft vom Stator auf den Rotor an lediglich zwei Positionen erfolgt, sind es beim Jacobi-Motor viermal so viele. Das verweist schon darauf, dass die Übertragung von Antriebskraft auf den Rotor durch den magnetischen Fluss zwischen den Polen der Elektromagnete von Rotor und Stator als ein konstruktiv zu bewältigendes Problem erfasst wurde. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass 1834 die physikalische Theorie des Elektromagnetismus noch in den Kinderschuhen steckte. So konnte Jacobi nach dem damaligen Wissensstand bei der Konstruktion seines Kommutators davon ausgehen, dass kein Zeitverzug zwischen dem Schalten des elektrischen Stroms und der Ausbildung des magnetischen Feldes besteht. Doch seine Experimente zeigten, dass man das nicht

¹¹ „Der erste richtige Elektromotor“ Doppelbauer (wie Fußnote 9). Allerdings bleibt der Ingenieur auf seinen Internetseiten die Erklärung schuldig, warum es denn der erste „richtige“ Elektromotor ist. Auf Anfrage teilt er mit: Kriterien für einen akzeptablen Elektromotor sind erstes die Welle mit der ein Antrieb realisiert werden kann und zweitens die Leistung, er soll nicht beim ersten Windhauch stehen bleiben.

¹² Physiker kennen seinen Namen durch die Hamilton-Jacobi-Gleichungen der klassischen Mechanik.

¹³ Aus diesem Grund nimmt Jacobi eine interessante Stellung in Bezug auf den Elektromotor ein. Einerseits zeigt er bereits eine deutlich ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise auf der anderen Seite untersucht er beispielsweise das Phänomen des Magnetismus durchaus in physikalischer Art und Weise. Es wäre daher falsch ihn nur als Ingenieur oder nur als Physiker anzusprechen.

vernachlässigt kann. Er bemerkte sogar einen Widerspruch zwischen seinen Annahmen und dem experimentellen Resultat: In der Theorie sollte die Geschwindigkeit der Scheibe beständig steigen, da die Kraft der Elektromagnete sie immer wieder beschleunigt. Tatsächlich dreht sich der Motor im Experiment sehr langsam, viel langsamer als die Berücksichtigung der Reibung erklären könnte (a.a.O. S. 2-31).

Auch die Frage nach der Größe des Magnetfelds im Eisen musste geklärt werden. In der damaligen Literatur finden sich viele Berichte über Experimente mit Elektromagneten und ihre Tragfähigkeit (a.a.O. S. 2-12). Aber die erste Messung der Hysterese wurde erst 1851 durch Johann Müller publiziert (Mahr 1941, S.49). Für viele konstruktive Details seines Elektromotors konnte Jacobi noch nicht auf gesichertes physikalisches Wissen zurückgreifen. Deswegen tauschte er immer wieder die Rolle von Ingenieur und Physiker und führte physikalische Experimente zum Elektromagnetismus durch.

Trotz dieser Schwierigkeiten realisierte Jacobi erfolgreich einen Elektromotor, der alle Vorgänger übertraf. Die Publikation darüber erregte viel Aufmerksamkeit und Jacobi erhielt 1835 eine Professur der zivilen Baukunst an der Universität Dorpat (heute Tartu, Estland), damals zu Russland gehörend. Dort arbeitete Jacobi weiter intensiv über den Elektromagnetismus und publizierte zusammen mit dem dortigen Ordinarius für Physik eine Arbeit über hohle und damit gewichtssparende Elektromagnete (Lindner 1986, S.2-16). Jacobi ging schon 2 Jahre später nach Petersburg und bekam vom Zar Nikolaus I. erhebliche finanzielle Mittel für den Bau eines weiterentwickelten Elektromotors, der in der Lage sein sollte, ein Schiff anzutreiben. Diese Maschine wurde 1838 fertiggestellt und besaß eine für die damalige Zeit bemerkenswerte Praxistauglichkeit. Insbesondere wurde das Drehmoment durch die Parallelkonstruktion von zwanzig Elektromagneten auf einer Antriebsachse erheblich gesteigert (Zeichnung a.a.O. S. 2-73).

Das Schiff fuhr auf der Newa mit zehn bis zwölf Personen an Bord und erreichte Geschwindigkeiten von bis zu 4 km/h und soll nach Angaben Jacobis ganze Tage unterwegs gewesen sein (a.a.O. S. 2-70). Möglich wurde dies nicht nur wegen der neuen Konstruktion des Motors, sondern auch durch die Groveschen Zellen, die erheblich leistungsfähiger waren als die Daniell-Elemente. In seiner weiteren Forschung stieß Jacobi an vielen Stellen auf weiße Flecken der Wissenskarte der damaligen Physik und hat einiges dazu beigetragen, sie zu füllen.

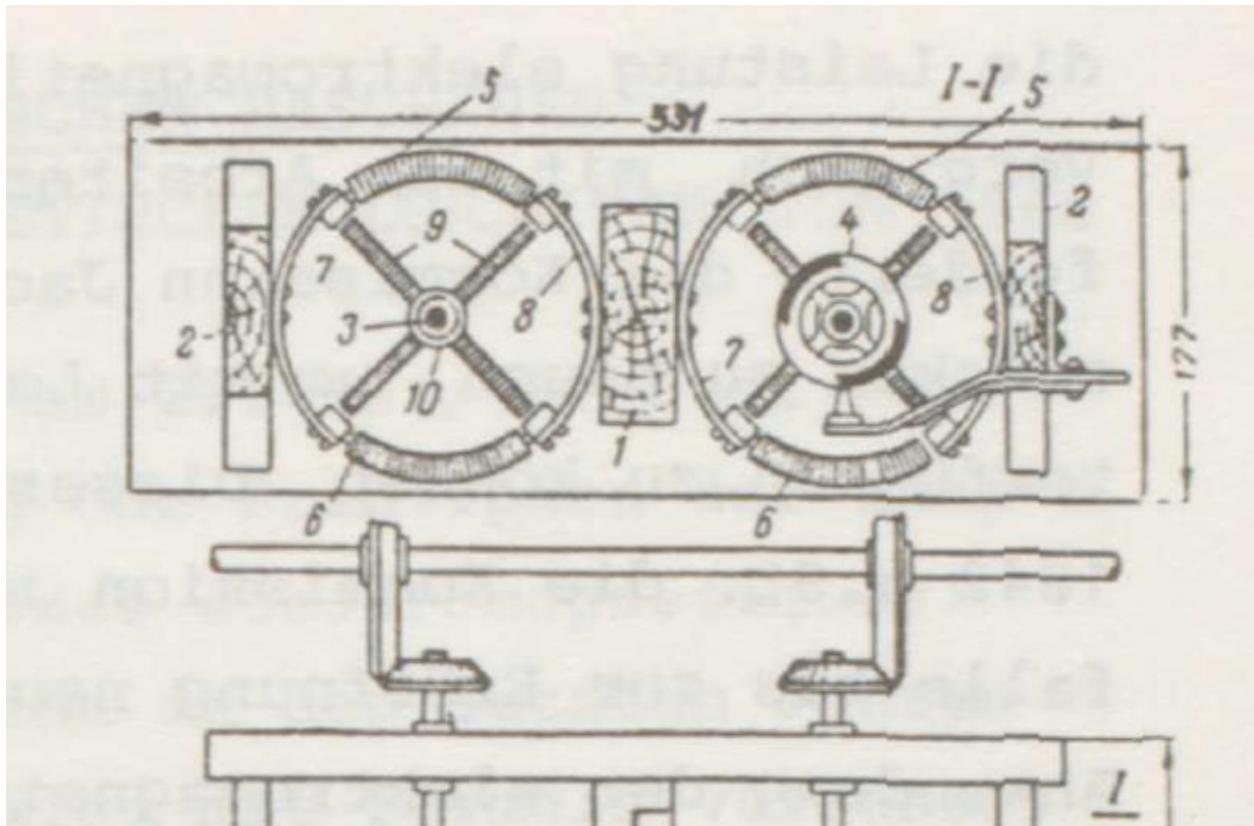


Abbildung 5 Oben: Die Draufsicht auf die lange Reihe von 20 Ringen (Stator) mit Elektromagneten (5, 6), unmagnetische Zwischenstücke (7,8). In diesen Ringen drehen sich Elektromagneten auf Rotoren (9), der Strom wird über 4 Kommutatoren zugefügt (4). Direkt darunter erkennt man die Kegelradgetriebe aus der Seitenansicht (vollständig in der nächsten Abb.). Quelle Lindner (1986), S. 2-73

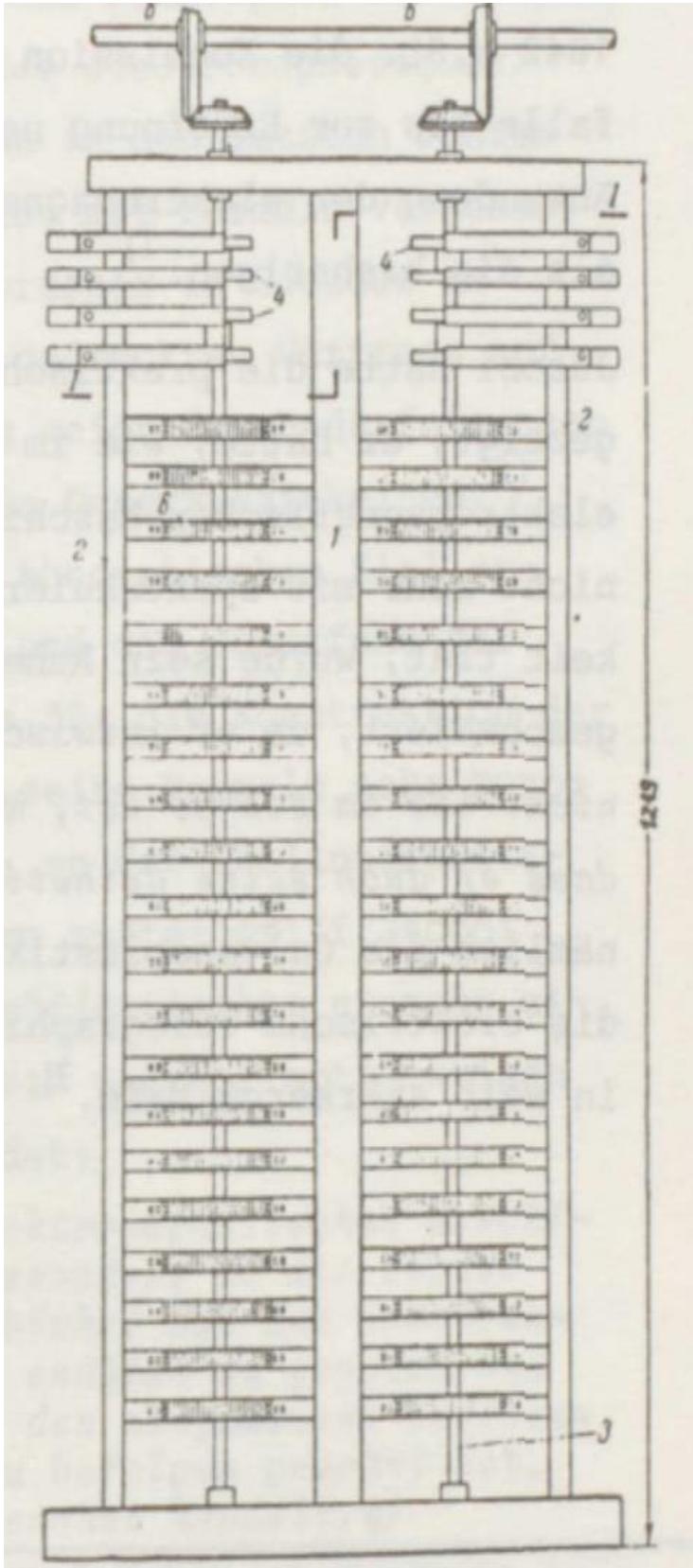


Abbildung 6 Die Reihe von 20 Ringen auf der Antriebsachse des Bootsmotors von Jacobi. Quelle Lindner (1986), S. 2-73

Doch trotz seiner intensiven Beschäftigung mit dem elektromagnetischen Phänomen kommt Jacobi 1842 zu einem betrüblichen Urteil:

„Ganz anders verhält es sich mit den elektromagnetischen Maschinen, bei denen, obwohl die Form der Erscheinung einfach ist, dennoch das Agens mit welchem man es zu tun hat, in dichtes Dunkel gehüllt ist. Wissen wir doch nicht, was bei der galvanischen Thätigkeit Ursache oder Wirkung sei? Ist es die Auflösung dieses Atoms Zink eine Nothwendigkeit oder ein lästiger Umstand? Die Wärme spricht zu uns auf die mannichfaltigste Weise, wir sehen und fühlen und messen, wie, und mit welcher Kraft sie die Molecule der Körper in Bewegung setzt; aber schweigsam und starr, wie das Grab, ist das magnetische Eisen.“ (zitiert nach a.a.O., S. 2-91)

Wenn man die Probleme Jacobis aus heutiger Zeit betrachtet, dann wirken sie erstaunlich vertraut: Die physikalisch-chemischen Vorgänge im Akkumulator sind auch heute noch ein Forschungsgebiet, dass gerade für die technische Nutzung des Elektromotors im Automobil von großer Bedeutung sind. Aber auch die physikalischen Vorgänge bei der Einwirkung des Magnetfeldes auf das Eisen sollten Physiker und Ingenieure noch Jahrzehnte später herausfordern. Jacobi spricht also an dieser Stelle nicht nur für sich, sondern drückt den Erkenntnisstand seiner Zeit in Worten aus. Bemerkenswert allerdings, dass der Wissenstand in Bezug auf die Wärme im Vergleich mit dem Magnetismus so positiv eingeschätzt wird. Es scheint so als ob Jacobi hier die Fähigkeit der Konstrukteure von Dampfmaschinen den Dampf zu Zwecken des Antriebs zu nutzen, ein wenig mit der physikalischen Aufklärung über die grundlegenden physikalischen Mechanismen verwechselt. Dabei war die Physik der Dampfmaschine 1842 keineswegs so klar, wie es im Zitat scheint.

Nicht nur die physikalischen Grundlagen des Elektromotors waren unbefriedigend, auch die Kosten des neuen Antriebs waren nach Berechnungen von Jacobi so hoch, dass sich die Vorteile des elektrischen Antriebs gegenüber der Dampfkraft nicht wirklich entfalten konnten.

„Abgesehen von manchen technischen und konstruktiven Schwierigkeiten, die sich überwinden lassen, resumirt sich das, was der Einführung dieser Maschine in die Industrie entgegensteht, in dem einfachen Satz: dass die chemische Kraft bis jetzt noch theurer ist als die mechanische. (...) ein galvanischer Strom bedingt die chemische Umwandlung mehr oder weniger kostbarer Stoffe, in der Art, dass der Werth des nutzbaren Products, die mechanischen Effecte mit eingerechnet, mit den Haupt- und Nebenkosten des Materials noch nicht in das zugehörige Verhältnis gebracht ist.“ (zitiert nach a.a.O. S. 2-95).

Seine Versuche wertete Jacobi am Ende frustriert als „bloßes Herumtappen“, nicht ahnend wieviel physikalische und technische Forschung noch notwendig sein würde, um sicheres Wissen für die Konstruktion zu liefern.

Es gibt weitere Experimente aus der Zeit von Jacobi für die Entwicklung eines Elektromotors, so z.B. von Robert Davidson, dem es gelingt 1842 einen 5t schweren Wagen auf einer Strecke der Railways in Fahrt zu bringen (Dittmann 1998, S. 15) oder Charles Page, der 1851 einen Zuschuss vom amerikanischen Kongress zum Bau eines Elektromotors erhielt und eine Lokomotive damit ausstattete, die bei einem Gesamtgewicht von 12t eine Geschwindigkeit von 19 Meilen pro Stunde erreichte¹⁴. Emil Stöhrer soll es 1842 bereits gelungen sein, ein Auto mit einem Elektromotor zu betreiben¹⁵ und Thomas Davenport¹⁶ bekam 1837 das erste Patent auf einen Elektromotor. 1841 setzte der Deutsche Bund eine Prämie von

¹⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Charles_Grafton_Page

¹⁵ https://de.wikipedia.org/wiki/Emil_Stöhrer

¹⁶ [https://de.wikipedia.org/wiki/Thomas_Davenport_\(Erfinder\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Thomas_Davenport_(Erfinder))

100.000 Gulden aus, wenn es einem Erfinder gelänge, eine elektrische Maschine zu entwickeln, die günstiger arbeitet als Dampfmaschine, Pferd oder Mensch¹⁷. Dieser Preis wurde aber von keinem der Bewerber errungen.

Dittmann schreibt zwar, dass die Entwicklungslinie des Elektromotors nach Jacobi abbrach (Dittmann 1998, S.16) und erst am Beginn der 1870er Jahre fortgesetzt wird. Aber dennoch wird auch in den 1840er Jahren eine Flut von Patentanträgen eingereicht, allein in England zwischen 1837 und 1866 ca. 100 (Mahr 1941, S. 29). Aber auch in der Einschätzung von Doppelbauer, tragen diese Ansätze allesamt nicht zum heutigen Elektromotor bei, sondern der nächste wichtige Schritt ist für ihn die Erfindung des Stromgenerators mit Doppel-T-Anker bei dem erstmals eine Wicklung in zwei Nuten gelegt wurde (a.a.O.). „Diese Erfindung markiert einen Wendepunkt in der Konstruktion von elektrischen Maschinen. In den folgenden Jahrzehnten verschwinden alle früheren Konstruktionen vom Markt. Bis heute werden fast alle Elektromotoren mit Wicklungen in Nuten gebaut.“ (Doppelbauer, Fußnote 9).

Diese Einschätzung traf schon Otto Mahr, der für den VDI 1941 eine Geschichte der Dynamomaschine geschrieben hatte (S.29). Durch diese Konstruktion wird die magnetische Streuung zwischen Rotor und Stator bedeutend reduziert, vorausgesetzt, der Spalt zwischen den Polschuhen ist hinreichend klein.

Auch die Zeitgenossen von Siemens sahen den Doppel-T-Anker als sehr bedeutend an, wie z.B. Elihu Thomson¹⁸ in seiner geschichtlichen Darstellung der Elektrotechnik im 19. Jahrhundert. Es ist für unsere Betrachtung bedeutsam, dass die Wende der technischen Entwicklung durch eine für den Laien eher unscheinbare Konstruktion (Doppel-T-Anker) zustande kommt. Die Bedeutung liegt in der durch sie nicht sinnlich wahrnehmbaren Übertragung elektrischer Energie in magnetische und mechanische Energie. Die Umwandlung der elektrischen Energie des Stromflusses in den Spulen des Elektromotors in magnetische Energie und deren Übertragung auf den Rotor ließ sich erst verstehen als die zugrundeliegende Theorie des Elektromagnetismus geklärt war. Nun könnte man davon ausgehen, dass dies in der Zeit von 1861-1864 erfolgte, als James Clark Maxwell alle bisherigen Erkenntnisse über Elektromagnetismus in vier fundamentale Gleichungen zusammenfasste und damit der Elektrotechnik endlich das physikalische Fundament verschaffte, das sie so dringend benötigte. Doch das Werk von Maxwell (1873 als geschlossene Darstellung veröffentlicht) wurde zunächst noch nicht einmal in der Physik gebührend beachtet und erst recht nicht in der Technik. Erst mit dem experimentellen Nachweis der elektromagnetischen Wellen durch Hertz 1887/88 änderte sich dies (vgl. König 1995, S.308).

Man könnte annehmen, dass damit nun endlich alle Probleme gelöst waren und das „Herumtappen“, das Jacobi so beklagte, ein Ende genommen hatte. Aus der Sicht der Physiker mag dies auch so gewesen sein. Stellvertretend für eine Sichtweise von damaligen Physikern steht das folgende Zitat aus dem Jahr 1882:

„Die elektrischen Maschinen sind samt und sonders Specialfälle der magnetischen Induction; nach den Gesetzen der Induction muß in jedem Falle die Wicklung der Trommeln oder Ringe und der Magnete bestimmt werden, um die erforderlichen elektromagnetischen Kräfte zu erhalten...

Das speciell maschinentechnische an den Maschinen ist der Natur der Maschinen nach von der denkbar einfachsten Art; es handelt sich immer um die rotierende Bewegung eines Ankers, der Trommel oder des

¹⁷ Protokolle der deutschen Bundes-Versammlung, Band 38, S. 766, Frankfurt 1846

¹⁸ Electricity during the 19th century. Smithsonian Institution Report, S. 338, zitiert nach Mahr 1941, S. 115.

Rings. Die Dynamomaschinen bleiben eben immer ziemlich einfache nur in großen Dimensionen ausgeführte physikalische Apparate.“(zitiert nach König 1995, S. 106¹⁹)

Diese Geringschätzung auch der theoretischen Probleme bei der Auslegung von elektrischen Maschinen konnte die Entwicklung der Elektrotechnik zu einer eigenständigen universitären Disziplin allerdings nicht lange aufhalten. Dazu war der gesellschaftliche Bedarf an abgesicherten elektrophysikalischen Wissen für die beginnende Elektrifizierung viel zu groß.

„Hatte für die Einführung der Telegraphie noch ein physikalisches Grundwissen ausgereicht, so wurde mit dem Beginn der Elektrifizierung um 1880 die umfassende elektrophysikalische Fundierung des Elektromaschinenbaus unumgänglich. Sie bildete eine unverzichtbare Komponente für die Herausbildung der Starkstromelektrotechnik als Technikwissenschaft.“ (Schreier, Ackermann 1991, S. 299)

Aber so ganz stimmt dieses Gleichsetzen von zeitlicher Abfolge und kausaler Entwicklung nicht. Die Konstrukteure und Erbauer von Elektromotoren warteten keinesfalls darauf, dass die Theoretiker ihre Resultate ablieferten, sondern bauten Elektromotoren auf der Basis ihres Erfahrungswissens. Es war eine Methode des Experimentierens, des Versuchs und Irrtums und dennoch entstanden immer bessere Elektromotoren in ihren Werkstätten und Laboren.

In der Frühzeit des Elektromotors bestand durchaus ein staatliches Interesse an seiner Entwicklung aber eben nur für kurze Zeit²⁰: nachdem die vorgestellten Prototypen die Versprechungen ihrer Erfinder oder die Erwartungen der Geldgeber nicht einlösen konnten, verfiel das Interesse diesen Bereich der Wissenschaft zu fördern.

Völlig anders dagegen ist die Situation mit dem Aufkommen der Wechselstromgeneratoren und des Aufbaus von elektrischen Versorgungsnetzen. Durch die Entdeckung des dynamoelektrischen Effekts, die bezeichnender Weise von mehrere Erfindern unabhängig und fast zeitgleich gemacht wurde, Siemens 1867, Wheatstone 1867 und Søren Hjørth sogar schon 1854²¹ (englisches Patent), wurden nun elektrische Leistungen möglich, die vorher mit den galvanischen Zellen unerreichbar waren und dies eröffnete ein neues Gebiet der Elektrotechnik: die Starkstromtechnik²².

Edison hatte die entscheidende Anwendung für den elektrischen Strom entwickelt, mit der sich ein großes gesellschaftliches Interesse befriedigen lies: das elektrische Licht (Patenterteilung 1880). Mit der Verfügung über ein elektrisches Netz (Eröffnung des ersten Elektrizitätswerks in New York 1882) wurde aber auch alles interessant, was man mit dem Strom sonst noch antreiben konnte.

¹⁹ Adolf Wüllner, Autor des Zitats, war der Fachvertreter der RWTH Aachen und die Passage stammte aus einem Gutachten mit dem die Zugehörigkeit der Elektrotechnik zur Physik begründet werden sollte.

²⁰ Gemeint ist z.B. die Förderung von Jacobi durch den russischen Staat oder die Auslobung von 100.000 Gulden für die Erfindung eines Elektromotors durch den Deutschen Bund.

²¹ Hjørth liefert ein schönes Beispiel dafür, dass die Entdeckung eines Effekts nicht gleichbedeutend ist mit der Wahrnehmung der damit verbundenen Potentiale. Seine frühe Entdeckung des dynamoelektrischen Effekts hatte jedenfalls kaum Auswirkungen auf die weitere Entwicklung von Generatoren und Motoren. Vielleicht hängt es auch damit zusammen, dass er die Selbsterregung als eine Art perpetuum mobile betrachtete und seine Forschungsanstrengungen darauf ausrichtete, dieses zu realisieren (Smith 1912, S.19).

²² An diesem Effekt lässt sich ein weiteres Mal zeigen, dass es das eine ist, einen Effekt zu entdecken und etwas völlig anderes, seine Bedeutung zu erfassen. Unter den Genannten war es nur Siemens, der die Möglichkeiten dieses Effekts richtig erkannte (vgl. Brenjes, Richter, Sonnemann 1987, S. 284f)

Auch in Deutschland trat die Starkstromtechnik ihren Siegeszug an: 1879 fuhr die erste elektrische Eisenbahn auf der Berliner Gewerbeausstellung und in Berlin erstrahlte die erste elektrische Straßenbeleuchtung. 1880 folgte der erste elektrische Aufzug in Mannheim und 1881 die weltweit erste elektrische Straßenbahn in Berlin-Lichterfelde.

Schreier hat natürlich recht: Die umfassende elektrophysikalische Fundierung des Elektromaschinenbaus war unumgänglich, aber nicht die einzige Voraussetzung und teilweise auch nicht die Bedingung für die sich nun entwickelnde Produktion von Elektromotoren. Nach den Worten von Wolfgang König, der die Entstehung der Elektrotechnik aus Industrie und Wissenschaft im Detail untersucht hat:

„Tatsächlich waren – das Urteil aus heutiger Kenntnis heraus gesprochen – die Anfang der 1880er Jahre gehandelten Theorien der Elektrotechnik über elektrische Maschinen außerordentlich mangelhaft. Die Aussagen der physikalischen Elektrizitätslehre hingegen waren für die Lösung von Konstruktionsaufgaben gänzlich irrelevant.“ (König 1995, S. 106)

Wie kann man mit mangelhaften elektrotechnischen Theorien und irrelevanter Elektrizitätslehre Elektromotoren konstruieren? Nun: Nur in dem man es tut. D.h. die ersten Motoren wurden eher Pi mal Daumen konstruiert als sich an einem ingenieurwissenschaftlichen Ideal der vorherigen Berechnung abzuarbeiten, aber die dann tatsächlich realisierten Konstruktionen wurden im elektrotechnischen Prüffeld untersucht und getestet. Das Ziel war dabei nicht, die Theorie zu testen, sondern die Eigenschaften der Elektromotoren zu bestimmen, wie z.B. die Drehzahl-Drehmoment-Kurve, Wirkungsgrad, Rückwirkungen ins Netz, Erwärmung, Arbeitsbereich und Verschleiß. Wenn Theorie dabei Hilfe leistete, wurde sie natürlich gerne eingesetzt. Gebaut wurden die Elektromotoren in den Laboren und Werkstätten der Industrie und herauskommen musste ein verkaufsfähiges Produkt mit halbwegs abgesicherten Eigenschaften. Die Testbedingungen hatten sich an den Einsatzbedingungen zu orientieren und nicht wie in der Physik an den Bedingungen, die die Gültigkeit der Theorie voraussetzt.

Diese Prüffelder haben sicherlich viel zur Entstehung der Elektrotechnik als eigenständige Wissenschaft geleistet, denn in ihnen entwickelten sich Methoden und Verfahren zur Bewertung der elektrotechnischen Systeme unter den Maßgaben der Technik und nicht nur der Physik.

Noch 1917 berichtete Dolivo-Dobrovolsky, der den von Ferraris und Tesla erfundenen Asynchronmotor, so weiterentwickelte, dass er zu einem verkaufsfähigen Produkt werden konnte, „daß, mindestens bei Pionierarbeit, plastische körperliche Vorstellung mehr Wirkungsgrad aufweist, als lange Formeln und Gleichungen, welche erst im späteren Entwicklungsgang einsetzen sollten.“ (zitiert nach König 1995, S. 315).

Das technische Experiment Elektromotor zeigt also beides: Man muss über bestimmtes Wissen verfügen, um überhaupt einen Motor konstruieren zu können. Aber wenn er dann realisiert wird, entwickelt sich das Wissen weiter und neues Wissen kommt auf dem Prüfstand hinzu. Wissen, das sich nicht nur der Physik zuordnen lässt, sondern zu einer Entwicklung der Kompetenz des Experimentators führt. Damit ist einerseits das manuelle Geschick gemeint, das es erlaubt die Konstruktion fehlerfrei zu realisieren. Aber andererseits auch die Ausbildung eines Gespürs für die Weiterentwicklung der Konstruktion. Die ersten Konstrukteure wussten noch nichts von der Umwandlung der elektrischen, in magnetische und mechanische Energie, aber sie konnten an der abgegebenen Leistung und dem Zeitverhalten des Akkumulatorstroms bemerken, ob sie mit ihrer Konstruktion auf den richtigen Weg waren. Neben diesem an die Person des Experimentators gebundenen Wissen entwickelt sich ein institutionell

verankertes Wissen, zunächst in den Laboren und Werkstätten der Industrie, dann aber auch in den Universitäten.

Didaktische Schlussfolgerungen

Welche Schlussfolgerungen kann man aus der experimentellen Herausbildung des Elektromotors ziehen.

1. Das Verhältnis zwischen Theorie und Praxis ist verwickelter als häufig gedacht. Eine Vorstellung von der die Praxis anleitender Theorie ist jedenfalls nicht haltbar. Aber umgekehrt kann man auch nicht behaupten, dass die Praxis bei jeder Theorie funktionieren würde.
2. Genauer besehen zeigt sich die Praxis als ein Handlungsfeld, in das Theorie eingehen kann, aber nicht zwangsläufig muss. Theoretische Elemente werden in Hinblick auf das Ziel praktischen Handelns befragt und danach bewertet. Dies ist allerdings ein gewichtiger Unterschied zur Theorie, in der Zwecke und Ziele nicht vorkommen, sondern Widersprüche und Übereinstimmung zu anderen theoretischen Aussagen und die Entwicklung zu einem in sich stimmigen System, wie es z.B. die Maxwell-Gleichungen darstellen.
3. Eine bedeutende Rolle spielt die Erfahrung, die durch das Experiment vermittelt wird. Im technischen Experiment geht Erfahrung in Bezug auf die Realisierung des angestrebten Nutzens eines technischen Systems ein. Bei der Konstruktion technischer Objekte gehen Vorstellungsvermögen und Phantasie ein, die sich teilweise weit von theoretischer Richtigkeit entfernen, dennoch praktische Erfolge erlauben.
4. Doch auf Dauer gelingt die Weiterentwicklung der Technik zur Technologie nur durch die theoretische Durchdringung.

Insbesondere für die Technikdidaktik folgt: das technische Experiment sollte so angelegt sein, dass es die Phantasie und Kreativität in der konstruktiven Phase herausfordert. Es sollten Prototypen von einfachen Maschinen angefertigt werden, die dann auf einem Prüffeld in Hinblick auf ihre Verwendung getestet werden²³. Physikalische Kenntnisse sollten sich bei den experimentellen und konstruktiven Handlungen als nützlich erweisen, aber nicht zum Gegenstand des Versuchs werden. Physikalische Experimente könnten das Verhalten von Bauelementen des technischen Systems demonstrieren, damit klarer wird, worauf bei der Entwicklung zu achten ist. Die Entwicklung einer inneren Vorstellung des Geräts und eines Konzepts seiner Verwendung und seines Gebrauchs gehören zu den wichtigsten Zielen eines technischen Experiments. Diese innere Vorstellung des Geräts ist kaum explizit abzufragen, lässt sich aber an den Konstruktionen und ihren Umsetzungen ablesen.

Für die Physikdidaktik kann man aus dem Beispiel des Elektromotors schlussfolgern, dass es wichtig ist, zu erkennen, wann dieser nur als Anwendung physikalischer Prinzipien verwendet wird, wie z.B. in den Animationen auf leifiphysik.de. Es ist zwar für den Physiker reizvoll, seine Kenntnisse des Elektromagnetismus am Elektromotor wiederzuerkennen, aber Schülerinnen und Schüler, die diese Kenntnisse noch nicht haben, sind vermutlich nicht so leicht für solche der Physik immanenten Motive zu haben. Die Seite des technischen Gebrauchswerts könnte da eine Ergänzung im Physikunterricht darstellen. Der Motor sollte sich also nicht bloß drehen, was ja physikimmanent schon ausreicht, sondern auch nützliche Arbeit verrichten und etwas antreiben. Von verschiedenen Schülergruppen aufgebaute Elektromotoren könnten so in Hinblick auf Drehmoment und Drehzahl verglichen werden.

²³ Die Entwicklung und Konstruktion des Mausefallenautos ist ein solches technisches Experiment <https://de.wikipedia.org/wiki/Mausefallenauto>.

Wenn man dann in einem zweiten Durchgang versucht, die eigenen Konstruktionen zu verbessern, könnte sich das Physikwissen als hilfreich erweisen und eine bessere Konstruktion ermöglichen.

Die Geschichte zeigt aber auch, dass kein Experiment zu einem spricht und verrät, was zu sehen ist. So haben vermutlich viele Experimentatoren die Bewegung einer Kompassnadel *gesehen* als sie elektrische Experimente machten. Sie haben sie aber nicht *wahrgenommen*, d.h. ihnen ist nicht aufgefallen, dass diese Bewegung eine bemerkenswerte Tatsache ist. Für die Didaktik bedeutet dies, dass der Phase des Unterrichts vor dem Experiment, in dem die Erwartungen entwickelt werden, große Bedeutung zu kommt. Denn das Auftreten eines Effekts bedeutet keineswegs, dass er damit auch schon wahrgenommen wird. Aber auch der Unterricht nach dem Experiment ist wichtig, wenn es darum geht, das Gesehene, Wahrgenommene und auch Erkannte zu kommunizieren. Da der Erfahrung eine große Rolle im Experiment zukommt, darf es nicht bei einem Experiment bleiben, sondern durch die Wiederholung wächst erst die Fähigkeit zum zielgerichteten Eingriff, dessen Resultate sich auch reproduzieren lassen. Schlussendlich ist das Experiment aber auch ein Erlebnis oder kann zumindest eines werden. Dass man mit eigenen Sinnen und eigenem Handeln Effekte erzielen kann, wie sie Physiker und Ingenieure in ihren Laboren erzielt haben, kann etwas hervorbringen, was nicht unterschätzt werden sollte: Die Erfahrung der Selbstwirksamkeit. Schülerinnen und Schüler, die erlebt haben, dass sie selbst in der Lage sind, einfache Effekte wie Magnetismus, Induktion hervorzubringen und einfache Maschinen in Bewegung zu setzen, werden sich diesem Gebiet nicht vorschnell verschließen. So gesehen sind Experimente sogar ein nicht zu unterschätzendes Mittel im Rahmen der Berufsorientierung. Allerdings tritt dieser Effekt nicht zwangsläufig auf, aber der erfahrene Experimentator weiß ja, wie wichtig die Ausführungsbedingungen sind.

Autor

Prof. Dr. Peter Röben
Arbeitsgruppe Technische Bildung (ATB) im Institut für Physik
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Ammerländer Heerstr. 114-118
26129 Oldenburg
Tel.: 0441-798-2931
Peter.roeben@uol.de

Oldenburg, im Januar 2020

Literaturverzeichnis

Bacon, Franz (1870): Franz Baco's Neues Organon. Uebersetzt, erläutert und mit einer Lebensbeschreibung des Verfassers versehen von J. H. v. Kirchmann. Berlin, L. Heimann Verlag. Die Ziffer bezieht sich auf die Absatznummer, <http://www.zeno.org/nid/20009151230>

Brentjes, Burchard; Richter, Siegfried; Sonnemann, Rolf (Hg.) (1987): Geschichte der Technik. 2., durchges. Aufl. Köln: Aulis-Verl. Deubner (Geschichte der Technik und Naturwissenschaften).

Dittmann, Frank (1998): Geschichte der elektrischen Antriebstechnik in Deutschland. In: Kurt Jäger (Hg.): Alles bewegt sich. Beiträge zur Geschichte elektrischer Antriebe. Berlin: VDE-Verl. (Geschichte der Elektrotechnik, 16), S. 7–126.

König, Wolfgang (1995): Technikwissenschaften. Die Entstehung der Elektrotechnik aus Industrie und Wissenschaft zwischen 1880 und 1914. Chur, Schweiz: G+B Verlag Fakultas (Technik interdisziplinär, Bd. 1).

Lindner, Helmut (1986): Elektromagnetismus als Triebkraft im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts. dargestellt am Beispiel der Arbeiten von Moritz Hermann Jacobi (1801-1874), und Johann Phillip Wagner (1799-1879). Dissertation. Berlin.

Mahr, Otto (1941): Die Entstehung der Dynamomaschine. Berlin: J. Springer.

Millikan, Robert A. (1923): http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.pdf.

Müller, Johann (1912): Lehrbuch der Physik und Meteorologie, 8. umgearbeitete und vermehrte Auflage, 1881, Band 3, <https://ia801407.us.archive.org/22/items/lehrbuchderphys03mathgoog/lehrbuchderphys03mathgoog.p>

Peinke, J., Heinemann, D. and Kühn, M. (2014), "Windenergie – eine turbulente Sache? Die Physik trägt dazu bei, die Effizienz von Windenergieanlagen zu steigern", *Physik Journal*. **7** 7

Schreier, Wolfgang; Ackermann, Peter (Hg.) (1991): Geschichte der Physik. Ein Abriß. 2., bearb. Aufl. Berlin: Dt. Verl. der Wiss.

Smith, Sigurd (1912): Soren Hjorth. Inventor of the dynamo-electric prinziple. Jorgenssen & Co. Kopenhagen. <https://archive.org/details/srenhjorthinve00smitrich>

Vorssellmann de Heer, P. O. C. (1839): Ueber den Elektromagnetismus als bewegende Kraft. In: *Ann. Phys. Chem.* 123 (5), S. 76–101. DOI: 10.1002/andp.18391230505.