Zeitschrift: Jahrbuch der Sekundarlehrerkonferenz des Kantons Zürich
Herausgeber: Sekundarlehrerkonferenz des Kantons Zürich
Band: - (1928)

Artikel: Zur Problemphysik
Autor: List, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-819653

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Zur Problemphysik.

Von *A. List,* Birwinken.

I.

1. Im Iahre 1820 machte der dänische Physiker Oersted, (1777-1851) Professor in Kopenhagen, bei Gelegenheit seiner Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus die Entdeckung, daß die nordweisende Spitze einer frei aufgehängten Magnetnadel, über welcher ein galvanischer Strom in der Richtung Süd-Nord floß, nach Westen abgelenkt wurde.

Die ganz unerwartete Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus war für die Zeitgenossen Oersteds das Auffälligste der Erscheinung. Bis zu diesem Zeitpunkte hatte man den Magnetismus als die abgeschlossenste der physikalischen Disziplinen betrachtet und zur Erklärung seiner Attraktions- und Repulsivkräfte zwei oder drei magnetische Flüssigkeiten konstruiert. Dies war in Uebereinstimmung mit der Ansicht erfolgt, daß für die verschiedenen an- und abstossenden Kräfte auch verschiedene Materien notwendig wären, da nach dem uralten Problem von Kraft und Stoff jede Veränderung einen unveränderten Träger der Veränderung voraussetzt. In einer Zeit, wo die Zahl der Elemente zusehends wuchs, empfanden die Gelehrten keine Bedenken, noch weitere imponderable Flüssigkeiten zu erfinden. So kannte man am Anfang des 19. Jahrhunderts 8 Imponderabilien, an deren reeller Existenz wohl niemand zweifelte. Nun forderte aber die neue Entdeckung die Elimination der magnetischen Imponderabilien, da der Zusammenhang der beiden Kräfte, der Elektrizität und des Magnetismus, mit der Existenz unwandelbarer elementarer Materien

unvereinbar war, und führte so logischerweise zum Zusammenbruch der damals herrschenden Betrachtungsweise auch auf andern physikalischen Gebieten. Die allgemeine Aufmerksamkeit der Forscher richtete sich von nun an auf die wechselseitige Transformation der Naturkräfte, die dann in der Festlegung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie die Krönung fand.

Die Bedeutung der neuen Entdeckung zeigte sich im weiteren Verlaufe der wissenschaftlichen Fortschritte in der großen Fruchtbarkeit der Probleme, die sich auf Grund des Oersted'schen Fundamentalversuches stellen liessen. Sie dürften auch für die Schulphysik wegleitend sein.

Um in das neue Gebiet der Elektrodynamik einzuführen, erhebt sich für den Unterricht die Frage: Kann der Zusammenhang zwischen den beiden Gebieten, Elektrizität und Magnetismus, durch ein logisch weiterschreitendes Denken, dem eine „Entdeckung" als Forschungsaufgabe vorliegt, aufgedeckt werden? Kann auf Grund des vorgängig behandelten Stoffes in der Elektrostatik und Magnetostatik das Problem der Wechselwirkung elektrischer und magnetischer Kräfte in Angriff genommen werden?

Im Unterrichte werden in den weitaus meisten Fällen die beiden Disziplinen getrennt behandelt. Der Grund zu einem solchen Gedankengang ist wohl in dem methodischen Bestreben zu suchen, auf unserer Schulstufe die wichtigsten elektrischen und magnetischen Eigenschaften in aller Einfachheit auf das Tatsächliche zu untersuchen, umso mehr, als durch das Fehlen spezifischer Sinnesorgane für diese Erscheinungen die Arbeit des Lehrers ohnehin erschwert ist. Ein weiterer Grund zu dem erwähnten Vorgehen liegt in der geschichtlichen Entwicklung der beiden Gebiete.

Manche Analogien zwischen Elektrizität und Magnetismus könnten zwar auch bei dieser streng geschlossenen Betrachtungsweise vermuten lassen, daß zwischen den beiden Gebieten ein innerer Zusammenhang bestünde. Auf unserer Schulstufe kämen hier aber höchstens die entgegengesetzten Polaritäten, die Attraktions- und Repulsivkräfte in Frage, die auf eine Verwandtschaft hindeuten könnten. Hiebei scheint aber der Hinweis

nicht unangebracht, daß der Schluß aus der Analogie logisch nicht berechtigt ist; die an die Analogie geknüpfte Erwartung ist nur in unserer Auffassung von den Dingen begründet.

Allein auch jener vermutete innere Zusammenhang zwischen den beiden Gebieten ließe noch nicht die Möglichkeit zu, durch eine planmäßige Problemstellung die Anordnung zu jenem Fundamentalversuch zu treffen. Das zeigt schon Oersteds vergebliches Bemühen bei Versuchen mit der offenen galvanischen Kette. Da auf Grund des behandelten Stoffes dynamische Zustände der statischen Elektrizität nicht bekannt sind, kann man auch nicht auf eine Versuchsanordnung schließen, in welcher ein dynamischer elektrischer Zustand auf einen statischen magnetischen Zustand einwirkt.

So wird für den Unterricht der nächstliegende gangbare Weg zur Eröffnung der Elektrodynamik der sein, an den erwähnten Versuch Oersteds anzuschließen. Man verwende ein Zink-Kupferelement, führe den an das Kufper angeschlossenen Poldraht in der Süd-Nordrichtung über eine freie bewegliche Magnetnadel und zurück zum Zinkpol, sodaß eine geschlossene Kette vorhanden ist.

Ein vorerst unmotivitierter Schauversuch führt damit eine Tatsache vor, die einst dem Forscher durch einen Zufall in die Hände gespielt wurde. Wenn bis anhin im Unterrichte magnetische und elektrische Eigenschaften der Wahrnehmung nach scheinbar unabhängig auftraten, so bringt das Experiment einen neuen Einblick in den Zusammenhang der Naturkräfte. Es eröffnet sich damit eine neue physikalische Welt, in welcher sie in unlösbarer Verbindung stehen.

2. Nach dem ersten Versuche liegt es nahe, die verschiedenen gegenseitigen Lagen von Magnetnadel und Leiterdraht, der die Pole eines Kupfer-Zinkelementes verbindet, zu untersuchen, um alle Ergebnisse durch eine beherrschende Idee zusammenzufassen.

Bei sonst gleicher Anordnung führt man den Poldraht *unter* der Magnetnadel vorbei. Es erfolgt dabei ein Ausschlag der nordweisenden Spitze nach Osten, also nach der entgegengesetzten Richtung wie im ersten Versuche. Natürlich wird man

im Experimentalunterricht darnach trachten, bei den verschiedenen möglichen Lagen die in Frage kommenden Richtungen auf weitere Entfernung hin sichtbar zu machen. Der magnetische Meridian werde durch einen gespannten Faden oder durch eine Linie auf dem Experimentiertische sichtbar gemacht. Die Richtung der *nordweisenden* Spitze der Nadel wird durch ein *rotes*, die *südweisende* Spitze durch ein *grünes* Holundermarkkügelchen gekennzeichnet.

3. Da aus der Elektrostatik bekannt ist, daß die beiden Pole eines Elementes entgegengesetzte Eigenschaften aufweisen, wenn man sie mit den Belegen eines Kondensators in Berührung bringt, wird man einen Polwechsel vornehmen. Die Nadel schlägt alsdann nach der entgegengesetzten Seite aus.

Aus der Behandlung der magnetischen Eigenschaften ist bekannt, daß eine Magnetnadel durch ein sie umgebendes Magnetfeld beeinflußt wird. Aus der Ablenkung der Nadel schließen wir auf ein Magnetfeld, das vom geschlossenen Poldraht ausgeht und gerichtet ist. Dieses Magnetfeld sucht nun offenbar die Nadel in seine Kraftlinien zu stellen.

Die merkwürdigen Zustandsänderungen, die vom Leiterdrahte ausgehen, rufen einem physikalischen Begriff, der sich schon aus einer kleinen Erfahrungsgruppe durch Nachdenken ergibt. Es entspricht einem ökonomischen Bedürfnis, auf eine einfache Art das vorhandene Tatsachenmaterial anschaulich zu beschreiben und es also zu bewältigen, daß wir auch Erscheinungen voraussehen und beherrschen können, ohne den Anspruch dabei erheben zu wollen, damit die Realität der Dinge bezeichnen zu wollen. „Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußern Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Uebereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserm Geiste. Die Erfahrung lehrt, daß die Forderung erfüllbar ist und daß solche Uebereinstimmungen in der Tat bestehen.“

Die anhaltende Wirkung des Poldrahtes auf die Magnetnadel deutet auf einen anhaltenden Zustand im Drahte, welcher

nicht mehr vorhanden ist, wenn der Draht mit dem Element nicht eine geschlossene Kette bildet. Um uns in obig angedeutetem Sinne von Hertz das Unbekannte, das sich im Drahte abspielt, unserer Vorstellung näher zu bringen, denken wir uns, daß sich im Drahte Elektrizität dauernd bewege, etwa wie Wasser in einer Wasserleitung. Auf Grund dieses uns zurechtgelegten Bildes sagen wir, im Drahte fließe ein elektrischer Strom.

Es ist klar, daß mit diesem Satze vorerst über die Natur des elektrischen Stromes wie über gewisse Eigenschaften nichts ausgesagt wird. Die Einführung des Begriffes „Strom“ soll bei umfassenden Beschreibungen in erster Linie schwerfällige Ausdrücke, wie etwa „Zustandsänderungen, die durch eine ganz bestimmte experimentelle Anordnung hervorgerufen werden“, eliminieren. Im weiteren sollen freilich unsere groben Vorstellungen, die wir von den Dingen machen, zum Ausdruck kommen, um den Vorgängen, die unseren Sinnen entzogen sind, mit mechanischen Hilfsvorstellungen näher zu kommen.

Wie jedem Wasserstrome eine ganz bestimmte Richtung innewohnt, so legt auch der Versuch dar, daß dem elektrischen Zustand des Poldrahtes ebenfalls eine ganz bestimmte Richtung zukommt, womit das Bild, das wir uns über die innern Vorgänge machten, hierin im Sinne von Hertz richtig und logisch zulässig ist. Da die beiden Richtungen als gleichwertig erscheinen, ist man übereingekommen, die Richtung vom positiven Kupfer zum negativen Zink als die positive Richtung des Stromes zu wählen. An diese Konvention wird gelegentlich, z. B. bei der Behandlung der Elektrolyse, erinnert werden müssen.

An den leichtverständlichen Ausdruck, bezw. an das anschauliche Bild vom Strome können wir die Forderung stellen, daß die Verfolgung dieses Begriffes oder Bildes neue Schlußfolgerungen zulasse. So sei für die Entwicklung des Strombegriffes darauf hingewiesen, daß im Begriff „elektrischer Strom“ auch der Begriff der kinetischen Energie enthalten ist. Wir haben es hier mit einer tiefer schürfenden Analogie zu tun, da sie den Energieumsatz im Drahte mit der im Wasserstrom geleisteten mechanischen Arbeit verknüpft.

Nach der gaskinetischen Theorie der Elektrizitätsleitung in Metallen besteht der elektrische Strom in einer Wanderung von Elektronen längs des Drahtes. Vom realistischen Standpunkt aus wird man offenbar sagen dürfen, daß die rein formale Analogie in die Identität übergegangen ist. Es will nun scheinen, daß sich der Unterricht nicht mehr mit dem vorhin erwähnten „bildhaften“ Standpunkt begnügen will. Um modern zu sein, wird gerade hier die völlige Uebereinstimmung des Wasserstromes mit dem elektrischen dargelegt, wo eben die atomistisch geteilte Elektrizität die Strömung verursacht. Damit rückt die Vorstellungswelt der Forscher ganz unvermittelt in den Ideenkreis der Schüler. Schon aus diesem Grunde ist ein derartiges Vorgehen und ein weiteres Operieren mit den Elektronen vom Standpunkt der Problemphysik zu verwerfen. Dazu kommt noch die ganz unrichtige Vorstellung, durch populäre Schriften nur allzusehr verbreitet, daß diese Elektronen mit ganz unheimlichen Geschwindigkeiten durch den Draht fliegen sollen, indes die gaskinetische Theorie der Metalle, die heute trotz ihrer Einfachheit und Eleganz der Gittertheorie zu weichen scheint, den Leitungselektronen in der Richtung der elektrischen Kraft nur ein Schneckentempo zuschreiben kann. Offenbar findet eine Verwechslung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Feldes statt oder man identifiziert fälschlicherweise die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen des Elektronengases mit der Geschwindigkeitskomponente in der entgegengesetzten Richtung der elektrischen Kraft, die allein für die Elektrizitätsübertragung, resp. Strömung in Frage kommt.

Besieht man nun alle weiteren Versuchsergebnisse unter jener alle Fälle umfassenden Idee vom elektrischen Strome, so darf hier nicht verschwiegen werden, daß mit dem Namen „elektrischer Strom“ nach dem Vorschlage Ampères der Poldraht als der Träger der elektrodynamischen Vorgänge erscheint. Die Voraussetzung, daß in ihm eben die unmittelbare Ursache der erwähnten Erscheinungen liege, machen ihn damit zum Kanal der bewegten elektrischen Materie. Eine derartige Auffassung ist aber dahin zu korrigieren, daß die elektromagnetischen Vorgänge auch den Raum, der den Leiter umgibt, erfüllen. Ja, gerade diese Vorstellung, daß der luftleere Raum als das Medium

aufzufassen ist, das als Sitz der elektrischen und magnetischen Kräfte diese weiter vermittelt, ermöglicht es, einen klaren Einblick in Zusammenhänge zu gewinnen, die sich uns sonst nicht offenbaren würden.

4. Die Reproduktion des Oersted'schen Versuches in Abschnitt 1 bringt aber noch eine andere, sehr auffällige Erscheinung in den Vordergrund des Interesses. Nach dem Newton'schen Gravitationsgesetz ist die Kraft, mit welcher zwei Massenpunkte einander anziehen, längs der Verbindungsgeraden beider Massenpunkte gerichtet. Auch die elektrischen und magnetischen Attraktions- und Repulsivkräfte wirken in der Verbindungslinie der elektrisch geladenen oder magnetischen Punkte. Die Oersted'sche Entdeckung aber zeigt, daß sich die elektromagnetische Kraft diesen früher berührten Tatsachen nicht unterordnet, daß sie also weder anziehend noch abstoßend wirkt. Ich habe zwar schon Physikbücher zur Hand gehabt, die das Seltsame, Ungewohnte der neuen Naturkraft offenbar nicht kannten, es durch einen Nominalismus verschleierten, indem sie kurzerhand statt des Wortes „ablenken" den in der Elektrostatik und Magnetostatik üblichen, auf einer Voraussetzung beruhenden Ausdruck „abstoßen" gebrauchten!

Für den Beobachter handelt es sich darum, die Richtung der ablenkenden strommagnetischen Kraft festzustellen. Hiebei liegt es am nächsten, vom Versuch unter Abschnitt 1 ausgehend, den Leiter in den verschiedensten Richtungen in der gleichen Horizontalebene über oder unter der Magnetnadel zu leiten, was ja am einfachsten durch Drehung des Leiterstückes erreicht wird. Man wird bei Stromschluß in den verschiedenen Stellungen bemerken, daß die Ablenkung der Nadel am größten ist, wenn der Leiter im magnetischen Meridian liegt. Steht das Leiterstück senkrecht hiezu, so findet keine Ablenkung statt. In den Zwischenlagen erreicht der Drehwinkel Werte, die innerhalb der extremen Werte liegen.

Daraus schließt man, daß sich die magnetische Achse der Nadel senkrecht zur Stromrichtung zu stellen sucht, da sie in dieser Stellung keine weitere Drehung mehr erfährt. Da das magnetische Erdfeld allein die Magnetnadel in den magnetischen Meridian stellt, nimmt sie unter gleichzeitiger Einwirkung des

strommagnetischen Feldes eine der beobachteten Zwischenlagen ein, gemäß der Zusammensetzung der Kräfte nach dem Parallelogrammsatz.

5. Das Wesentliche der elektrodynamischen Kraft liegt also darin, daß sie senkrecht zur Ebene steht, die durch den geraden Stromleiter und den Pol gebildet wird und so eine Drehung bewirkt. Sie ist eine Transversalkraft. Stromleiter, Verbindungsgerade von Stromleiter und Pol, sowie die magnetische Feldstärke stehen paarweise senkrecht aufeinander und lassen erkennen, daß die elektrodynamischen Wirkungen mit der Struktur unseres konventionellen euklidischen Raumes zusammenhangen, die Natur selber durch ihre Größen ein rechtwinkliges Koordinatensystem kennt.

Zur Illustration der höchst eigenartigen Transversalkraft hänge man einen Magnetstab in vertikaler Lage, mit dem Nordpol nach unten, an einer hydrostatischen Wage auf und tariere. Die Aufhängevorrichtung ermöglicht eine Verschiebung des Magneten längs seiner Achse. Bringt man einen stromdurchflossenen Leiter in wagrechte Lage, Richtung des Stromes vom Beschauer weg, links neben den Nordpol, so senkt sich der Hebelarm mit dem Magneten, ein sinnfälliger Beweis für die Transversalität der elektrodynamischen Kraft.

6. In den Versuchen unter Abschnitt 1 und 2 wurde der Leiter parallel unter und über der Magnetnadel geführt. Als eine weitere Lagenkombination wähle man die beiden Fälle, bei welchen der Leiter links und rechts neben die Nadel zu liegen kommt, also in der Schwingungsebene der Deklinationsnadel liegt. Die Stromrichtung sei diejenige der Richtung Süd-Nord.

In diesen beiden Lagen findet keine Ablenkung statt, dagegen beobachtet man in der Stellung des Leiterstückes links von der Nadel ein Neigen der nordweisenden Spitze, in der gegensätzlichen Stellung rechts von der Nadel ein deutliches Aufkippen des Nordpoles.

Ganz im Sinne des Begriffes vom elektromagnetischen Felde mit seiner Darstellung durch Vektoren und Kraftlinien liegt es, wenn man auf Grund der Versuche in Abschnitt 1, 2 und 6 die Beobachtungen einer einheitlichen Idee unterwirft, daß der elektrische Strom einen Wirbel um den Leitungsdraht

beschreibt, dessen Eigentümlichkeit ja darin besteht, daß die Kräfte an den Enden seines Durchmessers in entgegengesetztem Sinne wirken. Eine entsprechende Zeichnung für die Kraftrichtung des Stromes auf den Nordpol der Nadel für jeden einzelnen Versuch erleichtert in hohem Maße das Verständnis für die erwähnten Tatsachen.

Im magnetischen Wirbel haben wir eine rein formale Analogie vor uns, welche wieder eine anschauliche und leicht faßbare Ausdrucksweise gestattet. Sie liegt auch deshalb recht nahe, weil die mathematische Formulierung der Flüssigkeitsströmung identisch ist mit der des magnetischen Feldes eines Stromes.

Im Kraftlinienverlauf in geschlossenen Linien im Raume um den Stromleiter zeigt sich ein neuer Typus eines Kraftlinienfeldes, der von dem der Elektrostatik und Magnetostatik ganz verschieden ist. Die elektrischen Kraftlinien haben ihren Ursprung in Elektrizitätsmengen und endigen wieder in solchen. Die magnetischen Kraftlinien können nur durch die Masse des Magneten als geschlossene Linien gedacht werden. In beiden Fällen wird beim Herumführen einer elektrischen Ladung oder eines Magnetpoles längs einer geschlossenen Linie keine Arbeit geleistet. Beim elektromagnetischen Felde aber verlaufen die Kraftlinien frei geschlossen in einem homogenen Raume, wobei schon aus den gemachten Beobachtungen zu schließen ist, daß die Arbeit, die beim Herumführen eines Magnetpoles um eine geschlossene, den Stromleiter umschlingende Kurve gewonnen wird, nicht Null sein kann.

Die magnetischen Kraftlinien und damit die Wirbel des Magnetfeldes ergeben sich aus dem Oersted'schen Versuche schon durch Symmetriebetrachtungen. Man denke sich eine Ebene gelegt, welche das Leiterelement, den Quellpunkt, und den Magnetpol, den Aufpunkt, enthält. Die Richtung der magnetischen Kraft steht alsdann laut Versuch senkrecht auf dieser Ebene. Stellen wir uns vor, jene Ebene mit dem Aufpunkt werde um das Leiterelement gedreht, so erkennen wir leicht, daß die Kraftlinien Kreise mit dem Leiterelement als Zentrum sein müssen. Eine weitere Betrachtung wird auch ergeben, daß die Wirbelräume des strommagnetischen Feldes

und die Kraftlinien einander ringförmig umschließen wie die Glieder einer Kette. Eine Veranschaulichung durch ein Modell wird die anscheinend schwierige Sache leicht faßlich machen und damit zur Stärkung des Raumvorstellungsvermögens beitragen.

7. Aus der Tatsache, daß die magnetischen Kraftlinien eines stromführenden Leiters diesen als geschlossene Kurven umschließen, folgt, daß ein frei beweglicher Magnetpol in einem derartigen Felde dauernd um den Strom rotieren muß. Eine Versuchsanordnung zur Demonstration einer solchen Rotation scheint indes nicht möglich zu sein, da sie die Isolierung eines Magneten verlangt, die beiden Polaritäten sich aber nicht trennen lassen.

Indessen wird eine allseitige Ueberlegung nicht bloß den Magneten an und für sich, sondern auch dessen Lage zum Stromleiter berücksichtigen. Alsdann wird sich die Möglichkeit ergeben, durch eine zweckmäßige Anordnung einen Magneten so im strommagnetischen Felde anzuordnen, daß sich nur ein Pol im Wirkungsbereiche des Feldes befindet, die Kraftlinien also nur einen Pol umschlingen, wobei freilich der Magnet bei einer Umdrehung die Strombahn schneiden muß.

Man hänge zu diesem Zwecke eine magnetisierte Stricknadel an einem langen Faden so auf, daß sie nur mit ihrem untern Pole in das Feld eines senkrecht stehenden, geraden Leiters kommt. Je nach der Stromrichtung rotiert der Magnet im einen oder andern Drehsinne. Um das Schneiden der Strombahn durch den Magneten zu ermöglichen, stellt man am obern Ende des geraden Leiterteiles einen losen Kontakt her durch bloßes Berühren der stromführenden Teile.

Man könnte hier die Frage stellen, woher der Arbeitsaufwand genommen wird, wenn der Magnetpol dauernd um den Leiterdraht rotiert. Diese Frage mag bei der Behandlung der Größen des Stromkreises untersucht werden.

8. Aus den bisherigen Versuchen zu schließen, verlaufen die magnetischen Kraftlinien in einer Ebene, die senkrecht zum Leiter steht. Diese Erkenntnis bringt die Anregung, den Kraftlinienverlauf ad oculos zu demonstrieren. Nach der in der Magnetostatik üblichen Veranschaulichungsmethode der Kraftlinien

kann leicht eine Versuchsanordnung getroffen werden, welche den Kraftlinienverlauf des elektromagnetischen Feldes sichtbar macht. Eine derartige experimentelle Darstellung hat dazu die weitere, sehr wichtige Bedeutung, daß sie recht anschaulich und eindringlich die Betrachtungsweise der magnetischen und elektrischen Polarisation stärkt, wonach in den Volumenelementen des Eisens wie in der isolierenden Substanz, die sich am Vorgang beteiligt, magnetische oder elektrische Momente auftreten.

Man stecke ein längeres, geradliniges Drahtstück durch einen Kork und lege ein steifes Blatt Papier darauf, auf das man Eisenfeile streut. Nach zweckmäßigem Einspannen in ein Stativ und nach Anschluß des Drahtstückes an eine starke Gleichstromquelle (25—30 Ampère) ordnen sich die Feilspäne in deutlichen Kreisen um den Draht und zeigen so den Verlauf der strommagnetischen Kraft. Das Kraftlinienbild ändert sein Aussehen nicht, wenn man das Blatt längs des Drahtstückes parallel zu seiner Lage verschiebt. Damit ist auch der Nachweis von der Existenz magnetischer Wirbelfelder um den Leiter erbracht.

Um zu zeigen, daß dem strommagnetischen Felde eine Richtung innewohnt, kann man auch um den vorhin senkrecht eingespannten Leiterdraht eine an einem Faden aufgehängte, in einer horizontalen Ebene schwingende, kleine Magnetnadel führen, die in jedem Punkte den Kraftlinienverlauf angibt. Fließt der Strom in umgekehrter Richtung, so weist auch die Magnetnadel mit ihrem Nordpol an derselben Stelle nach der entgegengesetzten Richtung.

Daß eine longitudinale Komponente der elektrischen Kraft, also eine Komponente in der Leiterrichtung, fehlt, läßt sich dadurch veranschaulichen, daß man einen geraden Stromleiter wagrecht über eine mit Eisenfeilspänen bestreute Glasplatte bringt. Bei Stromschluß ordnen sich die Feilspäne senkrecht zur Leiterachse und zeigen damit das Fehlen der longitudinalen Komponente.

Die Voranstellung des Oersted'schen Versuches zur Einführung in das Gebiet der Elektrodynamik ergibt so im Verlaufe einer planmäßig durchgeführten Erarbeitung den Verlauf der magnetischen Kraftlinien in Form geschlossener, kreisrunder Bahnen um den Leiter. Eine Einführung in den Zusammenhang

zwischen Elektrizität und Magnetismus mit einem Experiment, das die vollendete Tatsache des magnetischen Kraftlinienverlaufes vermittelt, scheint mir wenig geeignet, das Augenmerk auf jenes fundamental Neue zu konzentrieren. Zudem wird in dem hier vorgelegten Gedankengang der Forderung nachgelebt, daß der Physikunterricht nach Möglichkeit zu zeigen habe, auf welchen Wegen die physikalischen Erkenntnisse gewonnen wurden. Auf diese Weise gewinnt man auch die richtige Einschätzung der mühevollen Forscherarbeit.

9. Mit der so gewonnenen Einstellung zum Kraftlinienverlauf ergibt sich, daß zwischen Ablenkungsvorrichtung und der Richtung des elektrischen Stromes eine einfache Beziehung besteht, die Ampère in seiner bekannten Schwimmregel zum Ausdruck gebracht hat. Das umständliche Hineindenken des menschlichen Körpers in den Draht hat der bequemeren Rechtenhandregel gerufen: Man lege die rechte Hand so an den stromdurchflossenen Leiter, daß der Strom in der Richtung von der Handwurzel zu den Fingerspitzen fließt, wobei die innere Handfläche der Magnetnadel zugewendet ist. Der Nordpol der Nadel wird alsdann in der Richtung des ausgestreckten Daumens abgelenkt.

Die beiden üblichen Regeln scheinen mir aber nach der vorerwähnten Entwicklung, die zur Vorstellung der magnetischen Wirbel führt, gesucht zu sein, wenn gleich zugegeben werden muß, daß die Rechtehandregel sehr „handlich“ ist und von den Schülern leicht und sicher angewendet wird.

Der Zusammenhang der Kraftlinien mit dem Strome erscheint aber durchsichtiger, wenn man einem gegebenen Fortschreitungssinn einen bestimmten Drehsinn zuordnet. Hier läßt sich an das Bild der Rechtsschraube anknüpfen, das ja auch in der gesamten mathematischen Physik als Grundlage für die konsequente Bestimmung derVorzeichen dient. Uebrigens benötigt man nicht einmal das Anschauungsbild einer Schraube. Man darf sich schon auf das Muskelgefühl berufen, das vom Gebrauche der Schraube, des Bohrers oder des Korkziehers genügend bekannt sein wird.

Einer gegebenen Fortschreitungsrichtung (Stromrichtung) entspricht derjenige Drehsinn (Ablenkungsrichtung), in welchem

eine Rechtsschraube sich beim Eindrehen bewegt. Damit lautet die spezielle Regel:

Der Sinn der auf den Nordpol einwirkenden Kraft entspricht dem Drehsinn einer Rechtsschraube. Diese Regel ist identisch mit der bekannteren Maxwell'schen Uhrzeigerregel: Blickt man in der Richtung des Stromes, so bewegt sich der Nordpol im Sinne des Uhrzeigers.

Mit Hilfe dieser Regel kann der positive oder negative Pol einer Stromquelle ermittelt werden. Man hat dabei nur zu untersuchen, in welcher Richtung eine Rechtsschraube eingedreht werden muß, um den Nordpol der Nadel im Drehsinn abgelenkt zu sehen.

Für die Schülerübungen bietet sich im Anschluß an diese Regel ein willkommenes Feld der Betätigung, sich mit allen möglichen Lagen des Leiterstückes zur Magnetnadel zu befassen und festzustellen, in welchen Lagen die Nadel eine Ablenkung oder keine erfährt. Das Ergebnis kann kurz zusammengefaßt werden: Steht der Poldraht senkrecht über der Nadelmitte, so bleibt die Nadel in der Ruhelage, weil in dieser Stellung die Einwirkung auf die Pole gleich und entgegengesetzt ist. Liegt das Leiterstück in der Schwingungsebene, so erfolgen Hebungen und Senkungen. In allen andern Lagen ist eine ablenkende Wirkung zu registrieren.

Die praktische Auswertung des Oersted'schen Versuches läge in dem Hinweis, daß hier die Anfangsgründe der Telegraphie liegen. Man denke sich für einen jeden Buchstaben einen Leiterdraht zu einer Magnetnadel geführt und von dort durch eine gemeinsame Rückleitung zum Element geschlossen. Am Aufgabeort werde durch einen Taster Stromschluß bewerkstelligt.

Mit diesen Beobachtungen sind die Mittel gegeben, um die schwachen, magnetischen Wirkungen, die in allen erwähnten Versuchen in Erscheinung treten, zu verstärken. Eine einfache Ueberlegung an Hand einer Zeichnung ergibt, daß ein Strom in der Richtung Süd-Nord über der Nadel und ein Strom in der Richtung Nord-Süd unter der Nadel durchgeleitet, eine verstärkte magnetische Wirkung ergeben muß. Eine derartige Anordnung der Leiterteile wird verwirklicht, wenn der Strom

in einer Schlinge über die Nadel geführt wird. Mit Hilfe der Schraubenregel wird die vereinte gleichgerichtete Wirkung der horizontalen und auch der vertikalen Leiter nachgewiesen.

Um die magnetische Kraft des Stromes weiter zu verstärken, führt man den Strom in vielen Windungen um die Magnetnadel. So erhält man einen Multiplikatoren. Hiebei sei bemerkt, daß der Name Multiplikator nicht richtig ist, da, wie man aus einer weiteren, hier nicht berührten Entwicklung ersehen kann, durch Hinzufügen von Drahtlängen der Widerstand größer und damit der Strommagnetismus geschwächt wird. Die verstärkte Wirkung der Multiplikatoren beruht auf der Vermehrung der Drahtschlingen von gleicher Wirkung, die aber eine verminderte magnetische Kraft äußern.

Die Verstärkung der magnetischen Kraft durch Vermehrung der Leiterteile gestattet, die in den Versuchen unter Abschnitt 8 notwendige elektromagnetische Feldstärke herzustellen, wenn eine erhebliche Stromstärke sonst nicht zu beschaffen ist. Man windet den Leiter zu einem Drahtviereck von ca. 25 cm Seitenlänge mit 20—30 Schleifen. Bei einer Stromstärke von ca. 3—4 Ampère ergeben die Leiterteile ein gutes Kraftlinienbild.

11. Beobachtet man bei sonst gleichbleibender Versuchsanordnung verschiedene Ausschläge der Nadel bei Verwendung verschiedener Elemente, so wird man bei weiterer Verfolgung des Bildes, das man sich über die innern Vorgänge im Poldraht gemacht hat, schließen können, daß dem Storm in Anbetracht der verschiedenen Einwirkungen des Leiterdrahtes auch verschiedene Stärke zukommen müsse. Man wird festsetzen:

Die Stromstärke ist umso größer, je stärker die Ablenkung ist. Die Berechtigung dieser Schlußweise wird an passender Stelle darzulegen sein.

Damit hat man sich im Galvanoskop eine Vorrichtuug geschaffen, die einigermaßen die Stromstärke der einzelnen Leiterkreise einschätzen läßt.

Die Beobachtung, daß beim Einschalten verschiedener Drahtlängen in den Stromkreis eines und desselben Elementes der Ausschlag am Galvanoskop mit wachsender Länge abnimmt, läßt auf ein Hemmnis, auf einen Widerstand schließen, der sich

dem Strome entgegensetzt. Sie leitet zu den Strommassen und den Stromgesetzen über, die in vorliegender Arbeit nicht berührt werden.

12. Der Ausschlagswinkel eines Galvanometers wird aber nach früheren Erörterungen nicht bloß von der strommagnetischen Kraft abhängig sein. Er wird noch in erheblichem Maße, namentlich bei Vorhandensein von schwachen Strömen, vom erdmagnetischen Felde beeinflußt. In den früheren Versuchen, beim Herumführen einer Magnetnadel um den Stromleiter, hat sich dessen Einwirkung dadurch bemerkbar gemacht, daß sich die Magnetnadel nicht genau in tangentialer Richtung an einen Kreis, mit dem Leiterstück als Zentrum, stellte. Um den Ausschlag vom Erdfeld unabhängig zu machen, ihn dadurch zu vergrößern und die Vorrichtung zu verfeinern, gilt es, die Wirkung des Erdmagnetismus auf ein Nadelsytsem zu schwächen. Das kann auf verschiedene Weise geschehen.

Da die Wirkung des Erdmagnetismus gemäß dem Coulombschen Gesetze auch von der Polstärke der Nadel herrührt, handelt es sich um eine Vorrichtung mit einem kleinen magnetischen Moment. Dies wird erreicht, indem man zwei beinahe gleich starke, entgegengesetzt gerichtete Magnetnadeln an einem Messingdraht befestigt. Der Erdmagnetismus wirkt dann auf beide Nadeln entgegengesetzt, so daß seine richtende Kraft der Differenz der magnetischen Momente beider Nadeln wird. Mit der Wahl von Nadeln mit beinahe gleichem Moment gelingt es, die von außen her einwirkende Richtkraft des Erdfeldes beinahe aufzuheben. Läßt man das aufgehängte Nadelpaar, astatisches Nadelpaar geheißen, mit der untern Nadel im Hohlraum einer stromdurchflossenen Spule schwingen, so wird die ablenkende Kraft des Stromes weiter verstärkt, da die Drehmomente, welche der Strom auf die beiden Nadeln ausübt, sich addieren. Die Schwingungsdauer des Systems wird dabei groß.

II.

Nach den aus den einzelnen physikalischen Gebieten resultierenden Erfahrungen gilt das von Newton formulierte Gesetz, wonach niemals eine Kraft auf einen Körper allein, sondern stets auf zwei Massen in entgegengesetzter Richtung

wirkt. So zeigte sich in der Lehre vom Magnetismus, daß die Anziehung zwischen Magnete und weichem Eisen eine wechselseitige ist. Auch zwischen elektrisch geladenen und unelektrischen Körpern besteht die Wechselseitigkeit der Wirkung.

Wenn nun eine Stromschlinge sich wie ein Magnet verhält, auf einen frei beweglichen Magneten einen Antrieb ausübt, so liegt die Vermutung nahe, daß auch umgekehrt ein Magnet gemäß dem in der Natur herrschenden Gesetze der Wechselseitigkeit der Kraftwirkungen auf einen frei beweglichen Stromleiter eine mechanische Wirkung ausübt.

Hier mag erwähnt werden, daß schon Oersted zu seinem eingangs erwähnten Experiment den Gegenversuch anstellte, indem er ein kleines Element mit dem Schließungskreis frei beweglich aufhängte, freilich vergebens die Einstellung des Leiterkreises senkrecht zum magnetischen Meridian erwartete. Der Grund des Mißlingens lag in der mangelhaften Beweglichkeit des aufgehängten Systems.

Damit ist auch der Hinweis auf eine zweckmäßige Versuchsanordnung gegeben. Mit Hilfe einer leicht beweglichen Drahtschlinge oder eines Drahtviereckes zur Verstärkung der kleinen magnetischen Kraft einer einzelnen Stromschlinge, wie wir sie in den Drahtmodellen Ampères kennen, läßt sich deren Einstellung durch den Erdmagnetismus leicht erreichen. An Stelle der magnetischen Kraft kann man einen konkreteren Nachweis der Wechselseitigkeit der Wirkungen durch einen Stabmagneten vornehmen.

Auf der Umkehrung des Oersted'schen Versuches beruht das Drehspulgalvanometer. Zwischen den zylindrisch ausgedrehten Polschuhen eines Dauermagneten, der ein homogenes, kräftiges Magnetfeld gewährleistet, das magnetische Feld der Erde wie die magnetischen Einflüsse vorbeiziehender Ströme eliminiert, befindet sich ein genau zentrierter, feststehender Eisenzylinder, auf den die Kraftlinien radial zuströmen. Eine Drahtspule auf einem Aluminiumgestell bewegt sich reibungslos im Zwischenraum von Eisenzylinder und Polschuhen.

Auch hier werden bei Stromschluß durch das Zusammenwirken des magnetischen und strommagnetischen Feldes die Leiterschlingen zu einer Drehbewegung veranlaßt, die durch

einen Zeiger auf eine Skala übertragen wird. Die Drehung ist dabei ziemlich genau proportional der Stromstärke. Infolge der aperiodischen Schwingungen, hervorgerufen durch die bei der Drehung auftretenden Wirbelströme im Aluminiumgestell, nimmt der Zeiger gleich bei Stromschluß den endgültigen Stand ein.

Die bewegende Kraft eines Magnetfeldes auf einen stromdurchfloßenen Leiter wird im Gramme'schen Ringe zur Erzeugung einer Drehbewegung verwendet. Ein Eisenring, der zur Vermeidung von Wirbelströmen aus übereinanderliegenden, mit Papier isolierten Blechstreifen besteht und sich zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten bewegt, trägt Kupferdrahtwicklungen aus vielen Einzelspulen, deren Abzweigungen in gleichmäßigen Abständen nach unter sich isolierten Metallstreifen führen. Diese liegen auf einem Zylindermantel, Kollektor oder Kommutator genannt. Er ist mit der Ringachse fest verbunden. Zwei Bürsten, seitlich feststehende Schleiffedern, führen den Strom einer starken Elektrizitätsquelle in die Windungen des Ringankers.

Mit den erwähnten Versuchen und Anwendungen darf auch das Prinzip der Wirkung und Gegenwirkung für die eigentümliche Transversalkraft als hinreichend erwiesen betrachtet werden.

Die Bewegungsrichtung ergibt sich für die Stromschlingen leicht aus der rechten Handregel. Ein beweglicher Nordpol würde nämlich, in der Richtung des Stromes gesehen, nach links abgelenkt werden. Da er aber in unserer Anordnung fest ist, wird der bewegliche Stromleiter nach rechts abgelenkt. Man kann auch die Bewegungsrichtung festsetzen, indem man eine der Ampère'schen analoge Regel verwendet: Schwimmt man mit dem Strome und blickt man in der Richtung der Kraftlinien, so ist die auf den Strom einwirkende Kraft nach links gerichtet.

Bei der Anwendung dieser Regel zur Bestimmung der Drehrichtung der Elektromotoren beachte man, daß nur auf die Leiterteile, die auf der Stirnseite des Ringes gelegen sind, eine Bewegung ausgeübt wird.

III.

Die bewegende Wirkung eines feststehenden Magneten auf eine stromdurchflossene Spule, wie sie beim Drehspulinstrument oder beim Elektromotoren in Erscheinung tritt, läßt die Frage aufkommen, ob dies nicht auch für einen einfachen, geradlinigen Leiter zutreffe.

Zum Versuche werden auch hier leicht bewegliche Leiterteile notwendig sein. Eine Aluminiumnadel, an den Enden an zwei Lamettafäden (wie sie zur Christbaumverzierung verwendet werden) aufgehängt, komme zwischen die Pole eines starken Hufeisenmagneten, der mit seinem Nordpole auf einer Unterlage sei. Verbindet man die beiden Aufhängepunkte des Lamettafadens mit den Polen einer Stromquelle, so erfolgt eine Bewegung der Nadel entweder in das Innere des Hufeisenmagneten oder nach außen. Bei einem Polwechsel erfolgt der Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite, ebenso beim Umdrehen der Pole des Hufeisenmagneten.

Die Beziehungen der Richtungen von Bewegung, Kraftlinien und Strom lassen sich mit Hilfe der Linkenhandregel merken: Man halte die drei ersten Finger so, daß sie miteinander rechte Winkel bilden. Wenn der Mittelfinger die Stromrichtung, der Zeigefinger die Richtung der Kraftlinien hat, so gibt der Daumen die Richtung der Bewegung an. (Reihenfolge S—K—B)

Mit der Erledigung der beiden letzten Probleme wird auch die Einsicht von der großen praktischen Bedeutung des strommagnetischen Feldes Platz gegriffen haben. Ueberall da, wo wissenschaftliches Forschen den Energiegedanken gefördert hat, nahm sich die Technik seiner in überraschend schneller Weise an. Durch geeignete Anordnung hat sie die Wechselwirkung der überlagerten Felder eines Stromes und eines Magneten zur Erzeugung von mechanischer Arbeit verwendet und damit die physikalische Erkenntnis für das Arbeitsbedürfnis des Menschen verwertet.

IV.

Der Oersted'sche Versuch zeigt, daß der elektrische Strom eine magnetische Kraft ausübt. Unter seinem Einfluß erhält ein beweglicher Magnetpol einen Bewegungsantrieb. Nach dem Prinzip der Reaktion erfährt umgekehrt ein beweglicher Stromleiter im

Felde eines Magneten Kraftwirkungen. Machen wir stillschweigend die berechtigte Annahme, daß es nur eine Art magnetischer Kräfte gibt, daß also der von elektrischen Strömen ausgehende Magnetismus in seinen Wirkungen gleichartig und gleichwertig sei, wie die von den Magnetpolen ausgehenden Kräfte, so wird auch die von einem Stromleiter ausgehende magnetische Kraft einen andern Stromleiter bewegen können.

Will man der Ueberlegung, die zu der Wechselwirkung zweier Stromleiter führt, keinerlei zwingende Kraft beimessen, so kann man die Erwartung in folgende Form kleiden:

Die Einwirkung eines stromdurchflossenen Leiterteiles auf einen Magneten läßt vermuten, daß sich stromdurchflossene Leiter zu einander wie Magnete verhalten, also anziehende oder abstoßende Wirkungen auslösen. Daß übrigens der Erwartung nicht unbedingt das Eintreten der Erscheinung folgen muß, zeigt eine andere ähnliche Erscheinung, nämlich die Tatsache, daß zwar weiches Eisen sich Magneten gegenüber wie ein Magnet verhält, weiche Eisenstücke unter einander aber indifferent bleiben.

Als Leiterteile verwende man zwei senkrecht eingespannte parallel verlaufende Lamettafäden, in denen der Strom in gleicher oder entgegengesetzter Richtung verläuft.

Bei Stromschluß findet zwischen gleichgerichteten Strömen Anziehung, zwischen entgegengesetzt gerichteten Strömen aber Abstoßung statt.

Da infolge der Trägheit der bei den Versuchen zur Anwendung kommenden Leiterteile nur kleine Verschiebungen erreicht werden, benützt man zur Erzeugung von stärkeren magnetischen Wirkungen ein Bündel von Leiterdrähten, wie sie im sog. Ampère'schen Drahtviereck zur Verwendung kommen.

Die gegenseitige Anziehung von parallelen und gleichgerichteten Strömen eines und desselben Stromkreises läßt sich mittels der Roget'schen Spirale demonstrieren. Sie wird an der einen Klemme aufgehängt und taucht mit dem untern Ende in ein mit Quecksilber gefülltes Näpfchen aus Metall, das mit der andern Klemme in Verbindung steht. Bei Stromschluß ziehen die Windungen einander an, worauf das untere

Ende der Spirale aus dem Quecksilber tritt und dabei den Stromkreis unterbricht.

Die Wechselwirkung zweier Stromleiter findet Verwendung im Elektrodynamometer.

V.

Bei der Behandlung des Magnetismus hatte sich ergeben, daß beim Zerbrechen eines Magneten ein jeder Teil wieder alle Eigenschaften eines Magneten aufwies. Diese Tatsache führt auf den Gedanken, daß ein jeder Magnet aus lauter Elementarmagneten oder Molekularmagneten zusammengesetzt sein könnte.

Nachdem die vorangegangenen Versuche gezeigt haben, daß jede stromdurchflossene Drahtschlinge in ihrer Umgebung dieselbe Wirkung auslöst wie ein Magnet und sie in gleicher Weise der Wirkung eines Magnetfeldes unterworfen ist wie ein Magnet, wird man sich die Frage vorlegen, ob die erwähnte Auffassung über den innern Bau eines Magneten mit den erweiterten Kenntnissen über das elektromagnetische Feld nicht zu modofizieren wäre. In der Tat legt der Glaube an die Einfachheit und Einheit des Geschehens auf physikalischem Gebiete es nahe, das physikalische Bild über die Konstitution des Magneten damit zu vereinfachen, daß man an Stelle der Molekularmagnete Elementarströme setzt und daß man diese elektrischen Kreisströme als alleinige Ursachen der magnetischen Wirkungen betrachtet.

Man stelle sich vor, daß in den Molekülen des Eisens und Stahles elektrische Ströme kreisen, welche die magnetischen Eigenschaften jener Stoffe bedingen. Die Molekularströme verlaufen in den magnetischen Körpern in widerstandslosen Bahnen als eigentliche Leiterströme schon vor der Magnetisierung. Daß sie nach außen keine Wirkung zeitigen, liegt in der gleichmäßigen Verteilung der Stromebenen nach den verschiedenen Richtungen im Raume. Die Einwirkung eines magnetischen Feldes auf diese Molekularströme besteht einzig und allein in der gleichen Orientation dieser Kreisströme.

Hier sei kurz bemerkt, daß durch Versuche die Existenz derartiger Molekularströme, die auf ihren widerstandslosen Bahnen keinen Energieverbrauch zur Folge haben, nachgewiesen worden ist.

VI.

Bekanntlich ruft ein permanenter Magnet in weichen Eisenstücken, die sich in seinem Felde befinden, vorübergehend Magnetismus hervor. Da nun eine stromdurchflossene Schlinge die Eigenschaften eines Magneten aufweist, so kann man erwarten, daß sie auch auf den Magnetismus im weichen Eisen einwirkt. Zur Verstärkung der magnetischen Wirkung einer Stromschleife kann man gemäß dem bekannten Multiplikationsgesetze eine größere Anzahl von Windungen verwenden, eine sog. Stromröhre oder ein Solenoid.

Schiebt man einen Stab weichen Eisens in ein Solenoid, so wird er bei Stromschluß zu einem kräftigen Magneten, Elektromagnet genannt, weil die Erzeugung des Magnetismus durch den elektrischen Strom erfolgte.

Diese Tatsache könnte auf Grund der aufgestellten Molekularhypothese des Magnetismus vorausgesehen werden. Unter dem Einfluß des strommagnetischen Feldes, das in seinen Wirkungen dem des magnetischen Feldes identisch ist, ordnen sich die Elementarströme in Ebenen, die zur Stabachse senkrecht stehen. Die Gesamtheit der in einer Ebene kreisenden Ströme kann durch einen einzigen, an der Umrandung der Ebene fließenden Strom ersetzt werden, welcher der Ebene nord- und südpolaren Charakter verleiht. Gemäß der Rechtenhandregel werden alle nordpolaren Flächen der Kreisströme in der Richtung des ausgestreckten Daumens weisen.

Es läßt sich auch voraussehen, daß eine Aenderung der Stromrichtung auch einen Polwechsel des Elektromagneten zur Folge hat, was mit einer Magnetnadel leicht nachgewiesen werden kann. Mit dem Schließen und Öffnen des Stromes haben wir den Magnetismus völlig in unserer Gewalt, erreichen mit dem Erregen zugleich anziehende Wirkungen auf Eisenstücke, nämlich deren Festhalten entgegen der Wirkung der Schwere. Mit dem Verschwinden des Magnetismus hört die anziehende Kraft auf. Im Bau von mannigfaltigen und sehr zahlreichen Apparaten hat sich die Technik die Wirkungsweise des Elektromagneten zu Nutze gemacht, so in der Telegraphie, in den Selbstunterbrechern und Einschaltern der

verschiedensten Art. Der Gedanke der Erreichung einer größeren Tragkraft führte neben der Verwendung stärkerer Ströme auf die Hufeisenform des Elektromagneten.

VII.

1. Die Erkenntnis des Gesetzes von der Erhaltung der Energie schält aus der Idee von der gegenseitigen Verwandtschaft und Umwandelbarkeit der Naturkräfte den klaren Gedanken, daß es zur Erzeugung von Magneten mit Hilfe des elektrischen Stromes ein notwendiges Gegenstück geben müsse:

Ein bewegter Magnet erzeugt in einem geschlossenen Leiter einen Strom.

Es mag für die Behandlung dieses Problemes besonders wertvoll sein, in die Geschichte der elektromagnetischen Induktionswirkungen einen Einblick zu werfen. Die ersten Jahrzehnte nach der epochemachenden Entdeckung Oersteds konnten sich noch nicht auf das Energiegesetz als eine gereifte und führende Tatsache berufen. Dafür führte die Erscheinung, daß galvanische Elektrizität und Reibungselektrizität identisch seien, auf den Gedanken, daß es analog den Influenzwirkungen der statischen Elektrizität auch Induktionswirkungen des elektrischen Stromes geben müßte. Wie eine elektrische Ladung in einem benachbarten Leiter eine Ladung induziert, so sollte auch der elektrische Strom, den man als ein Fließen elektrischer Ladungen deutete, in dem benachbarten Leiter die in ihm hervorgerufenen Ladungen mit sich fort führen. Die Feststellung Ampères, daß Magnetismus und Elektrizität die Aeusserung eines und desselben Zustandes sein müßten, hätte wohl auf dem nächstliegenden Gedankenwege zur Entdeckung der Induktionsströme führen können, allein da die klare Einsicht in die Einheit der Naturkräfte fehlte, sollte der Weg zur Entdeckung mühsamer sein. Erst als Arago 1824 bemerkte, daß eine ruhende Magnetnadel, unter welcher eine Metallscheibe kreiste, in Rotation kam, induzierter Magnetismus infolge der abstoßenden Wirkung zwischen Nadel und Scheibe nicht in Frage kommen konnte, — als Herschel und Babbage 1825 die Umkehr der Erscheinung experimentell darlegten, wonach eine rotierende Magnetnadel eine unter ihr befindliche Metall-

scheibe in drehende Bewegung versetzte, da konnte niemand mehr an die Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus zweifeln. Wie Elektrizität auf einen ruhenden Magneten einwirkt, so mußte auch ein Magnet Elektrizität in Bewegung versetzen, also einen elektrischen Strom erzeugen. Allein alle Versuche, jenen analogen Vorgang auf dem Gebiete der Elektrodynamik aufzudecken, mißglückten. Von unserem heutigen physikalischen Standpunkte aus begreifen wir den Mißerfolg, da man sich vergeblich mühte, mit Hilfe eines *ruhenden* Magneten einen elektrischen Strom erzeugen zu wollen, von dem man ja weiß, daß in ihm eine Energie innewohnt, die nur aus einem ganz bestimmten äquivalenten Aufwand gewonnen werden kann. Auch die Erfolglosigkeit, nach Ablauf der Bewegung, nicht während der Bewegung, eine Wirkung im Leiter nachzuweisen, ist vom Standpunkt unserer heutigen physikalischen Prinzipien verständlich. Umso mehr ist zu beachten, wie die Forscher der damaligen Zeit, von einem unbestimmt drängenden Gefühl erfaßt, nach jener Umkehr des Oerstedschen Fundamentalversuches suchten.

Für den Unterricht wird der Leitgedanke des physikalischen Forschens von der Umkehr der Erscheinungen ebenfalls der führende Gedanke sein, um das Problem der Induktionswirkungen aufzugreifen. Der Hinweis auf bekannte analoge Wechselwirkungen dürfte die Fruchtbarkeit dieses Gedankens auch auf andern physikalischen Gebieten darlegen, und im Prinzip so die eingangs erwähnte Problemstellung rechtfertigen.

a) Fließendes Wasser bewegt ein ruhendes Wasserrad. Umgekehrt vermag ein von einem Motor angetriebenes Wasserrad einen Wasserstrom zu erzeugen.

b) Eine Kolbenmaschine kann mit Druckluft betrieben werden. Umgekehrt kann eine Kolbenmaschine durch einen Antrieb Druckluft herstellen.

c) Ein elektrischer Strom entwickelt in einem Leiter Wärme. Umgekehrt kann die Wärme in einem Leiter einen Strom hervorrufen.

d) Ein elektrischer Strom scheidet das Metall aus einer Verbindung. Durch Verbindung eines Metalles entsteht ein elektrischer Strom.

2. Zur Einführung in das Gebiet der Induktionswirkungen sei das Problem wie folgt gestellt:

Ein vom Strom durchflossener Leiter erzeugt nach Oersted in seiner Umgebung ein Magnetfeld. Könnte nicht auch umgekehrt ein Magnetfeld in einem benachbarten Leiter einen Strom erzeugen?

Für die Anordnung zum einleitenden Versuche ergibt die Fragestellung den wichtigen Hinweis, daß der Leiter geschlossen sein muß, da ja nach früheren Feststellungen der Wirbelraum und die ihn umlagernden Kraftlinien wie geschlossene Glieder einer Kette ineinandergreifen müssen. Es wird ja bei der Einwirkung des Magneten auf den Leiter erwartet, daß der Magnet im Leiter eine elektromotorische Kraft wecke, welche gemäß dem Ohm'schen Gesetze eine Strömung hervorruft. Diese ist aber nach den uns bekannten Tatsachen nur in einem geschlossenen Leiter möglich, der vorerst allein zum Nachweis von Induktionsströmen in Betracht kommen kann. Zur Beobachtung dieser Ströme wird ein Galvanometer benötigt, das auch die Richtung der Ströme erkennen läßt und so aufgestellt wird, daß es vom Felde des Magneten nicht beeinflußt werden kann. Für die weitere Anordnung von Leiter und Magnet ist der Gedanke der Umkehr des Oersted'schen Versuches wegleitend. Windet sich hier das Magnetfeld rotatorisch um den Leiter, so wird man die Umkehrung erwarten müssen, daß im neuen Falle ein elektrisches Feld in umgekehrter Richtung um den Magneten kreise.

Dementsprechend verwende man eine Drahtspule, die an die Klemmen eines Drehspulgalvanometers angeschlossen ist. Man führe einen starken Stabmagneten in die Spule ein. Ein Ausschlag am Galvanometer zeigt einen Stromimpuls an. Bleibt der Magnet in der Spule liegen, so verharrt der Zeiger in seiner Ruhelage. Beim Hinausziehen des Magneten wird ein Strom in entgegengesetzter Richtung induziert. Beim Verbleiben des Magneten ausserhalb der Spule fließt kein Strom.

Bei kontinuierlichem Einführen und Herausziehen des Magneten gerät die Nadel in schwingende Bewegung, wenn man im Takte mit den Eigenschwingungen der Nadel vorgeht.

Die hervorgerufenen Schwingungen sind ein Beweis dafür, daß in der Spule ein Strom von wechselnder Richtung, ein Wechselstrom, erzeugt wird.

Die Erzeugung von elektrischen Strömen mit Hilfe eines Magneten nennt man Magnetoinduktion. Die dabei in Erscheinung tretenden Ströme heißen Induktionsströme. Als das Wesentliche aus den Versuchen resultiert die Erkenntnis, daß der Induktionsstrom nur solange anhält, als die Bewegung des Magneten andauert.

Gerade auf die Tatsache, daß ein ruhender Magnet keinerlei Ströme induziert, muß im Hinblicke auf die erfolglosen Bemühungen der Physiker während einer Reihe von Jahren hingewiesen werden. Da ein jeder elektrische Strom einen ganz bestimmten Arbeitswert darstellt, der nur durch einen äquivalenten Aufwand an Energie gewonnen werden kann, ist es auf Grund des Prinzipes von der Erhaltung der Energie eine Selbstverständlichkeit, daß ein ruhender Magnet keinen Strom erzeugen kann.

Indes soll vermieden werden, in deduktiver Darstellung die Induktionsgesetze als eine Folgerung aus einem allgemeinen Prinzip zu gewinnen. Vielmehr kommt es darauf an, durch geeignete Erfahrungstatsachen die Gültigkeit des Gesetzes von der Erhaltung der Energie auch auf dem Gebiete der Elektrizität darzulegen, um so in geschlossenem induktivem Vorgehen auf allen Gebieten der Physik von gewonnenen Erfahrungen zum allgemein umfassenden Gesetze emporzusteigen.

3. Da alle Bewegungen, die wir wahrnehmen, nur relative Bewegungen sind, werden die Versuche auch dahin ausgedehnt, ob auch auf dem Gebiete der Induktionsströme nur Relativbewegungen in Frage kommen.

Statt des Magneten wird die Spule gegen den Magneten bewegt. Es zeigen sich dieselben Erscheinungen wie vorhin, womit die Relativität der Induktionswirkungen dargelegt ist.

4. Bei den bisherigen Versuchen läßt sich leicht beobachten, daß schon ein Annähern oder ein Entfernen des Magneten genügt, um Induktionsströme zu erhalten. Das besagt deutlich, daß nicht etwa der Magnetstab an und für sich, sondern sein Feld, das gegen die Spule verschoben wird, die Ursache des Entstehens der Induktionsströme ist.

Aus der Magnetostatik ist uns ja bekannt, daß mit jedem Magneten ein magnetisches Kraftfeld unzertrennlich verbunden ist, ein Raum, in welchen der Magnet seine charakteristischen Wirkungen äußert.

In allen Versuchen findet man nun das Gemeinsame, daß ein Magnetfeld gegen einen Leiter verschoben wird, wobei an jeder Raumstelle die Richtung und die Stärke des magnetischen Feldes sich ändert. *Diese Aenderung der Feldintensität in der Umgebung des Leiters ist demnach die eigentliche Ursache des Induktionsstromes.*

Der geheimnisvolle Vorgang der Induktion besteht also darin, daß durch die Variation des magnetischen Feldes elektrische Kraftlinien das Feld wirbelförmig umfließen, wie im Oersted'schen Versuche die magnetischen Kraftlinien den Stromleiter umkreisen. Der Rotationssinn des elektrischen Feldes bleibt selbstverständlich bestehen, auch wenn die Drahtspule um 180 Grad gedreht wird. Derartige Versuche bringen also nichts Neues, höchstens vermögen sie den Einblick in den wahren Sachverhalt zu trüben.

5. Eine räumliche Verschiebung eines Magnetfeldes gegenüber einem Leiter erhält man aber auch, indem man ein Bündel Eisenstäbchen, die in einer Drahtspule liegen, durch Annähern und Entfernen eines Magneten stärker oder schwächer magnetisiert. Im Verstärken oder Schwächen des Magnetismus in der Umgebung eines Leiters ist somit eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung eines elektrischen Stromes gegeben.

Eine prinzipiell von der besprochenen Methode nur wenig verschiedene Abänderung besteht in der Benützung des erdmagnetischen Feldes. Eine Spule, deren Achsen in der Richtung der Inklinationsnadel liegt, — Draht mit einem Galvanometer verbunden — wird um 180 Grad gedreht. Es entsteht ein Induktionsstrom in der einen, bei weiterem Drehen um 180 Grad ein Induktionsstrom in der andern Richtung.

6. Da das Feld eines Magneten gerichtet ist, läßt sich voraussehen, daß die Induktionsströme, hervorgerufen durch Annähern und Entfernen eines Nordpoles denen entgegengesetzt sind, die durch Annähern und Entfernen eines Südpoles erzeugt werden.

7. Es erübrigt noch, die Stärke des induzierten Stromes

oder zweckmäßiger ausgedrückt, die Abhängrgkeit der Größe der induzierten elektromotorischen Kraft festzustellen.

Im Hinblick auf die Multiplikation der magnetischen Kraft bei der Galvanometerspule liegt es nahe, zu untersuchen, ob jenes erwähnte Multiplikationsprinzip auch bei der Induktionsspule seine Anwendung finde.

Man wird unschwer feststellen, daß mit der Vermehrung der Leiterwindungen die induzierte Kraft einen gleichmäßig sich vergrößernden Ausschlag am Galvanometer ergibt.

Da für die Erzeugung eines Induktionsstromes nur eine Bewegung des Magnetfeldes gegenüber einer Leiterspule in Frage kommt, liegt es nahe, die Verschiebung mit verschiedener Geschwindigkeit vorzunehmen. Die geweckte elektromotorische Kraft hängt auf Grund solcher Versuche von der Aenderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes in der Umgebung des Leiters ab.

8. Da nach früherem eine stromdurchflossene Spule sich wie ein Magnet verhält, ist zu erwarten, daß eine solche Spule gleich einem Magneten imstande ist, Induktionsströme hervorzurufen.

Man bewege eine stromdurchflossene Spule, die aus wenig Windungen eines dicken Drahtes besteht, (die Primärspule) in den Hohlraum einer andern Spule hinein, (die Sekundärspule), deren Windungen aus dünnem, langem Draht bestehen, und mit einem Galvanometer verbunden sind.

Beim Hineinstecken und Herausnehmen der Primärspule entstehen wieder Ströme in entgegengesetzter Richtung.

9. Eine Veränderung des strommagnetischen Feldes am Orte eines Leiters und damit eine Erregung eines Induktionsstromes läßt sich weiter, statt durch Bewegung der beiden Spulen zueinander, durch Schwächen und Stärken des Primärstromes erreichen.

Hiebei darf die Tatsache wieder beachtet werden, daß ein konstantes strommagnetisches Feld, also ein in der Primärspule mit konstanter Stärke fließender Strom, im benachbarten Leiter keinen Induktionsstrom bewirkt.

10. Nach einem früheren Versuche hängt die Stärke eines Induktionsstromes von der Aenderungsgeschwindigkeit des induzierenden Magnetfeldes ab. Eine große Aenderungsge-

schwindigkeit des strommagnetischen Feldes ergibt sich aber durch Oeffnen und Schließen des Stromes.

Wenn auch diese Versuche über die Induktionswirkungen nichts Neues bringen, so sind sie dadurch von großer Bedeutung, weil sie die bekannten Regeln für die Richtung der Induktionsströme finden lassen. Bei Stromschluß wird in dem benachbarten Leiter ein Induktionsstrom von entgegengesetzter Richtung, beim Oeffnen ein solcher von gleicher Richtung wie der induzierende Strom hervorgerufen.

Die Wirkung dieser Induktionsströme kann noch erheblich verstärkt werden, wenn man ein Bündel Weicheisendrähte in die Höhlung der Primärspule hineinsteckt. Zu den Induktionswirkungen des entstehenden und verschwindenden strommagnetischen Feldes gesellen sich noch die Induktionswirkungen des entstehenden u. verschwindenden Magnetfeldes des Eisenbündels.

Man beachte noch besonders, daß der in der Sekundärspule induzierte Strom eine Folge des induzierten elektrischen Feldes ist, das auch dann vorhanden ist, wenn die Sekundärspule fehlt. Der Leiter dient also nur dazu, um ein elektrisches Feld oder einen Spannungszustand zu erkennen. Die im Leiter herrschende Stromstärke richtet sich gemäß dem Ohmschen Gesetze nach dem Widerstand.

11. Es erhebt sich nun die Frage: Welches ist die Quelle des Induktionsstromes?

Auf Grund des ersten Versuches ergibt sich, daß der Induktionsstrom offenbar aus mechanischer Arbeit entsteht, denn außer der Verschiebung eines Magnetfeldes hat das System keine Aenderungen erfahren.

Damit aber z. B. ein Nordpol beim Annähern an einen Leiter eine Arbeit leisten kann, muß ihm längs des Weges ein Widerstand entgegengesetzt werden. Das wird der Fall sein, wenn die dem Nordpol zugekehrte Spulenfläche nordpolaren Charakter hat, also abstoßend wirkt, der Strom in ihr in entgegengesetzter Richtung kreist, wie die Ampère'schen Molekularströme im Magneten. Ein Südpol würde den Magneten anziehen und so dem System dauernd Arbeit ohne ein Aequivalent liefern, was mit dem Energiegesetze unvereinbar wäre. Um beim Entfernen des Nordpoles eine Arbeit leisten zu

können, muß die dem Pole zugekehrte Spulenfläche südmagnetisch sein, damit sie mit ihrer anziehenden Wirkung die Bewegung hemmen kann.

Aehnliche Betrachtungen lassen sich bei den Induktionswirkungen zweier Stromleiter anstellen. Beim Annähern muß der Sekundärstrom dem Primärstrom entgegengesetzt gerichtet sein, damit durch eine Bewegung Arbeit geleistet werden kann. Beim Entfernen der beiden Spulen von einander haben die Ströme gleiche Richtung.

Das aus den Experimenten sich leicht ergebende Gesetz kann nach Lenz also formuliert werden:

Der induzierte Strom hat stets einen solchen Umlaufsinn, daß er durch die von ihm ausgehende magnetische Kraft den induzierenden Vorgang zu hemmen sucht.

Aus den Versuchen ergibt sich, daß das Induktionsgesetz mit dem Energiegesetz in Einklang steht. Diese Uebereinstimmung ist auch das einzige, mit welcher sich der forschende Geist abfinden kann. Besitzen wir in der Thermodynamik ein einheitliches, alle Vorgänge umfassendes Bild, so ist uns in den Mechanismus der Induktionswirkungen jede Einsicht versagt. Das mag es wohl sein, daß die Induktionsgesetze, von einer oberflächlichen Behandlung abgesehen, bei vielen einen gewissen Grad des Unbehagens, des Unbefriedigtseins hinterlassen haben. Damit wird man sich abfinden müssen. Das Gesetz von der Verwandlung und Erhaltung der Energien, das zur Kontrolle herangezogen wurde, gestattet zwar, eine Aenderung des magnetischen Feldes als eine Aenderung potentieller Energie aufzufassen, die ihr Aequivalent laut Erfahrung im Auftreten eines Induktionsstromes hat. Allein über die innern Vorgänge, über die Art des Geschehens gibt es keinen Aufschluß.

12. Die Induktionswirkungen von Magneten oder Strömen auf Drahtspulen lassen die Frage nach dem Verhalten eines bewegten geraden Leiters im magnetischen oder strommagnetischen Felde aufkommen. Die Anleitung zur experimentellen Lösung dieser Frage erhält man, wenn man sich an das in Abschnitt III behandelte Problem hält, wonach ein stromführender Leiter im Magnetfelde einen Bewegungsantrieb

erhält. Die Umkehrung dieser Erscheinung läßt dann erwarten, daß durch die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfelde im Leiter ein Strom entstehen könnte.

Man bewege daher einen Leiterdraht, der in seinem Schließungskreis ein empfindliches Galvanometer enthält, rasch durch das Kraftlinienfeld eines starken Hufeisen- oder Elektromagneten. Während der Bewegung zeigt ein Ausschlag am Galvanometer einen kurz andauernden Strom an. Bei der Umkehrung der Bewegungsrichtung erfolgt ein Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite.

An diesen Nachweis von Induktionsströmen in einem geraden Leiter lehnen sich auch die weiteren Versuche, die mit der Drahtspule vorgenommen wurden, Versuche über die Dauer des Induktionsstromes, über die Relativität der Induktionswirkungen, über die Abhängigkeit der Stärke des Induktionsstromes von der Stärke des magnetischen Feldes, über dessen Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit des Leiters im Magnetfelde, wobei sich wiederum die Aenderung der Feldintensität in der Umgebung des Leiters als die eigentliche Ursache des Induktionsstromes ergibt.

Ein Vergleich mit den Versuchen über die Bewegung von stromführenden Leitern in einem magnetischen Felde und den obigen Induktionswirkungen ergibt, daß die Stromrichtungen in beiden Fällen dieselben sind. Die Bewegungsrichtungen dagegen sind einander entgegengesetzt. Die Beziehungen zwischen der Bewegungsrichtung, der Kraftlinienrichtung und der Stromrichtung kann demnach durch eine Rechtehandregel (Flemmingsche Dreifingerregel der rechten Hand) ausgedrückt werden:

Man halte die 3 ersten Finger der rechten Hand so, daß sie rechte Winkel miteinander bilden. Dann gibt der Daumen die Richtung der Bewegung, der Zeigefinger die Richtung der Kraftlinien und der Mittelfinger die Richtung des Stromes an.

13. In den bisherigen Induktionswirkungen handelte es sich um Erscheinungen in geschlossenen Leiterdrähten. Wegen ihres geringen Querschnittes ist es begreiflich, daß sich die induzierende Kraft im ganzen Querschnitt in gleichem Betrage

und in gleicher Richtung äußert und so das Auftreten selbständiger, geschlossener Strombahnen, sogenannter Wirbelströme, verhindert wird. Man wird sich daher die Frage vorlegen, ob und wie die Induktionswirkungen sich in zusammenhängenden Leitermassen äußern.

Statt eines Leiterdrahtes führe man eine Kupferplatte quer durch das Feld eines Elektromagneten. Am eindrucksvollsten erfolgen die Versuche mit dem bekannten Waltenhofenschen Pendel, einer Kupferplatte, welche zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten schwingt.

Ist der Elektromagnet in unerregtem Zustande, so schwingt das Pendel in gewohnter Weise, bis es infolge des Luftwiderstandes und der im Aufhängepunkt entstehenden Reibung zur Ruhe kommt.

Wird das Feld des Magneten erregt, so kommt das schwingende Pendel in der „Ruhelage“ augenblicklich zum Stillstand. Führt man das Pendel mit der Hand durch das Feld, so spürt man eine bremsende Wirkung, einen unsichtbaren Widerstand, als zöge man die Kupferplatte durch ein zähes Mittel, wie Honig oder Sirup.

Die beobachteten Vorgänge lassen sich nicht auf die Wirkung induzierten Magnetismus zurückführen. Vor dem Durchgang der Kupferplatte durch die Ruhelage findet zwischen den Polen des Elektromagneten und den Polen des induzierten Magnetfeldes Abstoßung, nach dem Passieren der Ruhelage aber Anziehung statt. Induzierte Pole in der Kupferplatte aber würden in beiden Lagen des Pendels gleichartige Wirkungen zeigen.

Zur Erklärung der Erscheinungen am Waltenhofenschen Pendel wird man auf die bisher bekannten Induktionswirkungen im Leiterdraht zurückgreifen. Wie hier, so werden auch in den zusammenhängenden Leitermassen Induktionsströme erzeugt, die gemäß dem Lenz'schen Gesetze im bestehenden Magnetfelde so gerichtet sind, daß sie die Bewegung der Metallmassen zu hemmen suchen. Die Richtung der induzierten Ströme, Wirbelströme genannt, innerhalb des Magnetfeldes untersucht, läßt sich nach der erwähnten Dreifingerregel der rechten Hand bestimmen. Wenn sich auch der Nachweis

dieser Induktionsströme nicht so einfach gestaltet, so läßt sich doch zeigen, daß sie sich in den nicht im Magnetfeld befindlichen Teilen des Pendels schließen. Unterbricht man nämlich die Leitermassen des Pendels in derjenigen Richtung, in welcher die Wirbelströme fließen, verwendet man also eine kammförmig eingesägte Kupferplatte, so erfolgt keine so rasche Dämpfung, wie in obigem Falle, ein Beweis, daß die Zerteilung der Kupfermassen das Zustandekommen größerer Wirbelströme erschwert.

Die Erwärmung einer ungeschlitzten Kupferplatte bei mehrmaligem Durchgang durch das Feld eines Magneten zeigt des ferneren, daß die beim Hineinschieben und Herausnehmen der Platte aus dem Aktionszentrum geleistete Arbeit eine Transformation erfährt.

Die beruhigende Wirkung eines Magnetfeldes auf schwingende Kupfermassen wird zur schnellen Dämpfung von Spulengalvanometern verwendet. Die unerwünschte Umsetzung der elektrischen Energie der Wirbelströme in Wärme in den Eisenmassen der Dynamos und Transformatoren hat die Technik veranlaßt, die Ausbildung von größeren Wirbelströmen dadurch zu verhindern, daß man den Eisenkern unterteilt, d. h. in Lamellen zerlegt, deren Oberflächen parallel dem magnetischen Kraftfluß liegen.

14. Der energetische Standpunkt, den man sich nach der vorangegangenen Entwicklung zu eigen gemacht hat, gestattet eine einfache Erklärung der Erscheinung der Selbstinduktion in einem Leiter. Bei Stromschluß erfordert die Erzeugung des magnetischen Feldes um den Leiter eine Ausgabe von Stromenergie in Form von magnetischer Energie. Der Strom wird also nicht gleich in seiner vollen Stärke zirkulieren, die er gemäß dem Ohm'schen Gesetze annehmen müßte. Umgekehrt erfolgt beim Oeffnen eine Rückgabe der Energie des magnetischen Feldes in Form von elektrischer Energie in den Leiter, womit der erlöschende Strom verstärkt wird. Strommagnetische und elektrische Energien verhalten sich demnach wie kinetische und potentielle Energien, die beim Fehlen von Reibungswiderständen gegenseitig ohne Verluste umwandlungsfähig sind, also reversible Prozesse durchlaufen.

Es ist damit gegeben, die bildende Kraft der Analogie zur Geltung kommen zu lassen. Der Trägheit der Selbstinduktion läßt sich die Trägheit der Massen gegenüberstellen. Bei der Bewegung eines Körpers wirkt dessen Masse infolge der Trägheit einer Geschwindigkeitsänderung entgegen, im Anlaufe im Sinne eines Widerstandes gegen die Beschleunigung, im Endlauf im Sinne eines Hemmnisses gegen die Verzögerung.

15. Da mit den Induktionswirkungen Energieumwandlungen verknüpft sind, so liegt es in der Natur der Sache, daß sich die Technik in ungemein reichhaltiger Weise der wissenschaftlichen Erkenntnis angenommen und sie für die praktischen Bedürfnisse des Menschen verwertet hat. Die Grundversuche über die Induktionserscheinungen geben treffliche Gelegenheit, als Ausgangspunkt für die Besprechung der Gleichstromdynamomaschine, der Wechselstrommaschine, des Telephons, des Funkeninduktors und des Transformatoren zu dienen. Wenn auch die rein praktischen Fragen nach der Nützlichkeit des Gelernten für das Weiterstudium oder für die Verwendbarkeit des behandelten Stoffes im weiteren Lebensberufe an zweiter Stelle stehen müssen, so dürfen sie hier im Unterrichte nicht fehlen.

VIII.

Henri Poincaré äußert sich in einer seiner Schriften, daß die praktisch veranlagten Menschen bei der Wissenschaft nach allen Mitteln fragen, mit denen man sich einen Reichtum verschaffen könne, als ob die Wissenschaft dazu da wäre, den Materialismus zu nähren. Derartigen Menschen sollte man keine Antwort geben, vielmehr sollte man sie fragen, wozu man denn eigentlich Reichtümer sammle. Die Sorge und die Jagd nach materiellen Dingen sei es ja gerade, welche die Wissenschaft vernachlässigen lasse, sie, die allein berufen ist, unsern Geist zu befähigen, in ihr seine Befriedigung zu suchen.

In dem kleinen betrachteten Gebiete wollte ich denn auch nicht den Gedanken aufkommen lassen, als wäre das Hauptziel der Abhandlung das, auf die technischen Anwendungsmöglichkeiten vorzubereiten und sie zu erörtern. So möge

ein zusammenfassender Rückblick auf das Oersted'sche Problem und dessen Umkehrung die darin verborgene Harmonie der Erscheinungen klar zu erkennen geben.

Nach dem Oersted'schen Fundamentalversuch ist immer ein elektrischer Strom von einem Magnetfeld umgeben. Die realistische Wissenschaft setzt die Gleichförmigkeit des Verlaufes der Naturerscheinungen voraus. Strom und Magnetfeld sind aber nur verschiedene Aeußerungen eines und desselben physikalischen Ereignisses. Man wird so ersehen, daß der Versuch nur einen speziellen Fall eines allgemeineren Sachverhaltes widergibt. Betrachtet man nämlich den Strom als einen beständigen Zerfall eines elektrischen Feldes, so liegt die Tatsache vor, daß mit dem Zerfall des elektrischen Feldes ein Magnetfeld verbunden ist. Umgekehrt resultiert aus jeder Aenderung eines magnetischen Feldes ein elektrisches Feld.

Deutet man die zeitliche Aenderung eines Magnetfeldes an einem bestimmten Raumpunkte als Strom, in Analogie zu den elektrischen Verschiebungsströmen im Dielektrikum, so vermag man in der nachfolgenden Formulierung etwas von der wunderbaren Symmetrie ahnen, welche in den Maxwell'schen Gleichungen liegt.

Um einen elektrischen Strom wirbelt ein Magnetfeld, welches, in der Richtung des Stromes besehen, im Sinne einer Rechtsschraube rotiert.

Um einen magnetischen Strom windet sich ein elektrisches Feld, das, in der Richtung des magnetischen Stromes besehen, im Sinne einer Linksschraube kreist.

In dieser seltsamen Wechselwirkung des elektrischen und magnetischen Feldes tritt dem Beschauer so recht die bewundernswerte Einfachheit des Naturgeschehens entgegen.

Anmerkung. Die hier angeführten Versuche finden sich in ausführlicher und anschaulicher Form in meiner Arbeit: „Physikunterricht auf Grund des Utz'schen Apparates", im Selbstverlag von Arthur Utz, Mechaniker in Bern, erschienen. Im übrigen sei auch auf jedes größere Lehrbuch der Physik verwiesen.