



Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München.

Band XXXVI. Jahrgang 1906.

München

Verlag der K. B. Akademie der Wissenschaften
1907.

In Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth).

Über Pulsationen von geringer Periodendauer in der erdmagnetischen Feldkraft.

Von H. Ebert.

(Eingelaufen 8. November.)

1. Schon seit längerer Zeit erregen jene auffallend regelmäßigen Schwingungen von kurzer Periodendauer in der Intensität der erdmagnetischen Kraft allgemeinere Aufmerksamkeit, welche namentlich zu Zeiten von magnetischen Störungen in den die Feldkraft in ihrem zeitlichen Verlaufe darstellenden Kurven in Form kurzer Wellen zur Erscheinung kommen („erdmagnetische Wellen“). Bekannt ist das von Friedrich Kohlrausch vom 20. November 1882 mitgeteilte Beispiel,¹⁾ bei dem durch zweisekundliche Ablesungen an dem von ihm konstruierten Ablenkungs-Intensitätsvariometer für die Horizontalkomponente (Schwingungsdauer der Nadel 1,7 sec., Dämpfungsverhältnis 2,0) solche Schwingungen von rund 12 sec. Periodendauer und 4γ ($1 \gamma = 0,00001$ C.G.S. Einheiten) Amplitude erhalten wurden. Bei den gewöhnlichen Registrierverfahren mit langsamem Streifengang müssen derartige kurzdauernde Schwankungen der erdmagnetischen Feldkraft verloren gehen; sie können sich höchstens in einer Verbreiterung und unscharfen Zeichnung der Kurven kundgeben.

Es war daher ein wesentliches Verdienst von M. Eschenhagen, daß er zum Studium gerade derartiger kleiner Variationen des Erdmagnetismus die sog. „Feinregistrierung“ ein-

¹⁾ Fr. Kohlrausch, Wied. Ann. 60, 336, 1897.

führte,¹⁾ bei welcher durch rascheren Streifengang (1 mm gleich 15 sec., statt wie sonst üblich, 180 sec.) eine bei weitem mehr ins einzelne gehende Auflösung des zeitlichen Ablaufes der Erscheinungen ermöglicht wurde. Gleichzeitig erhöhte er die Empfindlichkeit des Variationsinstrumentes; sein Unifilarmagnetometer, bei welchem ein kleiner magnetisierter Stahlspiegel durch einen tordierten Quarzfaden, an dem er hängt, in senkrechter Stellung zum magnetischen Meridian erhalten wird, gab bei 8,5 sec. Schwingungsdauer und einem Dämpfungsverhältnis von etwa 4 eine Empfindlichkeit von 1 mm gleich 0,3 γ . In dem von ihm a. a. O. mitgeteilten Kurvenbeispiele kann man 199 Pulsationen zählen, welche auf eine (ganze) Schwingungsdauer von 32,2 sec. bei einer mittleren Amplitude von 1,4 γ führen. Eschenhagen glaubte in diesen Wellen von konstanter Periode „gewissermaßen die einfachsten Elementarbewegungen des Erdmagnetismus“ erblicken zu dürfen, da (bei seinem Instrumente) keine weiteren Details durch fortgesetzte Auflösung zu erkennen waren. Auf Grund eines umfangreicheren Materiales an solchen Feinregistrierungen (etwa sechzig), kommt er zu dem folgenden Schlusse:²⁾ „Alle gesammelten Ergebnisse beweisen, daß man durch eine solche Feinregistrierung bei gleichzeitiger guter Dämpfung der Magnetnadel und hoher Empfindlichkeit gegenüber den Intensitätsänderungen in der Tat bis zur letzten Auflösung der kleinsten Schwankungen des Erdmagnetismus, also zu einer Darstellung der „Elementarwellen“ kommt, so daß eine weitere Verfeinerung jener Hilfsmittel keinen Erfolg mehr verspricht.“

Bemerkenswert ist, daß jene kurzdauernden Wellen vorzugsweise am Tage, zwischen morgens und abends 6 Uhr, also zu einer Zeit, in der die Sonne über dem Horizonte der Beobachtungsorte zur betreffenden Jahreszeit stand, auf-

¹⁾ M. Eschenhagen, Sitzungsber. d. Berliner Akad. Nr. XXXIX, 965, 1896.

²⁾ M. Eschenhagen, Sitzungsber. der Berliner Akad. Nr. XXXII, 678, 1897.

traten, sehr selten nachts, während in den Nachtstunden häufig längere, schon an den gewöhnlichen Registrierungen erkennbare Wellen erschienen.¹⁾ Interessant vor allem sind die von Eschenhagen entdeckten „Wellengruppen“, die eine Analogie zu den Schwebungen der Töne darstellen; eine Wellenbewegung von 34 sec. Periodendauer trat mit einer solchen von 43 sec. in Interferenz und erzeugte die für das Schwingungszahlenverhältnis 5 zu 4 charakteristische Schwebungskurve; dabei betrug die Amplitude der beiden miteinander interferierenden Schwingungen etwa 0,6 γ .

Solche erdmagnetische Schwingungen können ein weites Verbreitungsgebiet besitzen. Schon 1895 wurden bei Gelegenheit von Terminbeobachtungen Wellen von 40 bis 50 sec. Dauer bemerkt, welche (innerhalb der Grenze der Beobachtungsfehler von 1 bis 2 sec.) in Potsdam und in Wilhelmshaven gleichzeitig auftraten. Weiteres hierher gehöriges Material wurde von Kr. Birkeland bei Gelegenheit der Norwegischen Expedition zum Studium der Polarlichter 1899—1900 gesammelt.²⁾ Es zeigten sich bemerkenswerte Übereinstimmungen zwischen gleichzeitig zu Haldde bei Bossekop im nördlichen Norwegen und in Potsdam vorgenommenen Feinregistrierungen, also an zwei Stationen, welche um ca. 2000 km voneinander entfernt sind, ein Zeichen dafür, daß derartige Pulsationen ungeheure Gebiete des erdmagnetischen Kraftfeldes mit gleichem Rhythmus durchzucken können. Birkeland hat auch die Häufigkeit des Auftretens solcher Pulsationen als Funktion ihrer Periodendauer dargestellt; hierbei zeigt sich, daß eine Häufung der Erscheinungen auftritt für bestimmte Dauern, welche nach dem damals vorliegenden Materiale bei etwa 32 und 8 sec. gelegen ist. Hier haben wir also bereits Schwingungen von wesentlich kürzerer Dauer als die Eschenhagenschen Elementarwellen.

Es drängt sich daher die Frage auf: Kommen nicht vielleicht Pulsationen von noch kürzerer Periode in den erdmag-

¹⁾ Vgl. auch Th. Arendt, Das Wetter, Heft 11 und 12, 1896.

²⁾ Kr. Birkeland, Videnskabselsk. Skrifter. Akad. Christiania. I. Math.-naturw. Kl. Nr. 1, 1901, S. 3 ff.

netischen Elementen vor? Sind die in den Feinregistrierungen aufgezeichneten kleinen Wellen wirklich die letzten Bestandteile der großen erdmagnetischen Feldschwankungen, kann man in der beschriebenen Weise überhaupt die erdmagnetischen Erscheinungen in ihre letzten Elemente auflösen? Eine einfache Überlegung zeigt, daß dies stets daran scheitern muß, daß wir nicht imstande sind, die Schwingungsdauer der magnetometrischen Apparate unter eine gewisse Grenze herabzudrücken, wenn wir nicht an Empfindlichkeit erheblich einbüßen wollen; die Magnetsysteme sind viel zu träge, um Variationen von wenigen Sekunden Periode folgen zu können, ohne das Bild des zeitlichen Ablaufes dieser Variationen bis zur völligen Unkenntlichkeit zu verwischen; hier muß ein ganz anderes Prinzip herangezogen werden.

Eschenhagen hat schon selbst 1886, zurückgreifend auf einen Vorschlag von Werner Siemens aus dem Jahre 1882, auf die Induktionswirkung in einer ausgedehnten Leiter schleife bei Variation der von dieser umfaßten Kraftlinienzahl hingewiesen.¹⁾ Siemens hatte der Deutschen Polarexpedition²⁾ vom Jahre 1882—1883 ein 12 km langes, leichtes, durch eine Guttaperchahülle isoliertes, einadriges Kabel mitgegeben, welches auf dem Eise des Kingua-Fjordes, der Deutschen Beobachtungsstation, während des internationalen Polarjahres derart ausgelegt wurde, daß es eine Fläche von rund 8 qkm umspannte. Seine Enden waren an ein astatisches Spiegelgalvanometer von Siemens und Halske angeschlossen, und die in ihm auftretenden Stromstöße wurden mit den Variationen der Vertikalintensität, wie sie eine Lloydsche Wage aufzeichnete, verglichen. Es zeigte sich, daß die im Kabel beobachteten Ströme in der Tat durchaus dem Wechsel in der

¹⁾ M. Eschenhagen, Sitzungsber. der Berliner Akad. Nr. XXXII, 1897, S. 685 und Verhandl. Phys. Ges., I. Jahrg., Nr. 9, S. 151, 1899.

²⁾ Die internationale Polarforschung 1882—1883. Die Beobachtungsergebnisse der Deutschen Stationen, Band I, Kingua-Fjord u. s. w. Die Erdstrom-Beobachtungen, bearbeitet von W. Giese, S. 411, Berlin 1886; vgl. auch M. Eschenhagen, ebenda S. 597.

Intensität der Vertikalkomponente folgen, so daß kein Zweifel bestehen konnte, daß wirklich die in der Leiterschleife durch die Feldvariation geweckte Induktionswirkung ein Mittel darbietet, jene Variationen zu studieren. Ja die Empfindlichkeit des Kabelapparates erwies sich für die kleinsten beobachteten Schwankungen der Vertikalintensität bei diesen Versuchen etwa hundertmal so groß als die der Lloydschen Wage, seither des einzigen Instrumentes, welches sich für die Registrierung der Vertikalkomponente dauernd als brauchbarer erwiesen hat. W. Giese, welcher, wie oben angegeben, diese Beobachtungen der Deutschen Station bearbeitete, hebt hervor, daß das Kabel eigentlich nie frei war von den elektomagnetischen Impulsen und daß die ganze Anordnung für die hohen Breiten eigentlich zu empfindlich war. Eschenhagen schlug daher vor, statt der großen und sehr ausgedehnten ebenen Leiterschleife minder ausgedehnte Drahtspulen zu verwenden, welche den Vorteil bieten würden, daß man je nach ihrer Orientierung beliebige Komponenten des Erdmagnetismus, eventuell auch dessen Totalintensität untersuchen könnte; ob sich empfehlen würde, eine Verdichtung der erdmagnetischen Kraftlinien durch Ausfüllen des Spuleninneren mit weichem Eisen herbeizuführen, sei erst durch besondere Versuche festzustellen. Zu diesen ist Eschenhagen selbst nicht mehr gekommen.

Ich hatte 1897/98 in Kiel zunächst zum Studium der Natur der durch den elektrischen Trambahnbetrieb bedingten Störungen der einzelnen erdmagnetischen Komponenten derartige eisen-erfüllte flache Spulen von großer Gesamtwindungsfläche, welche an ein empfindliches, in Juliusscher Aufhängung montiertes Du Bois-Rubenssches Galvanometer angeschlossen waren, mit großem Erfolge benutzt (es sind dies die Versuche, auf welche M. Eschenhagen, Verhandl. der Phys. Ges., I. Jahrg., Nr. 9, S. 151 unten, 1899 hinweist). Zu Zeiten, als der Trambahnverkehr ruhte, blieben aber noch schwache Stromstöße von außerordentlicher Variabilität zurück, welche augenscheinlich mit zeitlichen Variationen in den einzelnen erdmagnetischen Komponenten selbst zusammenhingen. Schon hierbei zeigte

sich aber, daß die Eisenerfüllung beim Studium der rasch sich vollziehenden Schwankungen ungünstig wirkte; dadurch, daß man einen dichteren Kraftlinienstrom durch das Spuleninnere leitet, gewinnt man zwar an Feldintensität, aber das Eisen folgt selbst bei den hier vorkommenden schwachen magnetischen Belastungen den zeitlichen Änderungen zu träge und verwischt dieselben, sogar wenn man sehr weit unterteiltes Eisen und namentlich in der Kraftlinienrichtung selbst nur kurz bemessene Drähte aus weichstem Eisen wählt. Da die Induktionswirkung der zeitlichen Änderungsgeschwindigkeit der betreffenden Feldkomponente proportional ist, wurde daher der weiche Eisenkern bald wieder verlassen und auf die ausgedehntere Leiterschleife zurückgegriffen.

Unterdessen sind in Kiel auf Veranlassung des Herrn Professor Leonh. Weber von Herrn Herm. Andreesen¹⁾ Versuche angestellt worden, bei denen ein Kabel 96 mal um das magnetische Observatorium herumgelegt wurde, so daß eine Gesamtwindungsfläche von 7200 qm erzielt wurde. Die Kabelenden wurden an ein Drehspulengalvanometer nach Déprez-d'Arsonval von Siemens und Halske von 2,5 bis 3 Minuten Schwingungsdauer angeschlossen. Die erhaltenen Registrierkurven zeigen außer sehr unregelmäßigen Zacken gelegentlich nachts kleinere Zacken von kurzer Dauer, welche Andreesen geneigt ist, ebenfalls vagabundierenden Strömen zuzuschreiben, wie jene großen Zacken, welche einen unverkennbaren Zusammenhang mit dem Trambahnbetriebe aufwiesen. Nur einmal im September 1904 zeigten sich nachts ganz feine regelmäßige Wellenzüge von ca. 30 sec. Periodendauer, welche also den von Eschenhagen gefundenen Wellen entsprechen würden.

2. Hatten die bisherigen Versuche gezeigt, daß das Induktionsprinzip in der Tat imstande ist, ein Vertikal-Intensitäts-Variometer des Erdmagnetismus von hoher Empfindlichkeit zu liefern, so mußte doch seither auch auf diesem Wege der Versuch als aussichtslos erscheinen, wesentlich weiter in die Einzel-

¹⁾ H. Andreesen, Inaug.-Diss., Kiel 1905, S. 32 ff.

heiten des zeitlichen Verlaufes der rascheren erdmagnetischen Pulsationen vorzudringen. An Stelle der beweglichen Systeme der Magnetometer traten jetzt diejenigen der Galvanometer; da man die Schwingungsdauer und die Trägheitsmomente derselben nicht unter eine gewisse Grenze bringen kann, so vermögen sie ebensowenig den kürzeren Wellen zu folgen, wie die direkt auf die Variationen der erdmagnetischen Kraft reagierenden Apparate. Dazu gesellt sich bei den Galvanometern mit beweglichen Magneten und feststehenden stromführenden Teilen noch der Nachteil, daß die Orientierung ihrer beweglichen Teile selbst wieder von den Variationen der erdmagnetischen Kraft abhängig ist. Bei den Spulengalvanometern, bei denen dieser Nachteil wegfallen würde, stört der Umstand, daß sie, durch das Kabel geschlossen, außerordentlich stark gedämpft und daher sehr träge sind, wenn man nicht durch Vorlegen großer Ballastwiderstände die Empfindlichkeit stark herabsetzen will.

Hier konnte nun ein wesentlicher Fortschritt erzielt werden durch Heranziehung des zuerst von Ader angegebenen, dann von Herrn Einthoven und später von Herrn M. Edelmann jun. so überaus verfeinerten und vervollkommneten Saitengalvanometers.¹⁾ Bei diesem wird ein möglichst dünner versilberter Quarzfaden oder ein feiner Metalldraht in einem starken konstanten Hilfsmagnetfelde senkrecht zu dessen Kraftlinien längs der schneidenartig gestalteten Polschuhe desselben ausgespannt; geht ein Strom durch den Faden, die „Saite“, so wird diese mit einer der Stromstärke, der Stärke des Hilfsfeldes und der Länge der Saite proportionalen Kraft quer zu den Kraftlinien abgelenkt; die Ablenkung wird durch ein Mikroskop hindurch verfolgt oder durch geeignete optische

¹⁾ Vgl. bezüglich der Aderschen Anordnung: Léauté, Compt. rend. 124, 1440, 1897, oder La Nature, 2, 115, 1897, L'Éclairage électrique 1897, 295, Elektrotechn. Zeitschrift 1897, 561.

W. Einthoven, Ann. der Phys. (4). 12, 1059, 1903; 14, 182, 1904; 16, 20, 1905.

M. Edelmann jun., Physikal. Zeitschrift, 7, Nr. 4, 115, 1906.

Systeme auf einem bewegten lichtempfindlichen Filmstreifen abgebildet. Hier hat man ein System von verschwindend kleiner Masse, welches im Stande ist den raschesten Wechseln der Stromintensität fast momentan zu folgen, eine Anordnung, welche mit dem Vorzug vollkommener Unempfindlichkeit gegen äußere magnetische Störungen denjenigen der höchsten Stromempfindlichkeit verbindet.

Mit einem solchen Saitengalvanometer habe ich meine längere Zeit unterbrochenen Versuche über die Wirkungen rascher erdmagnetischen Pulsationen auf größere Leiterschleifen im Sommer vergangenen Jahres wieder aufgenommen, wobei mich Herr Dr. Max Edelmann jun. in München auf das wirksamste unterstützte, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen wärmsten Dank aussprechen möchte.

Um bei der Wahl des Beobachtungsortes nicht an Stromquellen gebunden zu sein, wurde bei der Konstruktion der Saitengalvanometer von der Verwendung der Elektromagnete abgesehen und zu derjenigen kräftiger Dauermagnete übergegangen; dadurch wurde zwar etwas an Empfindlichkeit preisgegeben, doch gelang es dem Edelmannschen Institute dafür sehr handliche Saitengalvanometer herzustellen.¹⁾

Das zu den Versuchen verwendete Galvanometer enthielt einen Faden von 120 Ohm Widerstand und gab 1 mm Ausschlag bei einem Strome von 10^{-7} Ampère; die mikroskopische Vergrößerung war nur eine 50 fache; Ströme von 10^{-8} Ampère waren aber noch bequem und sicher zu messen. Um in den Photogrammen die Zeitmarken mit zu erhalten, ließen wir vor dem Spalte der Registriertrommel das Pendel eines Metronoms so schwingen, daß es bei jeder ganzen Schwingung einmal etwas von der Seite her über den Spalt sich hinbewegte; am Rande des Registrierstreifens entstanden dann kleine Zacken,

¹⁾ Vgl. bezüglich der Beschreibung derselben sowie der photographischen Registrierapparate die obengenannte Arbeit von M. Edelmann.

an denen die Zeitbestimmung mit großer Sicherheit vorgenommen werden konnte.

Die Leiterschleife wurde hergestellt mittels eines von der Firma Felten und Guillaume bezogenen Kabels von 15 voneinander isolierten Kupferadern von je 0,8 mm Durchmesser, d. i. 0,5 qmm Querschnitt und 0,03463 Ohm Widerstand pro Ader und pro laufenden Meter. Das Kabel war 210 m lang, seine 15 Adern wurden hintereinander geschaltet, so daß eine Gesamtdrahtlänge von 3150 m und beim Auslegen längs einer Kreisfläche eine Gesamtwindungsfläche von 52640 qm zur Verfügung stand bei einem Gesamtwiderstand von 109 Ohm. Es ist klar, daß wenn man ein derartiges Kabel im Freien auslegt, Störungen thermo-, vielleicht auch hydroelektrischer Natur nicht ausbleiben können. Den hierdurch bedingten Kabelströmen legen sich freilich die gesuchten Induktionsströme einfach über, ohne durch diese beeinflusst zu werden, indessen bedingen diese Ströme ein fortwährendes Herausgehen des Galvanometerfadens aus der Ruhelage und eventuell auch aus dem Gesichtsfelde. Dieser Übelstand wurde dadurch behoben, daß in einem Nebenschluß zum Kabel durch eine dauernd hier eingeschaltete elektromotorische Kraft (ein Trockenelement mit regulierbarem großen Vorschaltwiderstand) eine geeignete Kompensation hergestellt wurde; außerdem empfahl es sich noch einen zweiten Nebenschluß anzuordnen, durch welchen die Empfindlichkeit des Galvanometers geeignet abgestuft werden konnte. Das Kabel blieb während des Nichtgebrauches immer in sich kurz geschlossen und an Erde gelegt, so daß eventuelle statische Ladungen sich sofort ausgleichen mußten. Außerdem verblieb bei den Messungen selbst ein Ende des Meßfadens sowie das ganze Gestell des Apparates mit dem Magnetsystem dauernd an Erde.

Das Kabel mußte vollkommen fest auf dem Boden verlegt werden; denn wenn irgend ein Teil desselben, — bei der großen Empfindlichkeit der Anordnung, selbst ein relativ kurzer, — sich bewegt, etwa vom Winde in Pendelschwingungen versetzt wird, so schneidet er die Kraftlinien des Erdfeldes und ruft

Induktionsströme hervor, welche genau dem Rhythmus der Bewegungen folgen.¹⁾ Außerdem war das Kabel nach Möglichkeit vor direkten elektrostatischen Beeinflussungen, etwa von Seiten des elektrischen Feldes der Atmosphäre zu schützen. Hätte unser Kabel einen Bleimantel besessen, so hätten wir es in die Erde eingegraben, wodurch die genannten Störungsquellen am sichersten eliminiert worden wären. Bei der im nächsten Frühjahr geplanten Fortsetzung der Versuche denken wir in der Tat ein umbleites, vieladriges (natürlich nicht eisenbandagiertes) Telephonkabel zu verwenden, welches weit entfernt von jedem größeren Verkehrs- oder Industriezentrum in die Erde so verlegt ist, daß es einen bestimmten Flächenraum (vgl. weiter unten) umspannt. Den seither angestellten Versuchen möchten wir nur die Bedeutung von Vorversuchen beimessen, welche zunächst die Brauchbarkeit der neuen Anordnung erproben sollten.

3. Die ersten Versuche wurden auf dem in der Nymphenburger Vorstadt Münchens gelegenen Grundstücke des Herrn Prof. Dr. M. Th. Edelmann sen. ausgeführt. Hier hatten wir während des Tages und abends reichlich Gelegenheit die Störungen zu studieren, welche durch den Trambahnverkehr, vorübergehende Wagen und die elektrische Straßenbeleuchtung hervorgerufen werden. Dieselben bestehen durchweg in plötzlich auftretenden Zuckungen von sehr unregelmäßiger und verschiedenartiger Gestalt, die aber rasch abklingen.

Daneben zeigten sich aber stets längere Ketten überaus regelmäßiger Wellen von Periodendauern weniger Zehntel

¹⁾ Hierauf ließe sich eine bemerkenswerte Anwendung der ganzen Anordnung gründen. Da erdmagnetische Kraftlinien überall in genügender Zahl zur Verfügung stehen, so braucht man nur mit einem bewegten Teile eines Systems, etwa eines Pegelapparates oder Flutmessers, dessen Bewegungen fernregistriert werden sollen, einen die Kraftlinien schneidenden Leiterteil zu verbinden, der durch eine Doppelleitung an ein solches hochempfindliches Saitengalvanometer angeschlossen ist. Bei vielen Gelegenheiten überzeugten wir uns davon, wie treu die inducierende Bewegung durch den Stromverlauf nachgeahmt wird.

Sekunden. Diese waren es, welche auch nachts in der Zeit zwischen 1 und 5 Uhr, in der der Trambahnverkehr ruht, und auch morgens zwischen 4 und 5 Uhr, in der auch der Lichtbetrieb im Sommer abgestellt wurde, andauerten. Natürlich wurde sofort an entfernte elektrische Betriebe gedacht, welche die ganze Nacht hindurch unterhalten blieben. Nach eingezogenen Erkundigungen kam hier vor allem die nächste, aber immer noch 1130 m weit entfernte Unterstation der städtischen Elektrizitätswerke in Betracht.

Die großen zwölfpoligen Gleichstromdynamos, welche das Beleuchtungsnetz speisen, machen 165 Touren pro Minute, die Dauer einer ganzen Umdrehung der Armatur beträgt also 0,363 sec. Die Zeit, welche verstreicht, bis ein Wickelungselement von einem Feldmagneten bis vor den nächsten tritt, beträgt nur den zwölften Teil hiervon oder 0,030 sec. Weder die eine noch die andere Periode trat in den Kurven hervor.

Der zum Betriebe dieser Dynamos verwendete dreiphasige Wechselstrom hat die gewöhnlich angewendeten 100 Perioden per Sec.; es konnten Pulsationen von $1/300$ sec. Dauer erwartet werden, aber auch diese waren nicht zu bemerken.

Somit konnte bereits bei diesen Versuchen vermutet werden, daß diese Wellen dem Erdmagnetismus selbst angehörten.

Immerhin wird man derartigen Beobachtungen, welche in der Nähe eines großen Verkehrszentrums angestellt worden sind, nicht unberechtigtes Mißtrauen entgegenbringen. Wir verlegten daher den Beobachtungsort weit außerhalb der Stadt auf das 25 km südlich von München zwischen Icking und Wolfratshausen in der Villenkolonie „Schliederlohe“ gelegene Waldgrundstück des Herrn Prof. Dr. M. Th. Edelmann. Unterhalb desselben führt zwar in tiefem Einschnitte die Isartalbahn vorüber, deren Züge jedesmal beim Vorüberfahren sich durch ganz charakteristische Stromzuckungen in der Leiter schleife kennzeichneten; da aber diese Momente der Störungen durch die vorüberfahrenden Eisenmassen genau feststellbar, da sie außerdem nicht zu häufig waren, konnten sie leicht aus den Beobachtungen eliminiert werden. Die nächste elektrische

Zentrale, das Drehstromwerk in Weidach, liegt 2,2 km entfernt, eine ihren Maschinen entsprechende Schwingungsperiode konnte nicht konstatiert werden. Man könnte noch an eine direkte Induktionswirkung von seiten der unten im Eisenbahneinschnitte vorüberführenden Telegraphenleitungen auf die von uns ausgelegte Leiterschleife denken. Aber abgesehen davon, daß die nächste Stelle der Schleife ca. 70 m vom nächsten Telegraphendrahte entfernt lag, breitete sich zwischen diesem und der Schleife der ganze Erdhang aus, so daß vom Orte des Kabels die Leitungen nirgends sichtbar waren; es war also genügender Erdschutz vorhanden. Die Schleife wurde im Walde ausgelegt, das Kabel durch Holzpföcke im tiefen Grase befestigt; dadurch waren die oben angedeuteten Fehlerquellen beseitigt.

Auch hier auf diesem völlig geschützten Terrain zeigten sich nun die kurz dauernden Pulsationen vollkommen deutlich ausgeprägt und in großer Fülle, sowohl tags als auch nachts. Indessen besteht ein sehr charakteristischer Unterschied, der an denjenigen erinnert, welcher schon von Eschenhagen bezüglich der langen erdmagnetischen Wellen konstatiert worden war (vgl. oben S. 529). Am Tage sind die Pulsationen heftig, stürmisch, wechselnd und unruhig; während der Nacht treten dafür ruhige Schwingungen, von kleinerer aber gleichförmiger Amplitude auf. Die Kurven weisen teils ziemlich reine Sinuslinien auf, teils mehrere miteinander interferierende Wellensysteme. Die meteorologischen Elemente scheinen keinen direkten Einfluß zu haben, wenigstens konnten wir keinen merklichen Unterschied in den Kabelströmen bemerken bei Wind oder bei Windstille, bei Sonnenschein oder bei bedecktem Himmel, bei hoher oder niedriger Temperatur, bei Regen oder niederschlagsfreiem Wetter, selbst ein heranziehendes Gewitter änderte nichts Wesentliches an dem allgemeinen Erscheinungsbilde. Offenbar umfaßt die Ursache der „erdmagnetischen Pulsationen“ weite Gebiete, so daß der lokale Witterungscharakter an einem bestimmten Orte irrelevant ist.

Was die Empfindlichkeit unserer Anordnung betrifft, so

berechnet sich dieselbe wie folgt: In Schlederlohe hatten wir mit dem Kabel eine nahezu rechteckige Fläche von 53,2 bzw. 54,0 m Länge und 33,1 bzw. 37,8 m Breite, also rund 1900 qm oder $1,9 \cdot 10^7 \text{ cm}^2$ Fläche umlegt, die übrigen 32 m waren als Hin- und Rückleitung zu dem in der Villa des genannten Grundstückes aufgestellten Galvanometer dicht nebeneinander gelegt. Da die 15 Adern wiederum in Serie geschaltet waren, so betrug die gesamte Windungsfläche 28500 qm oder $2,8 \cdot 10^8 \text{ cm}^2$. Bei einer Vertikalintensität von 0,41 C. G. S. Einheiten, wie sie im Mittel am Beobachtungsorte herrschte, würde die Änderung um 1 γ dieser Komponente d. i. um den 41000sten Teil ihres mittleren Betrages in einer Sekunde einer induzierten elektromotorischen Kraft von $2,8 \cdot 10^{-5}$ Volt entsprechen. Der Widerstand des gesamten Leiterkreises betrug 229 Ohm; bei voller Empfindlichkeit entsprach, wie oben angegeben, ein Millimeter 10^{-7} Ampère; der genannte Induktionsstoß brachte also mehr als einen Skalenteil Ausschlag hervor, der mit dem Mikroskope genau gemessen werden konnte. Ein Zehntel der genannten Feldvariation konnte noch deutlich bemerkt werden. Da der Faden auch sehr kurz dauernden Stromstößen vollkommen getreu folgt, so steigert sich die Empfindlichkeit in dem Maße, als sich der zeitliche Ablauf der Feldstärkeänderung beschleunigt. Hierin liegt ein wesentlicher Vorteil gegenüber den älteren Methoden, die schon weit oberhalb der genannten Empfindlichkeitsgrenze versagen.

4. Von besonderem Interesse sind naturgemäß die bei den Beobachtungen sich ergebenden Periodendauern. Außer Pulsationen von der Dauer, wie sie schon früher beobachtet worden waren, also von der Periodenlänge von mehreren Sekunden, konnten wir auch sehr viel kürzere magnetische Wellen konstatieren, ja bei Schnelllauf der Registriertrommel gelang es, noch länger andauernde und sehr regelmäßige Pulsationen nachzuweisen, deren Periodendauer nur 0,025 sec. betrugen. Damit ist gezeigt, daß man selbst bei den „Feinregistrierungen“ noch lange nicht an den letzten „Elementen“ der erdmagnetischen Störungen angelangt war, wie vermutet wurde (vgl.

oben S. 528), sondern daß diese bei weiterer Auflösung noch eine Fülle von feineren Einzelheiten zu offenbaren vermögen.

Angesichts so rascher Pulsationen könnte die Vermutung geäußert werden, daß man hier vielleicht eine elektromagnetische Eigenschwingung des in sich geschlossenen Leiterkreises selbst vor sich habe. Das Kabel besitzt ja eine gewisse Selbstinduktion L und eine nicht unerhebliche Kapazität C (die entsprechenden Größen für das Galvanometer sind daneben zu vernachlässigen). Nun ist bekanntlich die Schwingungsdauer eines solchen Leiterkreises:

$$\tau = \frac{2\pi \sqrt{L(\text{cm}) \cdot C(\text{cm})}}{3 \cdot 10^{10}} \text{ sec.}$$

Die Selbstinduktion einer Ader gegenüber allen anderen Adern und gegenüber dem Erdboden wurde für ein 2 m langes Stück rund gleich 0,00001 Henry gefunden; für eine ganze Ader beträgt sie somit 0,00105 Henry und die Induktanz des ganzen Kabels L war angenähert gleich 0,01575 Henry (Erdradient) oder $1,6 \cdot 10^7$ elektromagnetische Einheiten (cm).

Die Kapazität einer Ader gegen die anderen betrug 5,7 Mikrofara pro km, des ganzen Kabels also rund 18 Mikrofara oder $1,8 \cdot 10^{-14}$ elektromagnetische Einheiten oder $1,6 \cdot 10^7$ elektrostatische Einheiten (cm). Setzt man diese Werte ein, so erhält man eine Schwingungsdauer für die Eigenschwingung $\tau = 0,003$ sec., also eine Größe, die noch unterhalb des Schwellenwertes des Auflösungsvermögens der verwendeten Registrierung gelegen ist.

Es ist natürlich kaum daran zu denken, alle diese Einzelschwingungen fortlaufend zu registrieren; dazu würde man ja außerordentliche Längen der Registrierstreifen benötigen. Aber bereits die vorliegenden, wenn auch gerade nach dieser Seite hin noch unzureichenden Aufzeichnungen scheinen darauf hinzudeuten, daß die Periodenlängen der auftretenden Wellen nicht beliebig verteilt sind, sondern daß gewisse Periodendauern häufiger wiederkehren.

Es liegt die Frage nahe: Dürfen wir nicht gewisse Periodendauern in diesen kurzen erdmagnetischen Pulsationen schon von vornherein vermuten und nach ihnen suchen?

Bei der Erzeugung elektrischer Wellen von kleiner Länge verwendet man bekanntlich häufig, z. B. bei der Demonstration der Hertzschen Versuche nach Righi, Kugeln, welche aus dem elektrischen Gleichgewicht — etwa durch eine Funkenentladung — herausgebracht, elektrische Eigenschwingungen ausführen und dadurch zur Entstehung elektromagnetischer Wellen Veranlassung geben; die Längen dieser Eigenwellen sind von der Größenordnung des Kugelumfanges. Die Theorie solcher „Kugeloscillatoren“ wurde zuerst eingehender von J. J. Thomson¹⁾ behandelt. Neuerdings wurde die Thomsonsche Theorie von A. Lampa²⁾ für den Fall erweitert, daß die Umgebung der Kugel eine von der Einheit verschiedene Dielektrizitätskonstante besitzt.

Übereinstimmend ergibt sich, daß die Eigenschwingung einer von Luft umgebenen Kugel die Periodendauer:

$$T = \frac{4 \pi a}{V \sqrt{3}}$$

hat, wie a der Kugelradius in cm, V die Lichtgeschwindigkeit $V = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec. ist.

Die Erde stellt eine im Weltenraume frei schwebende, von Luft allseitig umgebene Kugel aus gutleitendem Materiale an ihrer Oberfläche dar. Denkt man sich das elektrische Gleichgewicht auf ihr durch irgend einen irdischen oder außerirdischen Prozeß gestört, so wird sie in den Gleichgewichtszustand nur durch eine Reihe von Eigenschwingungen hindurch gelangen können. Die Periode dieser Schwingungen berechnet sich nach der mitgeteilten Formel zu 0,15 oder 1/6 bis 1/7 sec.

Die Wellenlänge dieser Eigenschwingung ist in Luft gleich 46130 km, d. h. gleich dem 1,155 fachen des Erdumfanges, sie ist also nicht mit einer der in der drahtlosen Telegraphie verwendeten Wellenlängen zu verwechseln.

¹⁾ J. J. Thomson, Recent researches in Electricity and Magnetism. Oxford 1893, S. 360 ff.

²⁾ A. Lampa, Wiener Sitzungsber. 111, Abt. II a, S. 37, 1903.

Es wäre verfrüht, wollte man behaupten, daß gerade eine kurzdauernde Schwingung dieser Periode in den Beobachtungen besonders häufig auftritt; um dies außer Zweifel zu setzen, müßten die Beobachtungen auf einen viel größeren Zeitraum ausgedehnt und namentlich an anderen Orten unter anderen Bedingungen und mit anderen Hilfsmitteln verifiziert werden. Sollte sich indessen die Vermutung bestätigen, so wäre sofort ein anderer Weg angedeutet, auf welchem vermutlich sich wesentliche neue Einblicke in das Wesen der erdmagnetischen Störungen eröffnen würden. Es liegt nicht außerhalb der Möglichkeit einen Schwingungskreis von 0,15 sec. Eigenschwingungsperiode herzustellen. Würde man von dem benutzten Kabel eine Länge von 9,5 km verwenden, so würde dasselbe $7,25 \cdot 10^8$ cm Selbstinduktion und etwa ebensoviele cm Kapazität besitzen; man würde dann nur noch einen kleinen Luftkondensator an irgend einer Stelle einzuschalten haben, um eine Periode von der genannten Größenordnung genau einregulieren zu können; das Saitengalvanometer würde man an der dieser Zusatzkapazität im Leiterkreise genau diametral gegenüberliegenden Stelle einschalten, so daß zwischen jedem Saitenende und dem nächsten Kondensatorbelege auf beiden Seiten die gleiche Leiterstrecke enthalten ist; die Kapazität selbst wäre geeignet einzuregulieren. Das Kabel würde, falls kreisförmig ausgelegt, einen Flächenraum von ca. 720 Hektar umfassen.

Man würde an dem Kondensator einen Schwingungsbauch der Spannung erhalten, das Saitengalvanometer wäre an dem Spannungsknoten und dem Schwingungsbauche der Strömung eingeschaltet; vermutlich wird man die Amplitude der Schwingung durch beide, Spannung und Strömung, messen können. Eine solche mit der genannten Selbstinduktion und Kapazität ausgerüstete Leiterschleife würde alsdann einen auf die elektromagnetische Grundschiwingung des Erdkörpers abgestimmten Resonator darstellen. Derselbe würde vermutlich leicht „ansprechen“, so oft jene regionalen erdmagnetischen Störungen einsetzen, auf deren Vorhandensein schon ältere Beobachtungen hingewiesen haben (vgl. oben S. 529). Als-

dann müssen sich an der Stelle, wo die Kapazität eingeschaltet ist, erhebliche Spannungsschwankungen einstellen; bekanntlich wächst ja die Amplitude derselben außerordentlich rasch, wenn sich die Eigenperiode des Resonators der Periode der Schwingungen, auf welche der Resonator ansprechen soll, nähert.¹⁾ Man brauchte alsdann also nicht mehr die einzelnen Schwingungen selbst zu registrieren, sondern nur das Anwachsen und Abnehmen der Resonatorerregung.

Derartige Versuche würden sich namentlich in höheren Breiten sehr empfehlen, in denen die „magnetische Unruhe“ durchweg eine sehr große ist (vgl. oben S. 531). Hier brauchte man nur ein relativ unempfindliches Saitengalvanometer oder man könnte wahrscheinlich die an der Kapazität auftretenden Spannungsschwankungen elektrometrisch direkt messen. Vor allem wäre es gewiß außerordentlich lohnend, wenn der S. 530 erwähnte Siemenssche Versuch im hohen Norden von Nord-Amerika, in der Nähe des magnetischen Nordpoles mit einer großen Kabelschleife wiederholt werden würde, deren Eigenschwingungsperiode in bestimmter Weise abgestimmt werden könnte.

¹⁾ Vgl. z. B. die am einfachen quadratischen Draht-Resonator angestellten Messungen von V. Bjerknes, Ann. d. Phys. (3), 44, 74, 1891.