

Zweck eines in Augsburg aufgefundenen physikalischen Geräts mit Ergänzung zum Wikipedia-Beitrag vom 26.02.2014

Thomas Walcher

Institut für Kernphysik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz, Germany.

(Dated: 16. März 2014)

Es handelt sich um ein Strommess-Gerät aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. In der ursprünglichen Form (Johann Michael Enkling) war es höchstwahrscheinlich eine weiterentwickelte sogenannte „Sinus-Busssole“ (Pouillet, 1832). Weiter konnte es als Null-Instrument für Brücken-Schaltungen und wegen der getrennten „Multiplikatoren“, das sind die grünen Spulen, auch als Differential-Galvanometer benutzt werden. Das Gerät wurde wohl später zu einem „Nadel-Galvanometer“ modifiziert, vermutlich in Anlehnung an eine von J.C. Poggendorf, 1842 beschriebenen Methode. Mit der Bestimmung der Horizontal-Komponente des Erdfeldes nach Carl Friedrich Gauss und Wilhelm Weber (1832 und 1837) hat das Gerät wenig zu tun. Da die Theorie zu den hier vorgeschlagenen verschiedenen Verwendungen des Gerätes relativ involviert ist und nicht wie gewünscht auf einer DIN A4-Seite dargestellt werden kann, wird auf dieser Seite das Wesentliche präsentiert und für Details auf den Anhang mit ausführlicheren Erläuterungen verwiesen.

1. Sinus-Busssole (Busssole = Kompass)

Das ursprüngliche Gerät enthielt eine Magnetnadel, die unten in dem Glasansatz auf dem in der Dokumentation erwähnten Dorn, gelagert war. Oben muss ein Deckel mit einem entsprechenden Dorn in dem Steg über den Spulen eingepasst gewesen sein, der die obere Lagerung der Magnetnadel gewährleistete. Die Magnetnadel befand sich in der Mittelebene des Luftspaltes der Spulen, ein Zeiger oberhalb auf der Höhe der $\pm 10^\circ$ -Skala. Der noch vorhandene grobe und krumme Zeiger muss eine laienhafte, spätere Hinzufügung sein, sie entspricht nicht dem mechanischen Niveau von Ekling. Ebenso macht der erwähnte Eisenkern in den Spulen keinen Sinn, da das induzierte Dipolmoment grob proportional zum Strom in den Spulen und damit seine Verdrehung insgesamt sehr grob proportional zum Quadrat des Stroms in den Spulen wäre. Beide werden im Folgenden nicht weiter beachtet.

In dieser Anordnung wird am Anfang der Messung die Bussolen-Nadel im Magnetfeld der Erde mit dem Schneckenantrieb durch den Holzgriff auf die 0° der oberen $\pm 10^\circ$ -Skala eingestellt. Der Winkel der unteren 360° -Skala wird abgelesen. Ein Strom I erzeugt ein Magnetfeld, für das näherungsweise das Feld $H_1 = (n/l)I$ in einer langen Spule angesetzt werden kann, wo n die Zahl der Spulenwindungen und l die Länge der Spulen ist. Die Magnetnadel wird durch dieses Feld H_1 abgelenkt. Nun wird das Spulenpaket mit dem Schneckenantrieb solange verdreht bis der Zeiger wieder auf den 0° der $\pm 10^\circ$ -Skala steht und der zugehörige Winkel der unteren Skala abgelesen. Dann gilt $H_1 = H_0 \sin \phi$, wo H_0 die Horizontalkomponente des Erdfeldes und ϕ die Differenz zwischen den beiden Winkelablesungen ist. Damit ist also $I = (l/n) H_0 \sin \phi$ (Herleitung im Anhang). Vorteile solcher Sinus-Bussolen sind die Unabhängigkeit von dem nicht völlig homogenen Feld in kurzen Spulen und die Stabilität der Magnetnadel gegen Erschütterungen im Vergleich zu der Aufhängung an einem Faden. Ein Nachteil ist die relativ umständliche und zeitraubende Messung.

2. Nullinstrument und Differential-Galvanometer

In der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Spannungen, Ströme und Widerstände sehr häufig durch Vergleich in Brückenschaltungen gemessene. Daher bietet sich das Gerät zusätzlich als Null-Strom-Messinstrument an. Die getrennte Herausführung der Spulenanschlüsse erlaubt es auch durch entgegengesetzte Polung zwei Ströme zu vergleichen und damit die Verwendung als „Differential-Galvanometer“. Hierzu ist die sehr sorgfältige symmetrische Ausführung der Spulenanschlüsse bemerkenswert. Sie verringert den Einfluss der durch diese erzeugten Magnetfelder und erlaubt durch Umpolung Asymmetrien der Felder und Nadeln herauszumitteln.

3. Nadel-Galvanometer

In der Dokumentation wird schon auf den mechanisch geringerwertigen Umbau des Geräts hingewiesen. Dieser hatte wahrscheinlich zum Ziel aus der Sinus-Busssole ein Nadel-Galvanometer zu machen. In dieser damals üblicheren Form eines Strommessgerätes wurde nicht das durch den Strom in den Spulen erzeugte Magnetfeld mit dem Erdmagnetfeld, sondern das vom Spulenfeld erzeugte Drehmoment auf die Magnetnadel mit dem Drehmoment der Torsion eines Drahtes verglichen. Für die Messung des Drehwinkels steht dann aber hier nur die $\pm 10^\circ$ -Skala zur Verfügung, was die Messgenauigkeit und den Messbereich stark einschränkt. Die vorhandene 360° -Skala ist mit dem Spulenpaket und dem Steg fest verbunden und kann daher nicht zur Messung der Verdrehung dienen. Wenn man jedoch den Aufhängepunkt festhält, kann man das Spulenpaket verdrehen bis das Moment durch den Spulenstrom und das Torsionsmoment im Gleichgewicht sind. Daher ist es nicht unvernünftig anzunehmen, dass die Stativklammer am oberen Ende des hinzugefügten Turms zu seiner Fixierung und damit des Aufhängepunkts gegenüber der 360° -Skala mit dem Spulenpaket diene. Hierzu musste man die Stativklammer über eine Stativstange mit dem Experimentiertisch verbinden. Dann kann man die Spulen mit dem Schneckenantrieb solange drehen, bis der Zeiger wieder in die Mitte der $\pm 10^\circ$ -Skala zeigt und die Magnetnadel sich mitten im Spalt zwischen den Spulen befindet. Ist ϕ die Winkeldifferenz auf der 360° -Skala, M das magnetische Moment der Magnetnadel und D^* das Richtmoment des Drahtes gilt $I = (D^* l)/(n M) \phi$ (Herleitung im Anhang).

Dies adaptiert eine Idee von J. C. Poggendorf (1842) die Magnetnadel immer in der gleichen Konfiguration zu den Spulen zu orientieren, sodass man von den Inhomogenitäten der eigentlich kurzen Spulen unabhängig wird. Dann gilt die exakte Proportionalität zwischen Strom und Drehwinkel. Sollte der Turm nicht gegen die Brücke drehbar sein, könnte die Stativklammer die Anbringung eines Permanentmagneten als Hilfsmagneten, wie er manchmal zur Erweiterung des Messbereichs in der Literatur angeführt wird, oder der mechanischen Stabilisierung des Geräts gedient haben.

Nach Entscheidung über die Ausschreibung zur Erklärung des „unbekannten Technikfundstücks“ wurde in Wikipedia (url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ekling>) ein zweites fast baugleiches Exemplar (Ekling, Wien 1834), mit der Serien-Nummer 3, das sich in der historischen Sammlung der Fakultät Physik der Universität Wien befindet, veröffentlicht. Dieses zweite Exemplar bietet zusätzliche Information und erlaubt einige Einschränkungen der möglichen Verwendung. Insbesondere ist der Turmaufbau von genau gleicher Höhe und guter mechanischer Qualität, sodass die spätere Hinzufügung unwahrscheinlich ist. Andererseits bleibt die in Wikipedia angeführte Verwendung als „Multiplikator nach Nobili (astatisches Nadelgalvanometer)“ physikalisch unverständlich. In einem angefügten Abschnitt zur ursprünglichen Interpretation des Gerätes wird hierauf eingegangen.

Anhang mit weiteren Erläuterungen

Die hier gegebene Bestimmung des Geräts beruht an einigen Stellen auf Annahmen, da die Dokumentation nicht alle relevanten Eigenschaften anführt. Sie konnte sie nicht anführen, da einige Fragen erst aus den möglichen Verwendungen des Gerätes hervorgehen. Leider wurde ein Zugang zum Gerät verweigert und Fragen zu nicht dokumentierten Eigenschaften des Gerätes nicht beantwortet. Daher müssen einige Eigenschaften angenommen werden um eine möglichst konsistente Lösung der Fragestellung zu geben, die alle dokumentierten Elemente des Geräts berücksichtigt. Hierbei ist das zentrale Problem die Interpretation der 360°-Skala. Sie ist mit dem Spulenpaket fest verbunden, wird mit einem aufwendigen Schneckengetriebe gedreht und kann mit einer Lupe präzise abgelesen werden. Jede Erklärung, die diesen zentralen Teil des Gerätes nicht einschliesst, kann nicht genügen.

Die Darstellung gibt einige relevante Quellen an, die die Strommessgeräte der Mitte des 19. Jahrhunderts beschreiben. Diese sind aber keine erschöpfende historische Darstellung der Strommessung Mitte des 19. Jahrhunderts, obwohl eine solche Untersuchung höchst interessant wäre, weil sie die Forschungsgegenstände dieser Zeit zeigte. Vielmehr wird versucht in einer modernen Form nur die wesentlichen physikalischen und technischen Grundlagen darzulegen.

BESTIMMUNG DER HORIZONTALKOMPONENTE DES ERDFELDES NACH GAUSS UND WEBER

In der „Dokumentation über ein Gerät von Johann Michael Eklig“ wird vorgeschlagen, dass das Gerät in einem dem Gauss-Weber'schen Experiment ähnlichem hätte Verwendung finden können. Dies erscheint höchst unwahrscheinlich. Um das zu zeigen, muss die etwas unpräzise Darstellung dieses Experiment in der Dokumentation verdeutlicht werden.

Die Grundidee des Gauss-Weber'schen Experiments zur „Bestimmung der Horizontalintensität“ des Magnetfeldes der Erde (Gauss 1833 [1, 2]) ist, diese mit einem schwachen Feld zu überlagern. Hierzu werden zwei verschiedene Experimente durchgeführt (siehe Abb. 1). Im ersten befindet sich eine Kompassnadel im Magnetfeld der Erde (Pole S-N) in der Mitte einer nicht magnetischen Schiene. Einmal ist die Schiene west-östlich gerichtet und ein Magnetstab mit der Orientierung Pole s-n verschiebbar entlang ihrer Achse (Fig. 151, 1. Hauptlage) und einmal süd-nördlich und der Magnetstab quer zu ihrer Achse (Fig. 152, 2. Hauptlage).

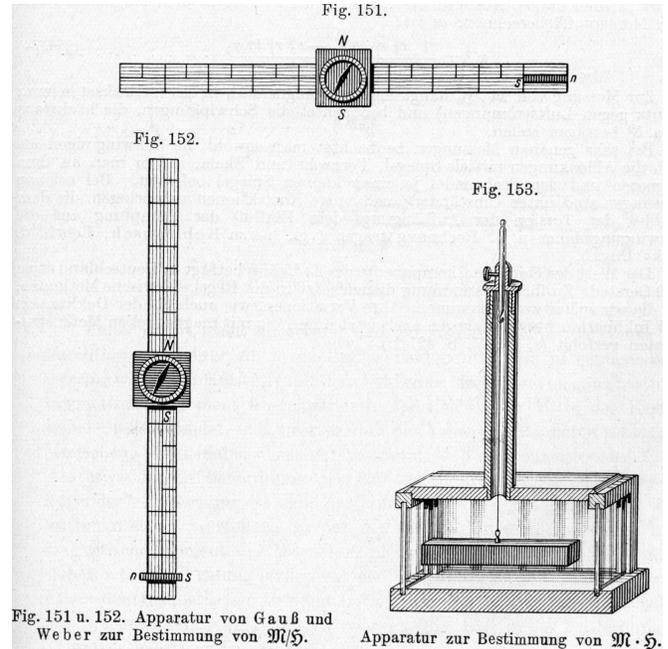


Abbildung 1. Die drei Messungen des Gauss-Weber'schen Experiments zur Bestimmung der Horizontalintensität des Erdmagnetfeldes. (Kopie aus Ref. [3])

Das Erdfeld sei \vec{H}_0 und das magnetische Moment des Magnetstabes \vec{M} . In erster Ordnung Näherung gilt nach Gauss $\vec{H}_1 = 2\vec{M}/r^3$ für die Orientierung in Fig. 151 und für die Orientierung in Fig. 152 $\vec{H}_2 = \vec{M}/r^3$. Beide Felder \vec{H}_1 und \vec{H}_2 stehen senkrecht auf der S-N-Richtung, so dass sich das Vektor-Diagramm in Abb. 2 ergibt.

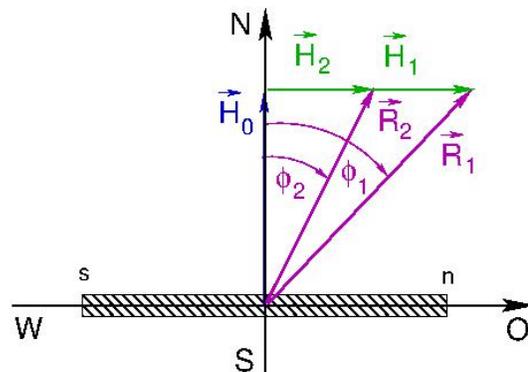


Abbildung 2. Die Horizontalintensität des Erdmagnetfeldes \vec{H}_0 , die Feldkomponenten des Magnetstabes \vec{H}_1 und \vec{H}_2 und die Resultierenden \vec{R}_1 und \vec{R}_2 beim Gauss-Weber-Experiment in Fig. 151 und 152 (siehe Abb. 1). Die schraffierte Fläche deutet die Orientierung des Magnetstabes an.

Die Nadel des Kompasses stellt sich in Richtung der

Resultierenden $\vec{R}_{1,2}$ ein. Man liest sofort ab:

$$\tan \phi_1 = H_1/H_0 = 2(M/r^2)/H_0 \text{ bzw.} \quad (1)$$

$$\tan \phi_2 = H_2/H_0 = (M/r^2)/H_0 \quad (2)$$

wobei $H_{0,1,2}$ und M für die Beträge der Vektoren $\vec{H}_{0,1,2}$ und \vec{M} stehen (Zur Herleitung siehe ref. [3], Kap.VI, §13).

Variiert man die Abstände des Magnetstabes zur Kompassnadel erhält man eine Messserie, aus der man das Verhältnis M/H_0 gemäss

$$M/H_0 = (r^2/2) \tan \phi_1 \text{ bzw. } M/H_0 = r^2 \tan \phi_2 \quad (3)$$

bestimmen kann. Zur Reduzierung der Fehler ist es wichtig die Symmetrie der Anordnungen auszunutzen und den Magnetstab auf beiden Seiten der Kompassnadel zu platzieren und die Orientierung des Magnetstabes um 180° zu drehen.

Zur Trennung von M und H braucht man eine zweite unabhängige Information. Diese bekommt man mit der Anordnung in Fig. 153. Sie ist der Torsionswaage von John Mitchel, die von Henry Cavendish 1797 zur Messung der Gravitationskonstante benutzt hatte, nachempfunden. Der gleiche Magnetstab aus dem ersten Experiment hängt jetzt an einem Torsionsdraht und schwingt in der horizontalen Ebene im Erdmagnetfeld, das eine Rückstellmoment auf ihn ausübt. Es ergibt sich als Schwingungsdauer T :

$$T = 2\pi\sqrt{\Theta/(M \cdot H_0)} \quad (4)$$

wo Θ das Trägheitsmoment des Magnetstabes ist, das aus seiner Geometrie und seiner Masse berechnet werden muss (Zur Herleitung siehe ref. [3], Kap.VI, §12). Aus der Schwingungsdauer T kann man nun das Produkt $M \cdot H_0$ bestimmen und mit dem Ergebnis für M/H_0 aus Glchg. (3) M und H_0 trennen. Das magnetische Moment der Kompassnadel fällt heraus, das des Magnetstabes wird bestimmt! So bestimmten Gauss und Weber die Horizontalkomponente des Erdfeldes H_0 .

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Bedeutung der Gauss'schen Messungen nicht in der Bestimmung des erdmagnetischen Feldes liegt. Humboldt hatte bereits Relativmessungen zwischen verschiedenen Orten auf seinen Entdeckungsreisen gemacht, auf die sich Gauss bezieht. Vielmehr schafften Gauss und Weber mit dieser absoluten Messung einen „Magnetfeldstandard“ eine Verbindung zwischen den magnetischen Einheiten und den mechanischen Einheiten, cgs-System oder auch Gauss'sches Masssystem genannt. In diesem heute kaum noch verwandten Masssystem ist zum Beispiel die Einheit des Stroms $cm^{3/2}g^{1/2}s^{-2}$ wobei $1 cm^{3/2}g^{1/2}s^{-2} \hat{=} 333 \times 10^{-12} A$ und die Einheit der elektrischen Kapazität eines Kondensators cm mit $1 cm \hat{=} 1,11 \times 10^{-6} \mu F$ (Siehe z.B. Ref. [4]). Von besonderem Interesse ist hier auch die Einheit der magnetischen Feldstärke, früher häufig „magnetische Intensität“ genannt. Sie ist $1g^{1/2}/(cm^{1/2}s)$ = 1 Gauss, benannt zu Ehren Gauss.

Heute werden andere Basiseinheiten gebraucht (SI, System International mit Lichtgeschwindigkeit c , kg, Sekunde s und Ampère A), teilweise aus prinzipiellen, teilweise aus praktischen Gründen. In SI-System gilt 1 Tesla = 10^{-4} Gauss. Das Masssystem spielt eine gewisse Rolle in diesem Aufsatz. In moderner Schreibweise ist im SI das Drehmoment auf ein magnetischen Dipol $\vec{N} = \vec{\mu} \times \vec{B}$, wo $\vec{\mu}$ das magnetische Moment und \vec{B} das Induktionsfeld (altmodisch Kraftflussdichte) sind. Der Zusammenhang mit dem magnetischen Feld \vec{H} ist durch die Induktionskonstante μ_0 gegeben: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. In der alten Literatur wird im cgs-System gedacht und das magnetische Moment als $\vec{M} = \mu_0 \vec{\mu}$ definiert, sodass für das Drehmoment gilt $\vec{N} = \vec{M} \times \vec{H}$. Diese Bezeichnung ist hier übernommen um einen leichteren Zugang zu den Formeln in den zitierten alten Lehrbüchern und Literatur zu haben.

SINUS-BUSSOLE

Das in der Mitte des 19. Jahrhunderts übliche Strommessgerät war das Galvanometer [5]. Je nach Ausbildung des Zeigers unterscheidet man das Nadel-Galvanometer vom Spiegel-Galvanometer. In Abb.3 ist ein einfaches Nadelgalvanometer abgebildet. Es wurde von Bois de Raymond (1831–1889) für die Untersuchung der „tierische Elektrizität“, das ist die Leitung des elektrischen Stromes in Nerven, benutzt.

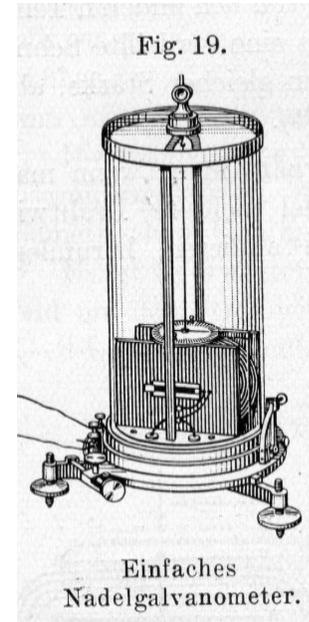


Abbildung 3. Einfaches Nadelgalvanometer. Das Spulenpaket befindet sich zwischen den senkrechten Platten. Der horizontale Spalt („Äquatorialebene“) liegt auf der Höhe des Magnetstäbchens im Magnetfeld der Spule, das oben sichtbare Magnetstäbchen mit Teilkreis vervollständigt das „astatische Nadelpaar“ und ist zugleich Zeiger. (Kopie aus Ref. [3])

Das Spulenpaket, der „Multiplikator“, erinnert an das Ekling'sche Gerät reicht aber zu seiner Zweckbestimmung nicht aus. Das durch diese Spulen auf die Magnetnadel im Luftspalt ausgeübte Drehmoment dreht den über dem Spulenpaket sichtbaren Zeiger solange bis das rücktreibende Moment der Torsion des Aufhängedrahtes ein Gleichgewicht erzeugt. Der Zeiger kann selber eine der Nadel im Inneren entgegengesetzt gepolte Magnetnadel sein und ein sogenanntes „astatisches“ Nadelpaar (Nobili 1826) bilden. Damit wird der Einfluss des Erdfeldes kompensiert, was aber für die gleich zu diskutierende Sinus-Busssole gerade nicht gewollt ist.

Der Vorteil dieser Art von Galvanometer ist, dass es abhängig vom Richtmoment des Aufhängedrahtes, der von der Länge, dem Radius und dem Torsionsmodul des Drahtes bestimmt ist, auch für grössere Ströme geeignet ist. Sein grosser Nachteil ist, dass die Feldverteilung im Spalt zwischen den kurzen Spule („Äquatorialebene“) nicht homogen ist und daher der Zusammenhang des Stroms mit der Verdrehung nur näherungsweise linear ist [5]. Das Gerät muss also geeicht werden. Wir kommen darauf im Abschnitt „Nadelgalvanometer“ weiter unten ausführlich zurück.

Bei dieser Interpretation des Gerätes ist es aber evident, dass die 360°-Skala keine Anwendung finden kann, da die Skala und das Spulenpaket beim Ekling'schen Gerät fest verbunden sind. Die Verwendung der $\pm 10^\circ$ -Skala würde einen sehr eingeschränkten Messbereich bei schlechter Ablesegenauigkeit bedeuten und reicht als Erklärung der Verwendung als Nadelgalvanometer nicht.

Wenn man aber die Drahtaufhängung durch die Lagerung auf einem Dorn ersetzt, wie es bei einem Kompass üblich ist, dann stellt sich die Magnetnadel in Richtung der Resultierenden \vec{R} ein. In Abb. 4 werden die Feldkomponenten analog zu Abb. 2 gezeigt.

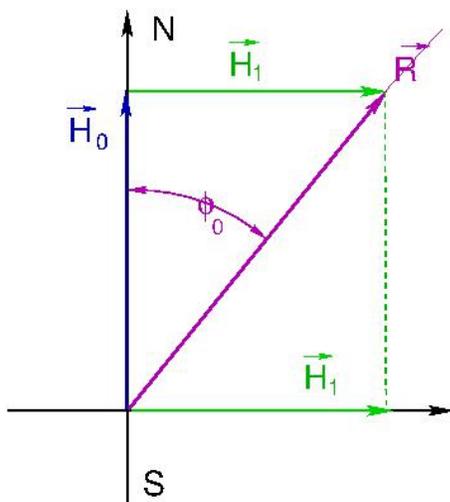


Abbildung 4. Vektor-Diagramm zur Tangenten-Bussule. Bezeichnungen wie in Abb. 2.

Es gilt evidenterweise $H_1 = H_0 \tan \phi$ woraus sich der Name „Tangenten-Busssole“ ableitet. Da wie schon erwähnt $I = (l/n)H_1$ ist, kann aus der Messung von ϕ der Strom bestimmt werden. Aber auch hier gelten die im vorletzten Paragraphen für das Nadelgalvanometer hervorgehobenen Einschränkungen für Messskala und Magnetfeld.

Diese Nachteile werden durch die bereits auf der ersten Seite beschriebene Sinus-Busssole umgangen. Abbildung 5 zeigt das zugehörige Vektordiagramm.

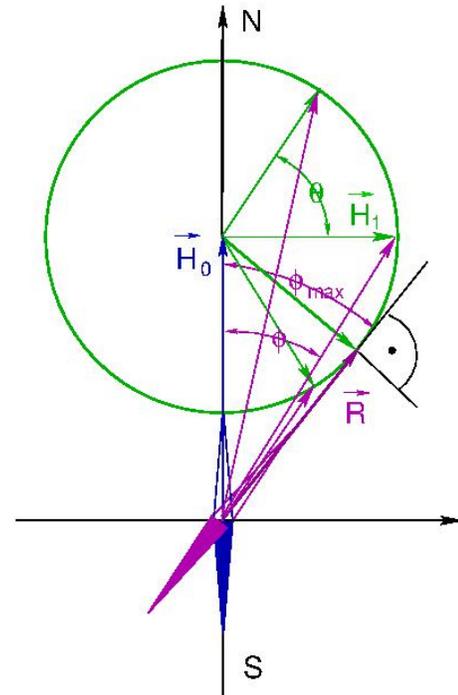


Abbildung 5. Vektor-Diagramm zur Sinus-Busssole. Bezeichnungen wie in Abb. 2

Wie schon beschrieben wird sich die Magnetnadel zunächst auf das Erdmagnetfeld \vec{H}_0 ausrichten. Das Spulenpaket wird mit dem Schneckenantrieb jetzt so gedreht, dass der Zeiger auf 0° der $\pm 10^\circ$ -Skala steht. Der hierzu gehörige Winkel Φ_0 wird auf der 360° -Skala abgelesen. (Die Winkel auf der 360° -Skala werden mit Φ bezeichnet, sie dürfen nicht mit den Winkeldifferenzen ϕ , die in den Vektordiagrammen gezeigt werden, verwechselt werden.) Nach Einschalten des Stroms dreht sich die Nadel nach der Resultierenden \vec{R} zu einem Winkel Φ_1 , da es kein Rückstellmoment gibt. Wie aus dem Diagramm einsehbar gibt es bei Drehen des Spulenpakets einen maximalen Differenzwinkel $\phi_{max} = \Phi_1 - \Phi_0$ bei dem das Spulenfeld \vec{H}_1 senkrecht auf der Resultierenden \vec{R} steht. Für diesen Winkel gilt

$$\sin \phi_{max} = H_1/H_0 = (n/l)I/H_0 \quad (5)$$

woraus wieder der Strom I bestimmt werden kann. Diesmal befindet sich die Magnetnadel immer im gleichen Feld, nämlich in der Mitte zwischen den Spulen entlang der durch die $\pm 10^\circ$ -Skala gegebenen Achse („Meridianebene“). Dies gilt für alle Ströme, sodass ein Faktor zur Korrektur der Spuleninhomogenität nur einmal bestimmt werden muss. Die Sinus-Abhängigkeit von der Winkeldifferenz ϕ gilt immer exakt, was eine gesteigerte Genauigkeit bedeutet. Der entscheidende Vorteil der Sinus-Busssole ist der direkte Bezug auf die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes. Nach dem im Abschnitt zum Gauss-Weber'schen Experiment gesagten, dient diese als „Normal“ für das absolute cgs-Masssystem. Damit kann man Messungen, die an verschiedenen Orten gemacht wurden vergleichen. In alten mathematisch-physikalischen Tabellenwerken findet man daher häufig Tabellen mit der Angabe dieser Feldstärke von $H_0 \approx 0.2$ Gaus bei verschiedenen Längen- und Breitengraden.

Die Sinus-Busssole ist nur für sehr schwache Ströme geeignet, die aber im Zentrum des damaligen Interesses standen. Die Sinus-Busssole wurde von Pouillet 1832 erfunden [4] und wird von Poggendorff kritisch diskutiert [6]. Insbesondere sagt er dort: *Po u i l l e t l ä s s t die Magnetnadel, vielleicht, weil ihm die Überflüssigkeit der concentrischen Drehung derselben nicht einleuchtete, vielleicht auch, weil er von der Aufhängung an einem Faden ein zu starkes Schwanken befürchtete, auf einer Spitze schweben. Dadurch verliert aber das Instrument einen bedeutenden Theil seiner Empfindlichkeit und Brauchbarkeit..* Diese und andere Erwägungen mögen zu dem in dem Abschnitt „Nadel-Galvanometer“ beschriebenen späteren Umbau des Originalgeräts von Ekling motiviert haben.

Es sollen hier noch einige weitere auffallende konstruktive Besonderheiten des Geräts interpretiert werden. Das Glasrohr auf der unteren Seite des Spulentisches, in dem sich der Dorn befindet, erlaubte das schnelle und einfache Einsetzen der natürlich unmagnetischen Achse, an der die Magnetnadel und der Zeiger befestigt waren. Es könnte auch sein, dass das Glasrohr ein an der Achse befestigtes „Windrad“ zur Dämpfung aufnahm, wie es in der Literatur erwähnt wird. Die obere Lagerung müsste durch einen Deckel oder „Pfropfen“ mit einem Dorn zur Führung der Achse, vorgesehen worden sein. Wie dieser Deckel auf dem Steg eingebracht wurde, ist von den Photos nicht sicher zu sehen. Man sieht gut geformte, gedrehte Übergangsstücke auf dem Steg, in die das Rohr eingelötet scheint. Da diese Übergangsstücke von guter mechanischer Qualität sind, könnte der Pfropfen in diesen gesessen haben. Es könnte sein, dass der Deckel am Kopf des Turms, dieser Pfropfen ist, da er ebenfalls von besserer mechanischer Qualität scheint als das Rohr und die Stativklemme. Zur Montage des Magnetnadel-Zeiger-Bauteils kann der Steg mit Rändelschrauben ebenso wie das Spulenpaket leicht abgenommen und wieder festge-

schraubt werden. Es ist fast überflüssig zu erwähnen, dass die drei Schraubfüße mit den Wasserwaagen dazu dienten die Mittelebene des Gerät horizontal auszurichten.

Die Möglichkeit, dass auch das ursprüngliche Gerät von Ekling ein Nadel-Galvanometer war, kann nicht völlig ausgeschlossen werden. Dann wäre allerdings der Aufhängepunkt sehr nahe an der Magnetnadel gewesen und der Aufhängepunkt sehr kurz. Damit wäre das Richtmoment des Drahtes sehr gross und das Gerät wäre nur für relativ grosse Ströme geeignet gewesen. Wie schon gesagt wäre dann auch nur die $\pm 10^\circ$ -Skala funktional und die 360° -Skala und der Schneckenantrieb wären nutzlos gewesen. Keine einleuchtende Annahme. Die zwingende Forderung eine Funktion für die 360° -Skala zu haben, könnte dann nur durch die im Abschnitt „Nadel-Galvanometer“ beschriebene Betriebsart, erfüllt werden. Da diese Variante aber wahrscheinlich eine spätere Erweiterung war, kann die 360° -Skala für das Ekling'sche Gerät so kaum begründet werden.

Zu diesen Punkten kann erst eine genauere Inspektion des Gerätes Aufschluss geben und damit die Interpretation „Sinus-Busssole“ gesichert werden.

NULLINSTRUMENT UND DIFFERENTIAL-GALVANOMETER

Die getrennte Herausführung der Spulenanschlüsse eröffnet mehrere zusätzliche Möglichkeiten das Gerät zu benutzen:

- Messung eines „Nullstroms“ in Brückenschaltungen, wie sie viel verwandt wurden [3, 4]. Da die Spannungsquellen in der Mitte des 19. Jahrhunderts („Säulen“ aus galvanischen Zellen und aus Thermolementen) grosse Innenwiderstände haben, ist eine direkte Messung von Spannungen bzw. Strömen mit Galvanometern nicht genau. Die Spulen haben einen kleinen elektrischen Widerstand, sodass der direkte Anschluss an hochohmige Spannungsquellen meistens nicht sinnvoll ist.
- Differential-Galvanometer (Becquerell). Bei diesem werden Ströme bei gegensätzlicher Polung der Spulen und damit kleinem inhomogenen Feld zwischen den Spulen verglichen. Der Vor- oder Nachteil dieser Konfiguration werden kontrovers diskutiert (siehe [7] und Referenzen dort).
- Die Vertauschung der Reihenfolge, in der die Spulen vom Strom durchflossen werden, erlaubt eine Steigerung der Genauigkeit. Damit können Asymmetrien in den Spulen, in der Nadellagerung bzw. Aufhängung und des magnetischen Zentrums der Magnetnadel untersucht werden. Dazu werden wohl häufig Messung mit positiven und negativen Auslenkungen auf der $\pm 10^\circ$ -Skala gemacht worden sein

um Asymmetrien experimentell herauszumitteln. Hierzu wurden sogenannte „Kommutatoren“ ([4], Kap. III, [3] Kap V, §9) verwandt.

NADELGALVANOMETER

Wie bereits erwähnt ist der Turm auf dem Messingsteg über den Spulen vermutlich eine später hinzugefügte Modifikation des ursprünglichen Gerätes von Ekling. Da die feinmechanische Ausführung deutlich geringerwertig ist, kann man annehmen, dass sie nicht in der Werkstatt von Ekling ausgeführt wurde.

Unwahrscheinlich ist die Annahme, dass bei Verwendung als das oben beschriebene Nadelgalvanometer die Stativklammer oben am Turm zur Verbindung über eine Stativstange mit dem Experimentiertisch zur Unterdrückung von Unruhe des Aufhängepunktes des Drahtes benutzt worden ist. Noch unwahrscheinlicher ist die Benutzung der Stativklammer zum Anbringen eines Hilfs-Permanentmagneten zur Beeinflussung des Messbereichs wie es in der Literatur erwähnt wird. Es erscheint unnatürlich, dass das Gerät ohne den aufwendigsten Teil, dem Schneckenantrieb und der 360°-Skala mit Ableselupe und möglicherweise Nonius (in der Dokumentation nicht erkennbar), zur Anwendung gekommen wäre.

Eine natürliche Erklärung ergibt sich, wenn man annimmt, dass der Turm in dem Messingsteg über den Spulen drehbar ist und die Stativklammer dazu diente über eine Stativstange den Turm mit dem Experimentiertisch zu verbinden, sodass er sich nicht mit dem drehbaren Teilen, der 360°-Skala, dem Spulenpaket, dem Messingsteg, usw., mitdreht. Die Bilder in der Dokumentation zeigen keine Lötspuren zwischen dem Steg und dem runden Einsatz, der den Turm trägt, sodass die Annahme nicht abwegig erscheint. Die sich dann ergebende Möglichkeit der Verwendung des Gerätes soll im Folgenden diskutiert werden. Ob die Annahme richtig ist, lässt sich erst am Gerät feststellen. Allerdings könnte der Sitz des runden Einsatzes in dem Messingsteg über die Jahre korrodiert sein, sodass eine Überprüfung etwas Anti-Korrosionsmittel und Nachdruck erfordert.

Wir nehmen also an, dass nach dem Umbau der Turm sich nicht mit dem drehbaren unter ihm befindlichen Teilen mitdrehte. In ihm befand sich ein an der Spitze befestigter Torsionsdraht, an dem in der Ebene der $\pm 10^\circ$ -Skala einen nichtmagnetischer Zeiger und in der Ebene des Spulen-Meridians eine Magnetnadel angebracht war. Möglicherweise war unterhalb der Nadel ein kleine Welle angebracht, die zur Stabilisierung diente und von dem unteren Dorn geführt wurde.

Der in der Dokumentarion erwähnte „Eisenkern“ ist denkbar ungeeignet für ein Nadelgalvanometer. Denn für ihn würde ein magnetische Moment $M \propto I$ induziert und damit würde das Drehmoment auf die Eisennadel $N \propto I^2$ sein, das heisst die Ablenkung der Magnetnadel

wäre proportional dem Quadrat des Stromes. Die magnetische Hysterese, insbesondere die Remanenz, würde den eigentlich benötigten linearen Zusammenhang zusätzlich stören. Daher wird für Magnetnadeln Stahl verwandt, das heisst Eisen mit etwa 5% Kohlenstoffbeimischung. Vermutlich ist die ursprüngliche Magnetnadel verlorengegangen und später durch jemanden, der das Gerät nicht richtig interpretiert hat, durch den Eisenkern ersetzt worden.

Abbildung 6 zeigt das Vektor-Diagramm für dieses Nadel-Galvanometer. Die Bedeutung der Vektoren ist die gleiche wie in den vorangegangenen Abschnitten. Die Magnetnadel richtet sich bei Einschalten des Stroms gegen die Torsion des Drahtes in Richtung der Resultierenden $\vec{R} = \vec{H}_0 + \vec{H}_1$ aus. Wir wollen nun zeigen, dass man das Spulenpaket mit der $\pm 10^\circ$ -Skala so verdrehen kann, dass der Winkel $\delta\phi$ zwischen dieser Skala und der Resultierenden verschwindet. Dann ist die Magnetnadel wieder auf die Achse der Skala orientiert und sieht das gleiche effektive Feld für alle Ströme.

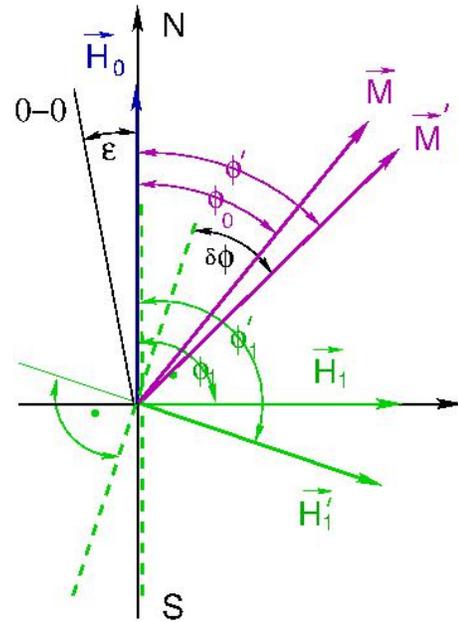


Abbildung 6. Vektor-Diagramm zum Nadel-Galvanometer. Bezeichnungen wie in Abb.2. Die gestrichelte Linie zeigt die 0° -Achse der $\pm 10^\circ$ -Skala. Sie steht immer senkrecht auf der Feldrichtung von \vec{H}_1 , da sie mit dem Spulenpaket fest verbunden ist. Die eingezeichneten Richtungen, Grössen und Winkel werden im Text erklärt.

Das Drehmoment auf das magnetische Moment \vec{M} durch das resultierende Feld \vec{R} ist gegeben durch

$$\vec{N} = \vec{M} \times \vec{R} = \vec{M} \times \vec{H}_0 + \vec{M} \times \vec{H}_1. \quad (6)$$

Der Winkel zwischen \vec{M} und \vec{H}_0 ist $\phi_0 \pm \epsilon$, der zwischen \vec{M} und \vec{H}_1 ist $(90^\circ - \phi_0)$. Die Richtung 0-0 in Abb. 6 ist die Nulllage für den nichttordierten Aufhängedraht ohne Erdmagnetfeld. Das positive Vorzeichen für ϵ gilt, wenn

das Drehmoment des Erdmagnetfeldes \vec{H}_0 und des zu messenden Feldes \vec{H}_1 gleichgerichtet, das negative, wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind. Für das Drehmoment auf die Nadel folgt somit:

$$N = |\vec{M} \times \vec{R}| = MH_0 \sin(\phi_0) + MH_1 \sin(90^\circ - \phi_0) \quad (7)$$

(Diese Gleichung enthielt in der ersten Version einen irrtümlichen Summanden $\pm \varepsilon$ im Argument des ersten Sinus.) Dies Drehmoment wird durch die Torsion des Aufhängedrahtes aufgenommen, sodass im Gleichgewicht

$$N = D^*(\phi_0 \pm \varepsilon) = MH_0 \sin(\phi_0) + MH_1 \sin(90^\circ - \phi_0) \quad (8)$$

ist, wo D^* das Richtmoment des tordierten Drahtes ist. Dreht man nun das Spulenpaket und damit das Feld \vec{H}_1 zu einem Winkel ϕ' dann gilt entsprechend (siehe Abb. 6):

$$N' = D^*(\phi' \pm \varepsilon) = MH_0 \sin(\phi') + MH_1 \sin(\phi'_1 - \phi') \quad (9)$$

Aus Abb. 6 liest man ab: $\phi' = (\phi'_1 - 90^\circ + \delta\phi)$. Durch Einsetzen in Glchg. (9) folgt:

$$D^*(\phi' \pm \varepsilon) = MH_0 \sin(\phi') + MH_1 \cos \delta\phi. \quad (10)$$

Die oben geforderte Orientierung der Magnetnadel bedeutet $\delta\phi = 0$, sodass sich

$$D^*(\phi' \pm \varepsilon) = MH_0 \sin(\phi') + MH_1 \quad (11)$$

ergibt. Diesen Zusammenhang bekommt man auch direkt indem man das Drehmoment auf die Magnetnadel durch die Spule dem durch die Torsion des Drahtes gleichsetzt, wobei \vec{M} senkrecht zur Richtung von \vec{H}_1 , dem Feld der Spulen, steht und damit das Drehmoment auf \vec{M} maximal ist.

Diese Formel war für die Mitte des 19. Jahrhunderts sehr mühsam anzuwenden (siehe [5]). Wir wollen zwei vereinfachende Fälle anführen:

- Vernachlässigung des Erdmagnetfeldes $H_0 \ll H_1$
Dann gilt $\varepsilon \approx 0$ und somit

$$\phi' = \frac{MH_1}{D^*} \quad (12)$$

Bei einem Strom $I = 0$ steht die Magnetnadel und der Zeiger über dem Spulenpaket auf 0° der $\pm 10^\circ$ -Skala beim Winkel Φ_0 auf der 360° -Skala. Mit eingeschaltetem Strom liest man den Winkel Φ_1 ab, sodass wieder $\phi' = \Phi_1 - \Phi_0$ ist. Dann dreht man für die angenommene Modifikation des Gerätes das Spulenpaket zusammen mit der $\pm 10^\circ$ -Skala soweit, dass die 0° dieser Skala bei eingeschaltetem Strom wieder mit der Nadel übereinstimmt. Den Strom berechnet man nach

$$I = \frac{l D^*}{n M} \phi' \quad (13)$$

mit der an der 360° -Skala abgelesenen Winkeldifferenz ϕ' . Die Methode ist so auf grosse Magnetfelder und damit Ströme begrenzt.

- astatische Magnetnadel

Eine genauere Möglichkeit vom Einfluss des Erdmagnetfeldes frei zu kommen, ist die Verwendung der bereits erwähnten „astatischen Magnetnadel“. Damit erweitert man den Anwendungsbereich zu kleineren Strömen, aber ist natürlich vom absoluten Gauss'schen Masssystem getrennt.

Die Methode entspricht einer Idee von Poggendorff [5], der darauf hinweist, dass die Nadel so immer das gleiche effektive Feld erfährt. Daher ist keine Eichung einer etwaigen Abweichung von der Linearität notwendig. Allerdings muss man D^* und M getrennt bestimmen oder zumindest einen Eichpunkt für einen Strom haben. Ein solcher war damals garnicht so einfach zu bekommen. Bei galvanischen oder Thermo-Elementen hing der effektive Strom durch die Spulen vom grossen Element-Innenwiderstand und dem schlecht bekannten kleinen Spulenwiderstand ab. Diese Schwierigkeiten gibt es bei der Sinus-Bussole (siehe Glchg. (5)) nicht. Das Erdfeld ist für sie das „Normal“, das allerdings, wie gesagt, etwas vom geographischen Ort abhängt.

JOHANN MICHAEL EKLING

Zum Schluss sei noch kurz auf die in der Dokumentation betonte Rolle von Johann Michael Ekling eingegangen.

In der Liste der österreichischen ALBERTINA - Sammlung on-line - findet man:

Person/Institution: Ekling, Johann Michael

Biografische Angaben: keine

Erwähnungen:

- 1839
Kunsthandlung Anton Paterno's Witwe, Anzeige in: Wiener Zeitung, Nr. 270, 23. Nov. 1839, S. 1675: "auf das beste gelungene Daguerre'sche Lichtbilder, so wie Apparate zur Selbstverfertigung" aus der Produktion des "Mechanikus" Johann Michael Ekling aus Erdberg und des Universitätstechnikers Hanaczek
- 1839
"Wer aber seinen [Daguerreotypie-]Apparat aus der ersten Hand beziehen will, der wende sich an den Mechanikus Eckling in Erdberg oder an den tüchtigen Universitäts-Techniker Hanaczek [...], in: L. F-r. [= Leopold Fürstедler], „Der Beobachter in den Straßen und Umgebungen Wiens“, in: DÖZ Nr. 1839, Beilage Nr. 50, Beilage zu Nr. 149: Blätter für geistige Tätigkeit, wissenschaftlicher Erörterungen und nützliche Studien, 13. Dez., 1532-1535, „Das Daguerrotyp“, (1532-1534), 1533
- 1849 (vom vom Autor ergänzt)
Laibacher Zeitung Nr. 137, 1849: Das hohe Ministerium für Handel, Gewerbe und öffentliche Bauten, hat

in Folge eingelangten Decretes vom 27. September l. J. , z. 6549, an diesem Tage die nachfolgenden Privilegien verliehen: 1) Dem Johann Michael Ekling, Mechaniker, wohnhaft in Wien, Landstraße Nr. 109, für die Dauer von einem Jahre, auf die Verbesserung an dem Inductions-Apparate, welche darin bestehe, daß 1. der Hebel bloß eine drehende Bewegung um eine fixe Axe erlaube; 2. durch eine eigene Stell- Vorrichtung der Gang leicht eingeleitet und vollkommen geregelt, und 3. durch eine besondere Vorrichtung ohne Aenderung an den Mitteln doch die Wirkung bedeutend modificirt werden könne, endlich 4. durch ein eigenthümliches Verhältniß in den Multiplications-Drähten das günstigste Resultat erzielt werde, ohne daß diese Apparate voluminöser seyen als die bisher von ihm erzeugten.

Hier werden mechanische Elemente erwähnt, die auch im fraglichen Gerät vorhanden sind.

- *In der Dokumentation wird noch eine Information aus dem Wiener Stadt-Archiv ohne Datum zitiert: Johann Michael Ekling hatte das Privileg zur „Verbesserung der vorherigen (beschnittenen?) Electro-galvanischen Induktions Apparaten, wodurch dieselben kompender, in ihrer Wirkung kräftiger und so eingerichtet seyen, dass man jede wünschenswerthe Stromstärke herstellen könne.“*

Aktivität/en: 1839 - 1860

Mechaniker in Erdberg, der im Dez. 1839 eine Daguerreotypie-Kamera herstellt; liefert bis Anfang der 1860er Jahre Objektive, vornehmlich für Porträts

Beruf, Titel: 1840 - 1846

„Maschinen-Macher“ für „alle Arten mathematische, physikalische und chemische Instrumente und Apparate“ in Wien, Stadt, Jacobergasse 809 (1840), „physikalische und optische Instrumente“, Landstraße, Erdbergstraße 109, Gewölb: Stadt, Jakobergasse 809 (1845, 1846)

Weiter findet man in der damals führenden Fachzeitschrift, den „Annalen der Physik“ im Jahre 1881 nur eine Erwähnung, die einer „guten Ekling’schen Pumpe“. Johann Michael Ekling war wohl ein „Mechanikus“, der eine feinmechanische Werkstatt in Wien betrieb, in der nach Vorgaben der Wissenschaftler physikalische Geräte gebaut wurden. Das Gerät ist wie schon aus den Photos der Dokumentation ersichtlich von hervorragender feinmechanischer Qualität, der Umbau dagegen eher schlechte Arbeit.

Der „Mechanikus“ Johann Michael Ekling arbeitete also an der damals gerade neuen Photographie, als Mechaniker und konnte auch mit Spannungen und Strömen umgehen, eine beeindruckende Palette.

ERGÄNZUNG ZUM WIKIPEDIA-BEITRAG VOM 26.02.2014

Nach der Entscheidung über die Ausschreibung zur Erklärung des „unbekannten Technikfundstücks“ wurde in Wikipedia [8] ein zweites fast baugleiches Exemplar (Ekling, Wien 1834), mit der Serien-Nummer 3, das sich in der historischen Sammlung der Fakultät Physik der Universität Wien befindet, veröffentlicht. Dieses zweite Exemplar bietet zusätzliche Information und erlaubt einige Einschränkungen der möglichen Verwendung.

Der Turmaufbau beider Exemplare ist von genau gleicher Höhe und guter mechanischer Qualität. Die Einsätze am Turmkopf sind sehr ähnlich. Die Ausführungen im Abschnitt zur „Sinus-Busssole“ bleiben zwar physikalisch-technisch gültig, aber die spätere Hinzufügung eines Turms ist durch die neue Information unwahrscheinlicher geworden. Das unterschiedliche Aussehen der Türme kann von einer Renovierung des Wiener Exemplars herrühren, während das Augsburger Exemplar über die Zeit äusserlich korrodiert ist. Die angelötete Stativklammer fehlt beim Wiener Exemplar und ihr Zweck kann nach wie vor der im vorstehenden Text beschriebene sein:

- Realisierung der Idee von Poggendorf die Magnetnadel immer in der gleichen Ort relativ zum Spulenpaket zu verwenden
- einen Hilfsmagneten zu halten
- das Gerät gegen Erschütterungen zu stabilisieren

Der Dorn im Glasansatz, die den Anlass zur Interpretation „Sinusbusssole“ gab, könnte auch zur Stabilisierung der an einem Faden aufgehängten Magnetnadel gegen seitliche Schwingungen gedient haben. Allerdings erforderte dies eine sehr präzise Einstellung der Nadelhöhe, die vermittels der Rändelschraube, die am oberen Einsatz des Turms des Wiener Exemplars sichtbar ist, hätte vorgenommen werden können.

Ein Leitmotiv dieser Interpretation war die Zuordnung der 360°-Skala. Eine so aufwendige Skala mit Nonius, Schneckengetriebe, und Lupenablesung muss einen Zweck gehabt haben. Das Problem liegt darin, dass der obere Teil des Gerätes bis zur vertikalen Achse in der Wiener Version und in der Augsburger Version, wenn man die Stativklammer vernachlässigt, eine sehr ähnliche Einheit bildet. Das heisst alle an der runden Montageplatte befestigten Elemente können nicht relativ zueinander bewegt werden: das Spulenpaket, genannt „Multiplikator“, der Turm mit Aufhängepunkt des Torsionsfadens und die $\pm 10^\circ$ -Skala. Diese Einheit stellt wie diskutiert ein Nadelgalvanometer dar, das mit dem Drehkranz der 360°-Skala relativ zur Horizontalkomponente des Erdfeldes gedreht werden kann. Wenn man nun eine normale Magnetnadel und einen Zeiger für die $\pm 10^\circ$ -Skala benutzt, gelten die Überlegungen des Abschnittes „Nadelgalvanometer“ und insbesondere die Glgch. (8). Ohne

Strom ist $H_1 = 0$ und damit:

$$D^*(\phi_0 + \varepsilon_0) = MH_0 \sin(\phi_0), \quad (14)$$

wobei $\phi_0 = \Phi_0 - \Phi_{00}$. (Zur Erinnerung, der Winkel Φ war der auf der 360°-Skala abgelesene, ϕ die Winkeldifferenz. Wie man gleich sieht, gehen nur Winkeldifferenzen ein, sodass die Nullpunkte der Winkel Φ_{00} und ε_{00} sich herausheben.) Im Gleichgewicht des Torsionsmoment und des Drehmoments auf das magnetische Moment M durch das Erdfeld H_0 liest man Φ_0 auf der 360°-Skala und ε_0 auf der $\pm 10^\circ$ -Skala ab. Wenn man nun das gesamte Galvanometer mit dem Aufhängepunkt des Torsionsfadens im Turm gegenüber der Richtung des Erdfeldes um ϕ dreht, stellt sich ein neuer Gleichgewichtswinkel ε_1 ein, der auf der $\pm 10^\circ$ -Skala abgelesen werden kann. Zur Vereinfachung der Diskussion werden nur kleine ϕ betrachtet, so dass man Glchg. (14) mit der Näherung $\sin(\phi_0) \approx \phi_0$ auflösen kann:

$$\delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0 = (H_0(M/D^*) - 1)\phi \quad (15)$$

Das bedeutet, dass man $\phi = \Phi_1 - \Phi_0$ variieren und genau auf der 360°-Skala ablesen und dann die Differenz der zugehörigen Gleichgewichtswinkel $\delta\varepsilon$ mit der $\pm 10^\circ$ -Skala bestimmen kann. Aus der Steigung des linearen Zusammenhangs kann man das Verhältnis D^*/M berechnen, da H_0 bekannt ist. Dann leuchtet auch die Möglichkeit der schnellen Verdrehung um 360° ohne Schneckenantrieb ein, da man somit die Magnetnadel zunächst grob auf die Horizontalkomponente des Erdfeldes ausrichten kann ohne das ausnivelierte Gerät nochmals zu bewegen.

Man sieht aus der Glchg. (8), dass das Verhältnis D^*/M genau für die Strom-Messung über H_1 mit dem Nadelgalvanometer gebraucht wird. Man kann damit also das Galvanometer experimentell mit H_0 als Normal eichen. Es muss hierzu nochmals betont werden, dass die Eichung solcher Galvanometer in der Mitte des 19. Jahrhunderts ein grosses Problem darstellte [3], da es keine Ampère-Meter wie heute im nächsten Elektronik-Shop zu kaufen gab.

Allerdings bleibt die Verwendung des Gerätes als „Multiplikator nach Nobili (astatisches Nadelgalvanometer)“

[8] physikalisch unverständlich. Bei der Verwendung einer „astatischen Nadel“, bei der der Zeiger eine der eigentlichen Nadel in dem „Multiplikator“ entgegengesetzt magnetisierte Nadel mit gleichem magnetischen Moment ist, gibt es die beschriebene Verwendung der 360°-Skala nicht. Zwar wird die Kompensation der beiden Nadeln nie ganz exakt sein und man könnte auch ein Verhältnis D^*/M' , wo M' das residuelle magnetische Moment der astatischen Nadel ist, bestimmen, aber das brächte keinen Gewinn für die Verwendung zur Strommessung. Denn hierbei geht nur M für die Nadel im Spulenpaket und für die Zeigernadel ein zusätzliches gleichgerichtetes Drehmoment durch das äussere Feld der Spule ein. Diese beiden Spezifitäten des astatischen Nadelgalvanometers machen eine sorgfältige Eichung notwendig [3, 5], deren Schwierigkeit zur damaligen Zeit bereits im ursprünglichen Text diskutiert wurde.

Genauereres könnte nur ein Studium der Literatur zwischen 1834 und später, in der Anwendungen des Ekling'schen Galvanometers dargestellt werden und/oder die Demontage beider Instrumente ergeben.

-
- [1] C.F. Gauss, Annalen der Physik Bd.104, Nr. 6, pp. 241–273, 1833
 - [2] C.F. Gauss, Annalen der Physik Bd. 104, Nr. 8, pp. 591–615, 1833
 - [3] Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, Vierter Band - Erster Teil, 11. Auflage, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1932
 - [4] F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 9. Auflage, Verlag B.G. Teubner, Leipzig und Berlin 1901
 - [5] J.C. Poggendorff, Annalen der Physik, Bd. 132, Nr. 6, pp. 324–344, 1842
 - [6] J.C. Poggendorff, Annalen der Physik, Bd. 126, Nr. 7, pp. 504–509, 1840
 - [7] J. Bosscha, Annalen der Physik Bd. 169, Nr. 11, pp. 392–406, 1854
 - [8] url: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ekling>, 26.02.2014