

Zur möglichen Funktion des "Gerätes von Johann Michael Ekling"

Thilo Weitzel

Bern, Dezember 2013

Kontext und Fragestellung

Am Holbein-Gymnasium (Augsburg) wurde ein historisches Messgerät (Abb. 1) aufgefunden, dessen genaue Funktion nicht bekannt ist [1].

Das Gymnasium fragt [2]:

- Was ist das für ein Apparat und wie wurde er verwendet ?
- Wie funktioniert der Apparat und wozu dienen die Bauteile ?

Recherche

Im Prinzip handelt es sich zweifelsfrei um ein Galvanometer mit einem um eine vertikale Achse frei drehbaren und magnetisierten Eisenstab, der im Inneren von bzw. zwischen zwei Spulen gelagert war [1]. Verwandte Geräte wurden in den 1960-er und 1970-er Jahren in vielen Kinderzimmern als Universalmessgerät eingesetzt (Anlage 1). Die Entdeckung des Messprinzips im Jahr 1820 wird Oerstedt zugeschrieben [3], ein erster vergleichbarer Aufbau war dann 1825 die Ohmsche Drehwaage [4] (Anlage 1). Eine genaue Beschreibung von Funktionsweise und Anwendung der „Galvanometer als Messwerkzeuge“ erfolgt 1926 durch Poggendorf [5]. Die Bauform des Gerätes mit den Spulen auf einer drehbaren Plattform legt insbesondere nahe, daß das Verfahren von Poggendorf zur „Regulierung der Galvanometerskale“ verwendet wurde (Anlage 2).



Abb. 1: Das Gerät

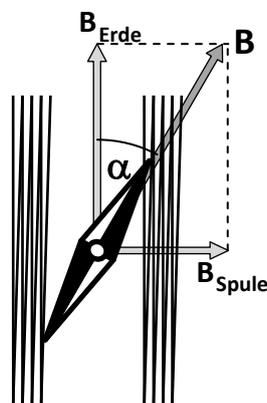


Abb. 2: Galvanometer

Theorie

Um mögliche Anwendungsbereiche eingrenzen zu können wird zunächst der Messbereich des Gerätes als Strom-Messgerät abgeschätzt (Abb. 2)(Anlage 3). Die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes beträgt etwa $20 \mu\text{T}$ und zeigt etwa nach Norden (B_{Erde}), die Spulen haben (angenommen o.B.d.A.) zusammen 100 Windungen und ihr Magnetfeld (B_{Spule}) steht quer zum Erdmagnetfeld. Die beiden Magnetfelder überlagern sich vektoriell zu einem resultierenden Magnetfeld („B“), dessen Richtung durch den o.g. magnetisierten Eisenstab angezeigt wird. Einfache Berechnung (Anlage 3) ergibt für die Spulen eine Feldstärke von etwa 4 MicroTesla bei 1 mA und eine zugehörige Auslenkung des Eisenstabes von etwa $\alpha = 11^\circ$ (i.e. „Vollausschlag“ bei etwa 1 mA Stromstärke).

Mögliche Anwendungen

Der am Gerät ablesbare Auslenkwinkel des Eisenstabes ist ein Maß für das Verhältnis zwischen dem Erdmagnetfeld und dem durch einen elektrischen Strom erzeugten Magnetfeld der Spulen. Bei bekanntem Strom wird eine (grobe) Messung (der horizontalen Komponente) des Erdmagnetfeldes möglich, bei bekanntem und als konstant vorausgesetztem Erdmagnetfeld kann umgekehrt die Stromstärke bestimmt werden. Durch einfache externe Beschaltung mit Widerständen und Spannungsquellen wird damit auch die Bestimmung von elektrischen Spannungen, Widerständen und sogar die Messung von Strompulsen, Kapazitäten oder Ladungsmengen möglich.

Nachbau und Experimente

Zur weiteren Evaluation wurde das Gerät nachgebaut (Abb.3) (Anlage 4) und in unterschiedlichen Anwendungen getestet (Anlage 5). Die Experimente bestätigen hervorragend die Berechnungen und durch die praktische Arbeit am Nachbau konnten die Funktion und Notwendigkeit aller Bedienelemente sowie weitere Eigenheiten des Gerätes geklärt werden.

Schlussfolgerungen

Die Experimente (Anlage 5) lassen vermuten, dass das Gerät für elektrische Messungen, am ehesten für einen Nullabgleich in jedweder Art von Brückenschaltung geeignet war. Weiter ist ein empfindlicher Nachweis von Stromstößen möglich. Eine solche Anwendung als frühe Version eines elektrischen „Multimeters“ erscheint auch im Kontext der bekannten Arbeiten von Johan Michael Ekling [1] plausibel.

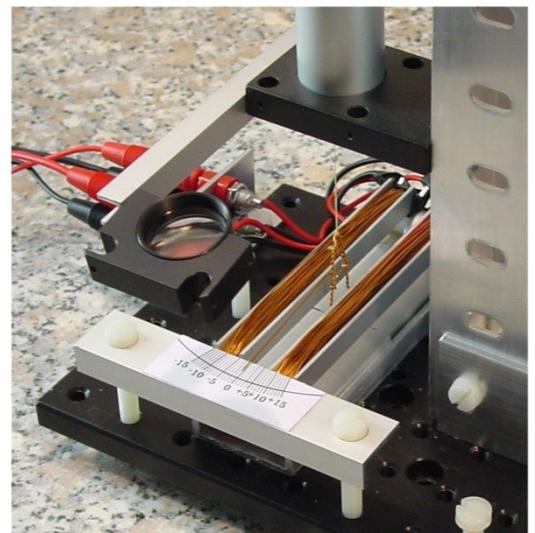


Abb. 3: Nachbau des Gerätes

[1] „Dokumentation über ein Gerät von Johann Michael Ekling“; <http://www.holbein-gymnasium.de>; (download 20.11.13)

[2] „Ausschreibung: Wer erklärt das unbekannte Technikfundstück?“; <http://www.holbein-gymnasium.de>; (download 20.11.13)

[3] Oerstedt HC: „Ein electrisch-magnetischer Versuch“, Annalen der Physik und physikalischen Chemie. 1823; Band 73, S. 278

[4] Ohm GS: „Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelectricität leiten“ Ann.Phys.Chem. 1825, Band 80, S. 79–88.

[5] Poggendorff JC: „Von dem Gebrauch der Galvanometer als Messwerkzeuge.“ Ann.Phys.Chem. 1826; Band 132, S 324–344

Anlage 1: Kompass-Galvanometer und Ohmsche Drehwaage

Der Autor fühlte sich beim Lesen der Ausschreibung unmittelbar an eigene Experimente aus seiner Kindheit erinnert. Nach kurzer Suche fand sich in einer mit „alte Messgeräte“ beschrifteten Schachtel das nebenstehend abgebildete „Kompass-Galvanometer“. Leider ist die ursprüngliche Kompass-Nadel verloren gegangen, so dass dieses Gerät nicht mehr in Betrieb genommen werden konnte.

Die abgebildete Ausführung war Anfang der 1970er Jahre Teil des „KOSMOS Elektronik-Labor XG“ der Firma Kosmos.

Diesen „Lehr-Spielzeugen“ mit ausführlicher Anleitung und fundierten Erklärungen verdankt der Autor praktisch eine frühe Grundausbildung in Elektronik. Leider scheinen derart umfangreiche und durchaus auch mit Theorie belastete Spielzeuge aus der Mode gekommen zu sein ...

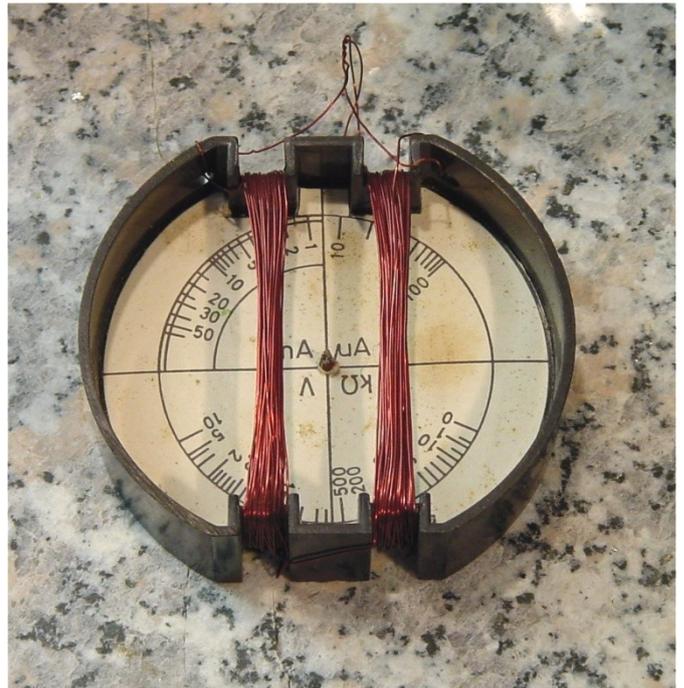


Abb. 1.1: Kompass-Galvanometer

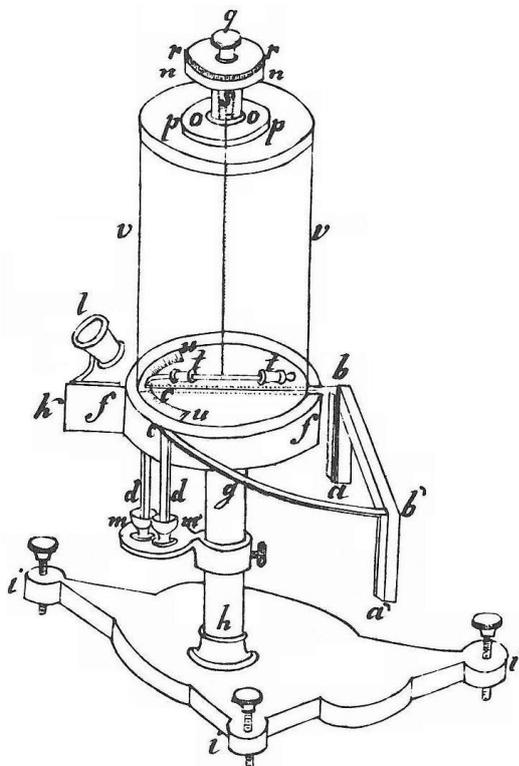


Abb. 1.2: Ohmsche Drehwaage

Das von Ohm bei seinen Untersuchungen zur magnetischen Wirkung des Stroms verwendete Galvanometer [4],[2.1] (Abb. 1.2) zeigt bereits einige Merkmale des Gerätes:

Insbesondere sind dies:

- Der magnetisierten Eisenstab (t)
- Die drehbare Aufhängung (q,r,n) mit einem Faden
- Der Glaszylinder (v)
- Ein Okkular (l)
- Die Stellschrauben (i) für die horizontale Ausrichtung

An Stelle der Spulen wird von Ohm nur ein einzelner Draht verwendet. Die verstellbare Anordnung (a, a', b, b') zur Abnahme des Stroms an unterschiedlichen Stellen eines Drahtbügels (g) diente den Untersuchungen Ohms.

Der Anschluss der Apparatur erfolgte über kleine mit Quecksilber gefüllte Schalen (m, d).

Das Galvanometer nach Poggendorf [5] sieht anstelle des Drahtes die üblichen zwei Spulen vor. Für das von Poggendorf entwickelte Eichverfahren umfasst ein derartiges Gerät weiter einen Mechanismus für eine Drehung des Apparates um genau einstellbare Winkel um eine senkrechte Achse.

Anlage 2: Das Verfahren von Poggendorf zur „Regulirung der Galvanometerskala“

Poggendorf beschreibt 1826 [5] ein Verfahren zur Eichung der Skala eines Galvanometers.

Dabei werden die Spulen gedreht, i.e. es werden Messungen durchgeführt bei unterschiedlichen Winkeln zwischen der Achse der Spulen und der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes. Poggendorf gelingt so eine Eichung des Galvanometers unter Verwendung nur einer einzigen konstanten Stromstärke.

Voraussetzung ist eine Möglichkeit zur genauen Ausrichtung der Spulen, was die drehbare Lagerung des aufgefundenen Gerätes erklärt.

Hier wiedergegeben werden zwei bemerkenswerte Ausschnitte aus der Publikation [5] von Poggendorf von 1826.

Aus diesen Andeutungen wird zur Genüge erhellen, daß eine tadelfreie Methode zur Bestimmung der Intensitätsskala der Galvanometer bisher noch nicht gegeben ward. Freilich könnte man sagen, sie sey auch überflüssig, da selbst das beste Galvanometer immer nur ein mittelmäßiges Meßwerkzeug abgibt, und für genaue Untersuchungen gegenwärtig die Spiegel-Apparate und die Sinusbussole vorhanden sind. Allein die letzteren Instrumente sind sehr kostbar, nicht jeder Physiker kann über sie verfügen, und überdies giebt es noch jetzt eine beträchtliche Zahl von Untersuchungen, bei denen eine Genauigkeit von einem halben bis ganzen Grad in den Ablenkungen der Magnetnadel zu allen Zwecken vollkommen ausreicht.

Daher glaube ich Manchem einen nicht unwillkommenen Dienst zu erweisen, wenn ich eine Methode zur Regulirung der Galvanometerskala beschreibe, die, wie mir scheint, allen Ansprüchen genügt. Sie ist bequem, sicher und allgemein anwendbar, hat auch schon darin einen wesentlichen Vorzug vor allen bisher bekannten, daß sie zu ihrer Ausübung nur einen einzigen Strom von constanter Stärke verlangt¹).

IX. Von dem Gebrauch der Galvanometer als Meßwerkzeuge; von J. C. Poggendorff.

(Weitere Ausführung einer am 20. Juni d. J. in der Academie vorgelegten Notiz.)

Wie bekannt entsprechen die Galvanometer ihrem Namen sehr unvollkommen, indem sie geradezu für die Stärke der elektrischen Ströme nur ein unsicheres und beschränktes Maafs gewähren. Selbst innerhalb der ersten zehn oder zwanzig Grade, für welche man in der Regel die Ablenkungen der Magnetnadel als proportional den Stromstärken glauben zu dürfen, ist die Beziehung zwischen diesen beiden Elementen streng genommen nicht so einfach oder leicht bestimmbar, und darüber hinaus wird sie vollends so verwickelt, daß man sie kaum noch theoretisch festzusetzen vermag.

Ganz unnötig wäre dies zwar nicht: hätte man alle erforderlichen Data (Länge und Gestalt der Drahtwindungen, Lage und Abstand derselben rücksichtlich der Magnetnadel, Größe, Gestalt und magnetische Vertheilung der letzteren), so liefse sich allerdings nach den zuerst von Ampère gegebenen Formeln eine solche Bestimmung ausführen; allein die Rechnung wäre außerordentlich weiltäufig und mühsam.

Das Princip dieser Methode läßt sich in wenig Worten aussprechen. Sie beruht nämlich darauf, daß man die Ablenkungen, welche die Drahtwindungen, im magnetischen Meridian liegend, bei verschiedener Stärke des durchgeleiteten Stroms, der Magnetnadel ertheilen, herleiten kann aus denjenigen, welche sie, von einem und demselben Strom durchflossen, aber unter verschiedene Winkel gegen den magnetischen Meridian gestellt, auf dieselbe Nadel ausüben.

Wie dieses möglich sey, mag folgende geometrische Betrachtung erläutern. Die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus eine aus dem Meridian abgelenkte Magnetnadel in diesen zurückzuführen strebt, ist bekanntlich gleich dem Producte dreier Factoren, der Intensität des Erdmagnetismus, der magnetischen Intensität der Nadel und des Sinus des Ablenkungswinkels. Man kann also diese Kraft vorstellen durch eine Curve MN (Fig. 4 Taf. II), welche die Bogen zu Abscissen, und die Sinus der Bogen oder die diesen Sinus proportionalen Producte zu Ordinaten hat.

Anlage 3: Theorie und Berechnungen

Ampèresches und Biot-Savartsches Gesetz

Gemäss dem nach Ampère benannten Gesetz [3.1] erzeugt ein von einem elektrischen Strom I durchflossener Leiter ein Magnetfeld B (Abb. 3/1).

Die Stärke dieses Feldes kann für beliebig geformte Leiter nach dem Biot-Savartschen Gesetz [3.2] durch eine Summe bzw. ein Integral über die jeweiligen Ströme berechnet werden.

Für die Stärke des B -Feldes in einem Abstand r von einem (unendlich) langen, geradlinigen Leiter, der von einem Strom I durchflossen wird ergibt sich:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r}$$

Mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$, einer Angabe des Stroms I in Ampere und einer Angabe des Abstandes r in Meter wird die magnetische Feldstärke in der Einheit $\frac{N}{A \cdot m}$ i.e. Tesla berechnet.

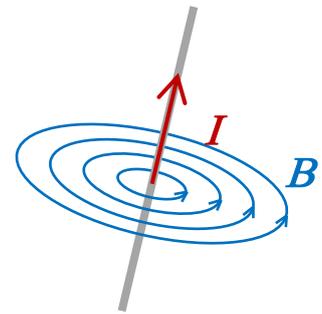


Abb. 3.1: Magnetfeld um einen Leiter

Rahmenspule

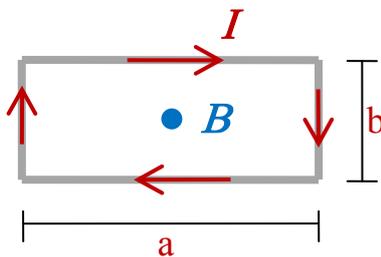


Abb. 3.2: Rahmenspule

Aus dem Biot-Savartschen Gesetz kann eine einfache Formel abgeleitet werden, mit deren Hilfe das Magnetfeld im Inneren einer Rahmenspule (Abb. 3.2) mit den Kantenlängen a und b und mit einer Anzahl n Windungen berechnet werden kann [3.2].

$$B = n \frac{\mu_0 I}{2 \pi} 4 \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$$

In der dargestellten Schreibweise lässt die Formel noch erahnen, wie das Feld aus den 4 Teilstücken des elektrischen Leiters zusammengesetzt wird.

Muster-Rechnung für das Feld der Spulen im Gerät

Es werden ohne Beschränkung der Allgemeinheit folgende Annahmen getroffen:

- Das Gerät besitzt zwei Rahmenspulen mit jeweils 50 Windungen
- Die Spulen haben die Abmessungen $a = 10 \text{ cm}$ und $b = 2 \text{ cm}$
- Der Abstand der Spulen sei 1 cm , also kleiner als b und viel kleiner als a . Damit wird angenommen, dass die beiden Spulen näherungsweise als eine einzelne Spule mit 100 Windungen betrachtet werden können.
- Das Feld im Inneren bzw. zwischen den Spulen ist in erster Näherung homogen.

Die Rechnung wird beispielhaft für eine Stromstärke von 1 mA durchgeführt:

$$B = 100 \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot 10^{-3} A}{2 \pi} 4 \sqrt{\frac{1}{0,1^2 m^2} + \frac{1}{0,02^2 m^2}} = 4,08 \cdot 10^{-9} \frac{N}{A \cdot m} \approx 4 \mu T$$

Der Zusammenhang zwischen B und I ist linear. Die Spulen mit den angenommenen Parametern sollten daher ein Magnetfeld von etwa $4 \mu T$ pro mA Strom erzeugen.

[3.1] [Wikipedia: „Ampèresches Gesetz“](#)

[3.2] [Wikipedia: „Biot-Savart-Gesetz“](#)

Messbereich des „Kompass-Galvanometers“

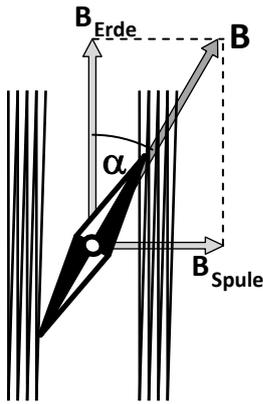


Abb. 3.3: Magnetfelder

Die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes beträgt in Mitteleuropa etwa $20 \mu\text{T}$ und zeigt etwa nach Norden (B_{Erde}) i.e. in Richtung des sogenannten magnetischen Nordpols der Erde [3.3].

Die Spulen sind so angeordnet, dass das Magnetfeld (B_{Spule}) im Inneren der Spulen horizontal und quer zum Erdmagnetfeld ausgerichtet ist.

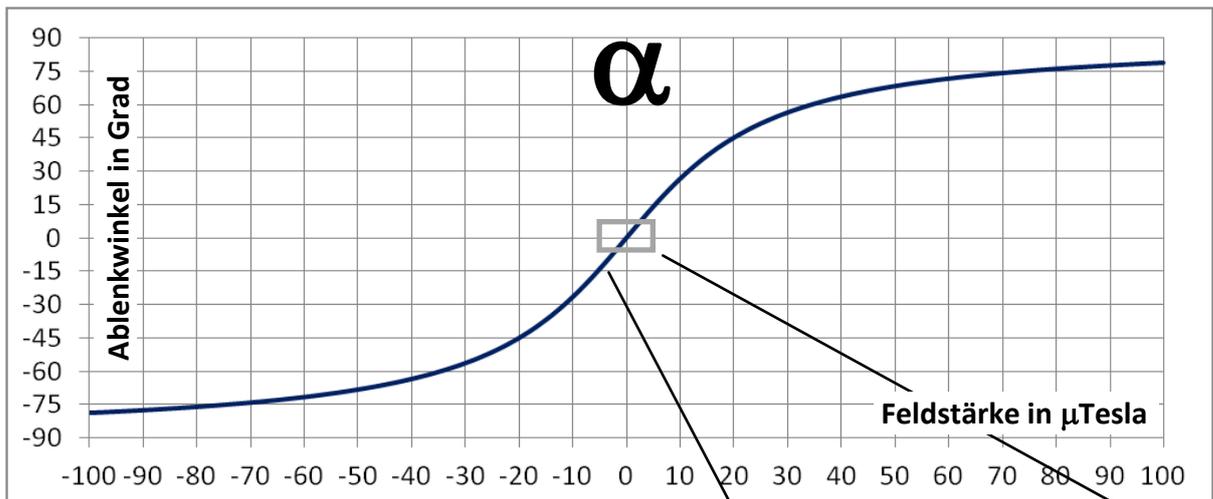
Die beiden Magnetfelder überlagern sich vektoriell zu einem resultierenden Magnetfeld („ B “), dessen Richtung durch eine Kompassnadel oder den genannten magnetisierten Eisenstab angezeigt wird (Abb. 3.3).

Für den Ablenkwinkel α folgt daraus unmittelbar

$$\tan(\alpha) = \frac{B_{\text{Spule}}}{B_{\text{Erde}}} \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{B_{\text{Spule}}}{20\mu\text{T}}\right)$$

Interessant ist dabei, dass der Ablenkwinkel nicht von der Stärke der Magnetisierung der Kompassnadel bzw. des Eisenstabes abhängt.

Abbildung 3.4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Ablenkwinkel α und der Stärke des Magnetfeldes der Spulen:



Für starke Ströme richtet sich die Magnetnadel praktisch nach dem Feld der Spulen aus, die Ablenkung nähert sich damit je nach Stromrichtung $+90^\circ$ oder -90° .

Für kleine Ablenkwinkel zeigt die Graphik jedoch einen fast linearen Verlauf. Insbesondere kann für den interessierenden Bereich von -10° bis $+10^\circ$ eine etwa lineare Anzeige erwartet werden.

Für das oben berechnete Beispiel resultiert, wie auch in der Graphik ablesbar, ein Ablenkwinkel von etwa 11° bei einem Feld der Spulen von $4 \mu\text{T}$ und der entsprechenden Stromstärke von 1 mA .

Ein entsprechend aufgebautes Galvanometer hat somit einen Messbereich von etwa -1mA bis $+1\text{mA}$.

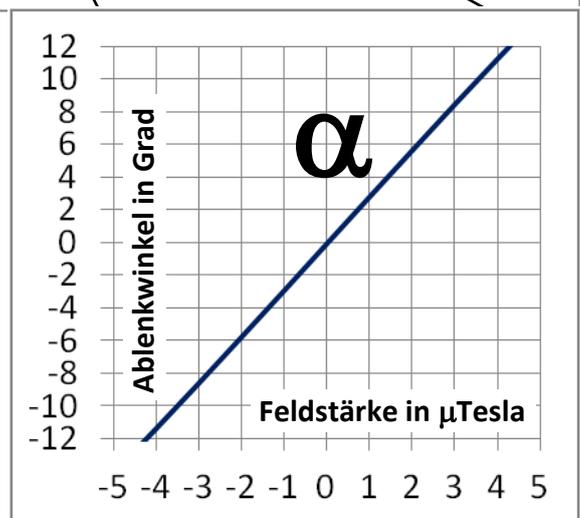


Abb. 3.4: Zusammenhang von Ablenkwinkel und Magnetfeld der Spulen

Anlage 4: Nachbau

Ziel des Nachbaus war der Test von Funktionsweise und Anwendbarkeit des Geräts, keinesfalls eine Kopie des ursprünglichen Aufbaus. Als Material für den Nachbau wurden anstelle von Kupfer oder Messing leichter zu bearbeitende Aluminiumprofile sowie vorgefertigte Aluminiumteile verwendet. Alle Befestigungen erfolgten durch Kunststoffschrauben um jedes magnetisierbare Material zu vermeiden.

Die Spulenkörper der Rahmenspulen (Abb. 4.1) wurden aus rechtwinkligen Aluminium „U-Profilen“ angefertigt. Die Spulenkörper sind 10 mm breit und haben einen freien Innenraum von etwa 15 mm * 95 mm.

Die Spulen selbst wurden aus je 50 Windungen Kupferlackdraht von 0,5 mm Dicke gewickelt. Für die Abmessung der Spulen selbst können etwa Breite 100 mm und Höhe 20 mm angenommen werden.

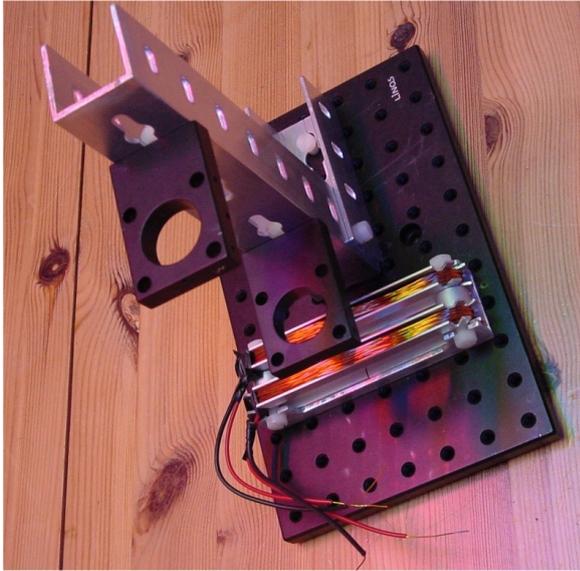


Abb. 4.2: Rohbau

Weitere einfache Halterungen nehmen eine optische Linse ($f=100\text{mm}$) über der Skala sowie geeignete elektrische Steckverbinder am Rand der Grundplatte auf. Die Grundplatte selbst ruht mit drei Schrauben, die eine Höhenverstellung ermöglichen, auf einer weich gelagerten Kunststoffplatte, die den Aufbau vor Erschütterungen schützt. Mit etwas Feingefühl erfolgt die Nord-Süd Ausrichtung durch Drehen des kompletten Aufbaus auf der Kunststoffplatte. Der „Magnetnagel“ hängt an einem sehr dünnen Faden (Nähgarn), der am oberen Ende des Turms durch eine zentrale Bohrung in einem dort aufgesetzten Zylinder geführt wird. An diesem Zylinder befindet sich eine Klemmhalterung zur Befestigung des Fadens. Weiter ist der Zylinder drehbar aufgesetzt, so dass eine eventuelle Torsion des Fadens durch geeignetes Nachstellen des Zylinders beseitigt werden kann.

Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen den betriebsbereiten Nachbau zusammen mit einem Multimeter zur Kontrolle des Stromflusses (Messbereich -2000 bis $+2000 \mu\text{A}$)



Abb. 4.1: Rahmenspulen

Die beiden Spulen wurden in einer geeignet angefertigten Halterung nebeneinander im Abstand von 10 mm auf einer Grundplatte montiert. Weiter wurde eine geeignete Halterung für den Turm angefertigt und auf der Grundplatte montiert (Abb. 4.2).

Als Turm wurde ein Aluminiumrohr mit 25 mm Durchmesser und 480 mm Länge eingesetzt.

Als Magnetnadel wurde ein auf 80 mm Länge gekürzter Nagel aus Eisen (3 mm Durchm.) mit Hilfe eines Neodym-Permanentmagneten magnetisiert. Die Aufhängung wurde aus Kupferlackdraht gebogen wobei ein freies Ende des Drahtes gleichzeitig als Zeiger eingesetzt wird.

Eine geeignete Skala (-15° bis $+15^\circ$) für einen Radius von 60 mm wurde in einfacher Weise am Computer entworfen, gedruckt und auf einer geeigneten Halterung über den Enden der Spulen montiert.

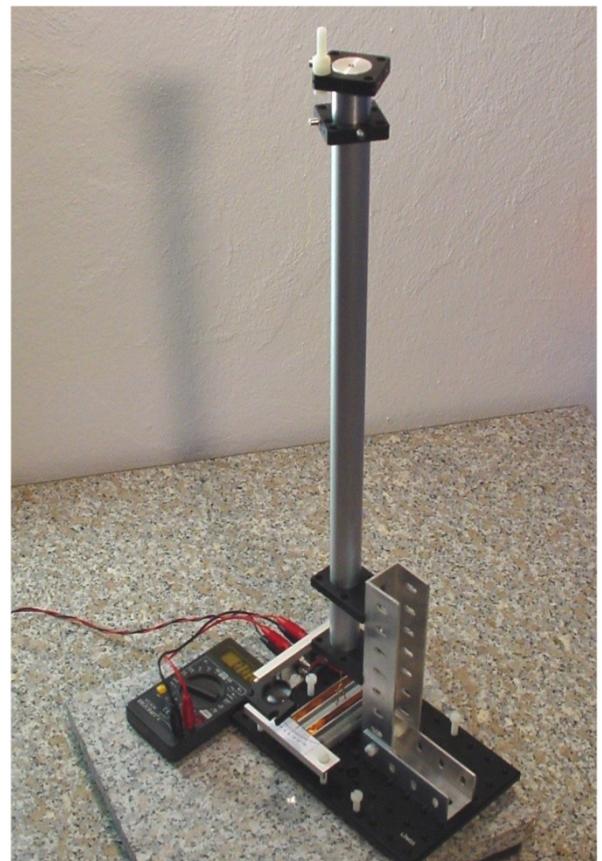


Abb. 4.3: Nachbau

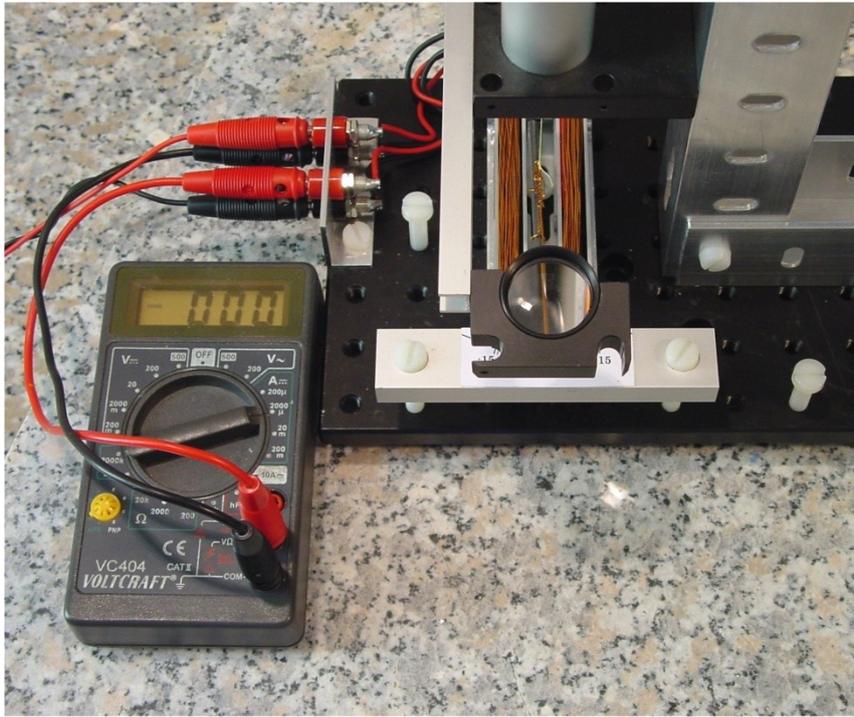


Abb. 4.4: Nachbau und Multimeter

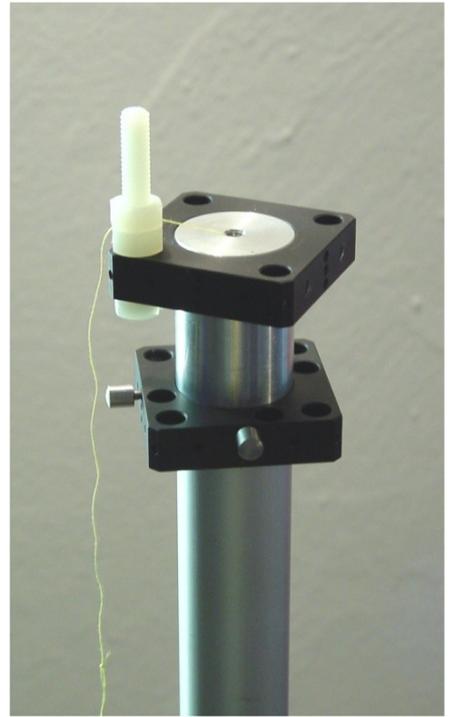


Abb. 4.5: Halterung für den Faden

Abbildung 4.5 zeigt die drehbare Halterung für den Faden.

Abbildung 4.6 zeigt den Blick durch die Lupe auf Zeiger und Skala mit dem Zeiger in Nullstellung.

Weiter ist der frei zwischen den Spulen hängende „Magnetnagel“ zu erkennen.

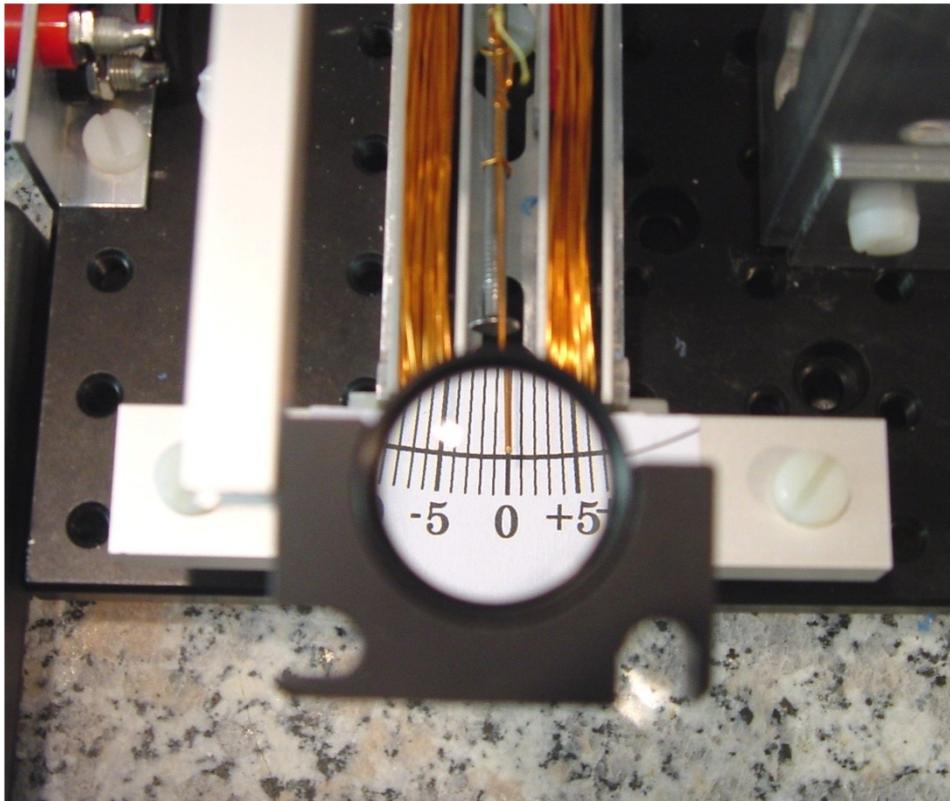


Abb. 4.6: Blick durch die Lupe auf Skala und Zeiger

Anlage 6: Experimentelle Verifikation

Die Experimente geben Hinweise auf die Verwendung der Anordnung und insbesondere auch über Sinn und Zweck der einzelnen Elemente zur Bedienung des Gerätes. Die folgenden Abschnitte beschreiben einige Messergebnisse gefolgt von Anmerkungen zu anhand des Nachbaus des Gerätes gewonnene Erfahrungen und Beobachtungen.

Aufnahme der „Kennlinie“ des Gerätes

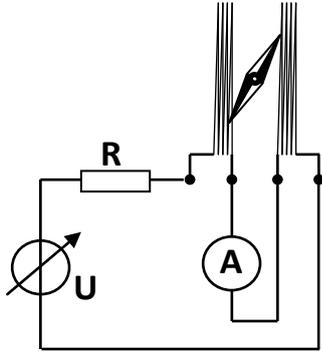


Abb. 5.1: Schaltung für die Aufnahme der Kennlinie

Verwendet wurde ein Labornetzgerät mit einer einstellbaren Spannung U von -20 Volt bis +20 Volt, ein Vorwiderstand R von 10 k Ω sowie ein mit den Spulen in Serie geschaltetes Amperemeter mit einem Messbereich von -2000 μ Ampere bis + 2000 μ Ampere (Abb. 5.1)

Somit können beliebige Stromstärken von -2mA bis +2mA genau eingestellt werden.

Am Nachbau des Gerätes wurden die Ablenkwinkel für Ströme von -1mA bis +1mA mit Schrittweite 0.05 mA abgelesen.

Abbildung 5.2 zeigt zunächst als schwarze Linie die gemäß der einfachen Muster-Rechnung (Anlage 3) etwa zu erwartende Kennlinie mit einer Steigung von 11,3° Ablenkung pro mA Spulenstrom.

Die roten Punkte repräsentieren die tatsächlichen Messwerte. Die rote Linie ist die beste lineare Ausgleichsgerade (least square fit) mit einer Steigung von 13,3° Ablenkung pro mA Spulenstrom und einem Versatz von 0,3° Ablenkung.

Gut erkennbar ist die Unsicherheit bei der Ablesung von etwa $\frac{1}{4}^\circ$ Ablenkung (Standardabweichung 0,20°).

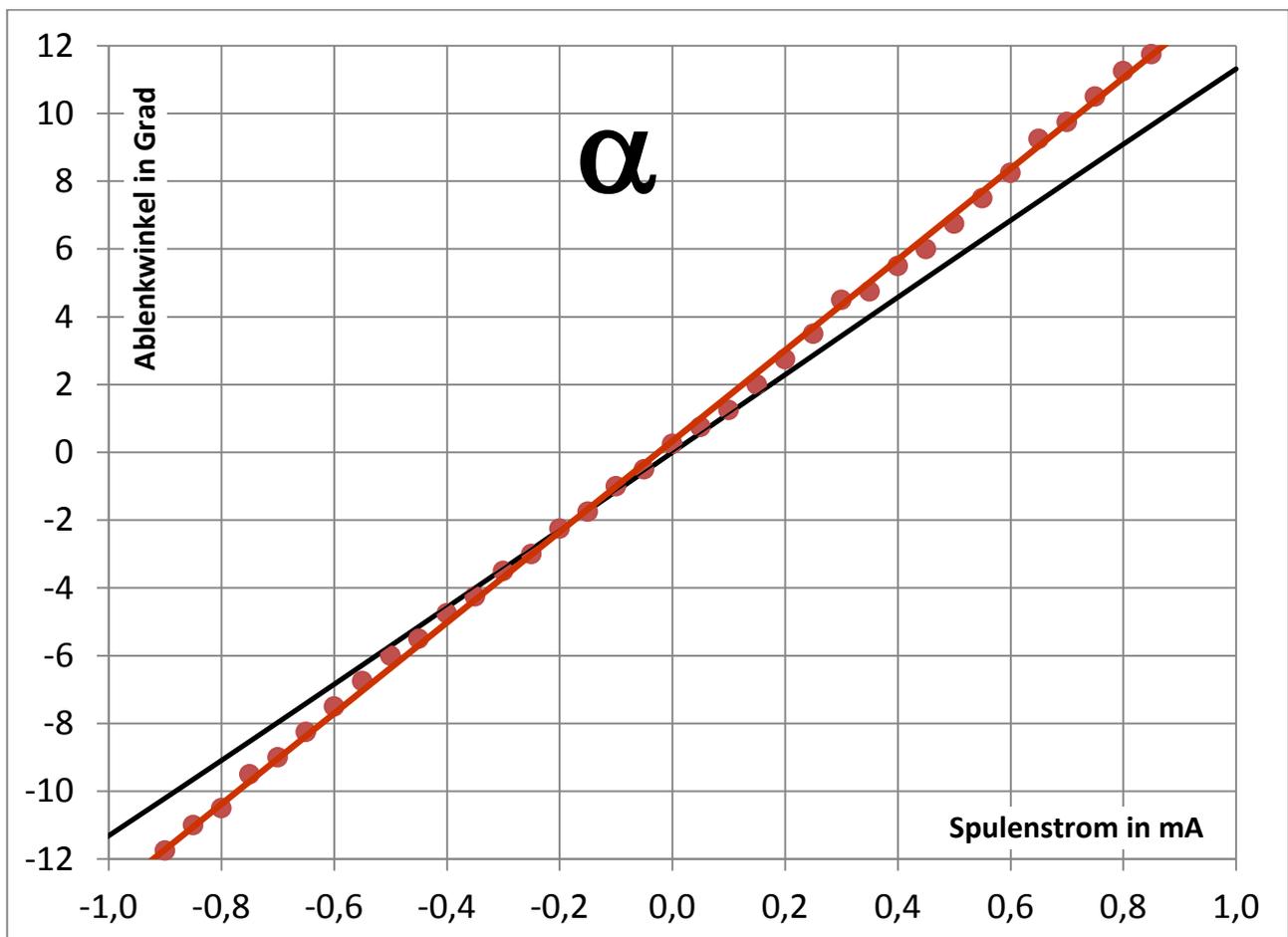


Abb. 5.2: Gemessene Kennlinie (rot) im Vergleich zur Modellrechnung

Resonanzmessung

Der „Magnetnagel“ im Nachbau kann eine Drehschwingung mit einer Periode von etwa 13 Sekunden ausführen. Durch einen entsprechenden Wechselstrom kann das Galvanometer also zu Schwingungen angeregt werden.

Insbesondere, wenn der Wechselstrom die Resonanzfrequenz trifft, sollten auch sehr kleine Ströme eine beobachtbare Schwingung auslösen.

Das Labornetzteil kann eine „Rechteck-Wechsel-Spannung“ mit einstellbarer Frequenz abgeben.

Für ein weiteres Experiment wurde die Spannung so gewählt, dass ein Strom von nur 10 Micro-Ampere durch das Galvanometer fließt und die Polarität des Stroms mit Frequenzen zwischen 0,076 Hz und 0,082 Hz wechselt.

Das bedeutet, die Polarität des Stroms wurde etwa alle 6,5 Sekunden gewechselt, was ggf. auch „von Hand“ durch einen geeigneten Umschalter hätte erfolgen können.

Abgelesen wurde die Amplitude der angeregten Drehschwingung.

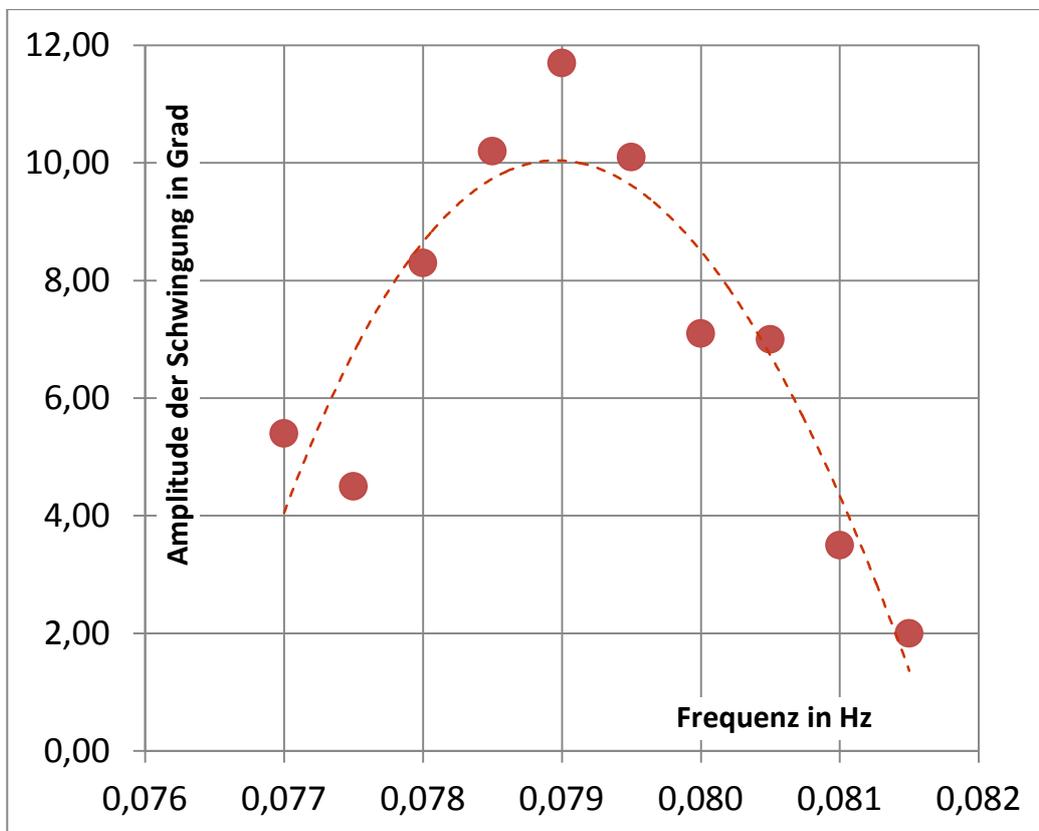


Abb. 5.3: Resonanzmessung

Die Messung zeigt ein klares Maximum zwischen etwa 0,78 Hz und 0,80 Hz (Periode 12,8 s bis 12,5 s) in dem ein Wechselstrom von 10 μ A eine Schwingungsamplitude von über 10° bewirken kann.

Damit könnte das Gerät Ströme bereits ab etwa ein Microampere nachweisen, was in einer Brückenschaltung einen außerordentlich empfindlichen Nullabgleich ermöglichen würde.

Strompuls / Ladungsmessung

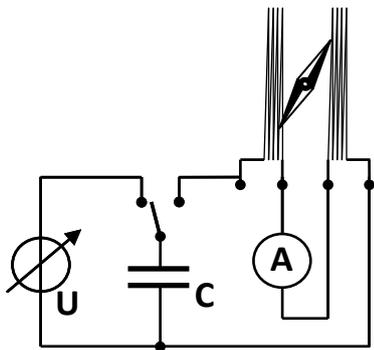


Abb. 5.4: Ladungsmessung

Eine Drehschwingung des „Magnetnagels“ kann auch durch einen einzelnen Stromstoß angeregt werden. Damit ist eine (rudimentäre) Möglichkeit für die Messung von Ladungsmengen bzw. Kapazitäten gegeben.

Im Experiment wurde ein Kondensator C von 1 mFarad zunächst durch die Spannungsquelle U auf 1 Volt aufgeladen und dann über das Galvanometer entladen.

Der Stromstoß mit einer Ladungsmenge von $1\text{mF} \cdot 1\text{V} = 1\text{mC}$ führte zu einem „Vollausschlag“ des Galvanometers bis über 12° Ablenkung und einer in der Folge abklingenden Drehschwingung.

Der Effekt erlaubt im Prinzip die Messung von Kapazitäten, Ladungen und Stromstößen. Allerdings ist eine genaue Ablesung kaum möglich und damit auch eine Eichung schwierig.

Um eine höhere Empfindlichkeit zu erreichen kann diese Form der Ladungsmessung mit der „Resonanzmethode“ kombiniert werden.

Brückenschaltungen, Einsatz als „Multimeter“

Nach Aufnahme der Kennlinie ist das Gerät zunächst als Strom-Messgerät in einem Messbereich zwischen -1mA und $+1\text{mA}$ tauglich. Durch geeignete Parallelschaltung zu einem Lastwiderstand, wird die Messung stärkerer Ströme möglich, Schaltung in Serie mit einem (hohen) Widerstand erlaubt die Messung von Spannungen.

Durch die Resonanz-Methode wird ein Nachweis auch von Strömen im μA -Bereich möglich.

Weiter wurde der Nachweis von Stromstößen bzw. Ladungen und damit die Messung von Kapazitäten demonstriert.

Da die Messungen zwar wenig genau sind aber eine hohe Empfindlichkeit zeigen, wird so der Einsatz des Galvanometers für den Nullabgleich in Brückenschaltungen nahegelegt.

Weitere Anmerkungen:

Horizontale Ausrichtung des Gerätes

Die horizontale Ausrichtung des Gerätes erfolgt beim Original über die drei beschriebenen Standfüße mit Schraubgewinden und beim Nachbau über die entsprechenden Schrauben auf denen das Gerät ruht.

Das Experiment zeigt, dass es hier weniger um die horizontale Ausrichtung der Spulen sondern insbesondere um die exakt vertikale Ausrichtung des Turms geht. Nur bei genau vertikaler Ausrichtung des Turms hängt der „Magnetnagel“ exakt im Zentrum der Spulen und nur dann kann mit dem Faden als Drehachse eine genaue Anzeige des Ablenkwinkels erfolgen.

Erdmagnetfeld und Ausrichtung des Gerätes „nach Norden“

Die Richtung des Erdmagnetfeldes weicht im Inneren des Gebäudes, in dem die Experimente durchgeführt wurden, einige Grad weiter nach Westen ab als durch die Position des magnetischen Nordpols erwartet und die Abweichung ist in verschiedenen Räumen unterschiedlich stark. Weiter können in der Nähe befindliche Heizkörper, Computer, Netzteile usw. einen erheblichen Einfluss haben.

Das Gerät muss also an einem Ort aufgestellt werden, der möglichst frei von derartigen Einflüssen ist. Für genau diesen Ort erfolgt dann die Ausrichtung in Richtung Nordpol des jeweilig vorliegenden Feldes.

Das Originalgerät verfügt hierzu und für die Eichung nach Poggendorf über eine entsprechende Einstellmöglichkeit mit dem beschriebenen Winkelkranz, der Nachbau muss vorsichtig als Ganzes ausgerichtet werden. Mangels einer genauen Winkeleinstellung kann daher am Nachbau das Verfahren von Poggendorf nicht demonstriert werden.

Anmerkung: Die lokalen Abweichungen der Richtung des Erdmagnetfeldes betreffen natürlich auch die Neigung des Feldes gegenüber der Horizontalen und die Feldstärke. Da die Stärke nur der horizontalen Komponente des Erdmagnetfeldes in die Messung eingeht, führt dies zu einer gewissen Unsicherheit beim Versuch einer absoluten Eichung des Gerätes.

Torsionskraft des Fadens, drehbare Aufhängung des Fadens

Der grundsätzliche Aufbau des Geräts ähnelt einer Torsionswaage. Neben der bei einer Auslenkung auf den „Magnetnagel“ wirkenden Rückstellkraft des Erdmagnetfeldes besteht auch noch eine Rückstellkraft, die aus der Torsion des Fadens resultiert.

Eine wichtige Voraussetzung für die Berechnungen und entsprechende Messungen ist, dass die auftretenden Torsionskräfte des Fadens wesentlich kleiner bleiben als die Rückstellkraft durch das Erdmagnetfeld.

(Bei einem versuchsweise verwendeten 0,2 mm Nylonfaden war dies nicht der Fall. Überdies war die elektrische Isolationsfähigkeit dieses Fadens derart hoch, dass sich der „Magnetnagel“ bei Berührung durch den Experimentator auch elektrisch aufladen konnte. Die in der Folge auftretenden Effekte durch elektrostatische Kräfte zwischen „Magnetnagel“ und Spulen widersprachen zunächst jeder Erwartung ...)

Der im Nachbau verwendete Faden (Nähgarn) erfüllt diese Bedingung. Allerdings treten doch kleine Torsionskräfte auf bis der Faden nach etwa einem Tag „Aushängen“ zur Ruhe kommt.

Hier wurde es beim Nachbau erforderlich die Aufhängung des Fadens an der Turmspitze axial drehbar zu lagern. Die Turmspitze bietet damit zwei Funktionen: Zum einen kann über eine Klemmvorrichtung die Einstellung der Fadenlänge angepasst und fixiert werden, zum anderen ist eine Drehung des Fadens möglich, um restliche Torsionskräfte zu beseitigen. Die letztgenannte Möglichkeit bietet auch eine Möglichkeit zur sehr genauen Feinjustierung der Nullstellung des „Magnetnagels“, wenn die „Nord-Süd“ Ausrichtung des Gerätes nicht völlig exakt stimmt.

Aus der Beschreibung des Originals geht nicht hervor ob die Halterung des Fadens oder der ganze Turm des Geräts drehbar gelagert war. Die Experimente lassen aber vermuten, dass zumindest für den Zeitpunkt der Montage eines neuen Fadens eine derartige Möglichkeit vorhanden gewesen sein muss.

Objektiv / Okular / Linse über der Skala

Beim Original ist über der Skala ein Objektiv bzw. Okular montiert, das offensichtlich als Lupe eingesetzt wurde um eine genauere Ablesung der Zeigerposition zu ermöglichen.

Der Nachbau verfügt an der entsprechenden Position über eine geeignete Linse.

Bei den Experimenten am Nachbau zeigt sich, dass diese Lupe nicht nur durch die entsprechende Vergrößerung eine genauere Ablesung ermöglicht sondern überdies den Beobachter dazu zwingt, die Skala aus immer dem gleichen Sichtwinkel heraus zu beobachten. Da sich der Zeiger zwangsläufig in gewissem Abstand über der Skala bewegt, verhindert diese Fixierung des Sichtwinkels Fehlablesungen durch Parallaxenfehler, also unter verschiedenem Sichtwinkel scheinbar unterschiedliche Zeigerstellungen.

Drehschwingung des „Magnetnagels“

Bei einer (plötzlichen) Änderung des zu messenden Stroms wird beim Nachbau eine Drehschwingung des „Magnetnagels“ mit einer Periode von ungefähr 13 Sekunden angestoßen. Bei einer Drehschwingung von z.B. zunächst 5° benötigt das Gerät mindestens 2 Minuten, um wieder zur Ruhe, i.e. zu einer stabilen neuen Anzeige zu kommen. Selbst nach längerem Warten treten beim Nachbau häufig noch Schwingungen mit Amplituden bis zu 1° auf, verursacht durch z.B. Luftströmungen.

Der Nachbau verfügt nicht über die schützende Glasglocke des Originals. Das Experiment zeigt, dass eine derartige Schutzhülle für Arbeiten mit dem Gerät in einer weniger ruhigen Umgebung zwingend erforderlich ist.

Überraschenderweise zeigt das Experiment jedoch auch, dass ein Ablesen des Gerätes durch sehr kleine Schwingungen kaum behindert wird. Bei einer Schwingungsperiode von 13 Sekunden kann problemlos jeweils alle 6,5 Sekunden ein Minimum bzw. ein Maximum-Wert abgelesen werden. Schwingt der Zeiger etwa gleichmäßig zwischen 4° und 5° hin und her, kann mit einiger Sicherheit auf eine gemittelte Anzeige von $4,5^\circ$ geschlossen werden. Ein genaueres Ablesen wäre auch bei ruhendem Zeiger kaum möglich.

Genau dazu passend erwähnt bereits Poggendorf in seiner Abhandlung [5] von 1826 die Schwierigkeiten einer genauen Ablesung der Geräte und die Möglichkeit, auch bei schwingendem Zeiger Werte abzulesen.

Weiter hält Poggendorf als positives Ergebnis fest, dass er in der Lage war 18 Messungen in einer halben Stunde durchzuführen. Auch dies lässt darauf schließen, daß bei den damals üblichen Galvanometern ganz ähnliche Drehschwingungen auftraten wie beim Nachbau.

Drehschwingung und Nullabgleich

Bei plötzlichem Einschalten eines Stroms schwingt der Magnetnagel zunächst weit über den anzuzeigenden Wert hinaus und pendelt sich dann in der oben beschriebenen Weise auf einen Messwert ein.

Dieser Effekt kann für einen empfindlichen Nullabgleich in einer Brückenschaltung verwendet werden, da durch den Überschwinger nach dem Ein- bzw. Ausschalten auch Ströme nachweisbar werden, die für eine normale Messung zu gering wären.