

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Die ersten Galvanometer – Eine Aufbereitung früher
elektrischer Messgeräte der historischen Sammlung der
Fakultät für Physik der Universität Wien“

verfasst von / submitted by

Kevin Spies, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien, 2020 / Vienna 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 199 520 523 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt SEK (AB) Lehrverbund
UF Mathematik Lehrverbund UF Physik Lehrverbund

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit gibt einen Einblick in die Anfänge der elektrischen Messungen. Dazu werden die wichtigsten historischen Errungenschaften von Hans Christian Oersted, dem Entdecker des Zusammenhangs zwischen elektrischen und magnetischen Phänomenen, bis hin zu Claude Pouillet, dem Entwickler der Sinusbussole, beleuchtet und dargestellt. Im Hauptteil werden einige Geräte aus der historischen Sammlung der Fakultät für Physik der Universität Wien beschrieben, auf Funktionsfähigkeit überprüft und experimentell getestet. Das Konzept dieser Geräte stammt zum Großteil noch aus der Zeit der ersten elektrischen Strommessungen, wobei das älteste Gerät, das Nadelgalvanometer nach Leopoldo Nobili, aus dem Jahre 1834 stammt. Neben diesem werden zwei weitere Differentialgalvanometer, drei Tangentenbussolen, eine Tangenten – Sinusbussole und ein Demonstrationsgalvanometer, welches universell verwendbar ist, experimentell untersucht. Obwohl diese Messinstrumente weit mehr als 100 Jahre alt sind, stellt sich heraus, dass ihre Genauigkeit durchaus brauchbar und mit einfachen modernen digitalen Amperemetern vergleichbar ist.

Abstract

This master thesis deals with the beginnings of the measurements of the electric current. The used basic principles for the period from Hans Christian Oersted, the discoverer of the relationship between electrical und magnetic phenomena, and Claude Pouillet, the developer of the sinus bussole, are described. In the main part, some devices from the historical collection of the Faculty of Physics at the University of Vienna are presented, checked for functionality and tested experimentally. The concept of these devices largely stems from the times of the first electrical current measurements. The oldest one, the needle galvanometer according to Leopoldo Nobili, dates from 1834. Additionally, two further differential galvanometers, three tangent busses, a tangent sine bussole and one demonstrational galvanometer, which can be used universally, are experimentally investigated. Although these measuring instruments are far more than 100 years old, it turns out that their accuracy is quite useful and comparable to simple modern digital ammeters.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
2.	Theoretische Grundlagen zu den Experimenten.....	6
2.1.	Historisches	6
2.2.	Grundlagen: Elektrischer Strom und Magnetfeld	12
2.2.1.	Elektrische Ströme.....	12
2.2.2.	Magnetfelder.....	13
2.3.	Grundlagen zum Differentialgalvanometer	20
2.4.	Astatisches Nadelpaar	23
2.5.	Grundlagen zur Tangentenbussole und Sinusbussole.....	23
3.	Nobili – Galvanometer Ekling Nr.3	26
3.1.	Aufbau des Gerätes	26
3.2.	Restaurierungen	30
3.3.	Experiment	31
3.3.1.	Aufbau des Experiments.....	31
3.3.2.	Durchführung	32
3.3.3.	Ergebnisse.....	34
3.3.4.	Diskussion	35
4.	Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897	35
4.1.	Aufbau des Gerätes	35
4.2.	Experiment	38
4.2.1.	Aufbau des Experiments.....	38
4.2.2.	Durchführung	39
4.2.3.	Ergebnisse.....	39
4.2.4.	Diskussion.....	41
5.	Tangentenbussole nach Gaugain	42
5.1.	Aufbau des Gerätes	42
5.2.	Experiment	43
5.2.1.	Aufbau des Experiments.....	43
5.2.2.	Durchführung	44
5.2.3.	Ergebnisse.....	45
5.2.4.	Diskussion	47
6.	Tangentenbussole von Hartmann & Braun	49
6.1.	Aufbau des Gerätes	49
6.2.	Restaurierungen	51
6.3.	Experiment	53

6.3.1.	Aufbau und Durchführung.....	53
6.3.2.	Ergebnisse.....	54
6.3.3.	Diskussion.....	55
7.	Tangenten – und Sinusbussole Ekling Nr.14	57
7.1.	Aufbau des Gerätes	57
7.2.	Experiment	59
7.2.1.	Aufbau und Durchführung.....	59
7.2.2.	Ergebnisse.....	61
7.2.3.	Diskussion	66
8.	Tangentenbussole von Siemens & Halske Nr. 1541	69
8.1.	Aufbau des Gerätes	69
8.2.	Experiment	70
8.2.1.	Aufbau und Durchführung.....	70
8.2.2.	Ergebnisse.....	71
8.2.3.	Diskussion	73
9.	Demonstrationsgalvanometer von Hartman & Braun	75
9.1.	Aufbau des Gerätes	75
9.2.	Experiment	77
9.2.1.	Aufbau des Experiments.....	77
9.2.2.	Durchführung	80
9.2.3.	Ergebnisse.....	82
9.2.4.	Diskussion	84
10.	Fazit der Experimente	86
11.	Abbildungsverzeichnis.....	88
12.	Tabellenverzeichnis	90
13.	Literaturverzeichnis.....	90

1. Einleitung

Erst im Jahr 1820 entdeckte Oersted, dass ein stromdurchflossener Leiter eine Wirkung auf eine Magnetnadel erzeugt. Dies eröffnete erstmals die Möglichkeit elektrische und magnetische Phänomene miteinander zu verknüpfen. Dadurch begann eine rasante Entwicklung der Erforschung magnetischer und elektrischer Phänomene. Insbesondere wurde es notwendig elektrische Ströme möglichst reproduzierbar zu messen. Pioniere wie Hans Christian Oersted, Johann Schweigger, Johann Poggendorf, André – Marie Ampère, Antoine César Becquerel, Leopoldo Nobili, Johann Nervander, Claude Pouillet und auch weitere Forscher entwickelten erste Strommessgeräte. Etliche Objekte der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien erinnern noch an die frühen elektrischen Messungen oder stammen sogar fast aus dieser Zeit. Damit ist auch die Motivation gegeben, sich mit den frühen Strommessgeräten der physikhistorischen Sammlung zu befassen.

Noch im Jahre 1820 entwickelte Schweigger den sogenannten „Multiplikator“. Dieser war ein Draht, welcher zu mehreren Windungen geformt war. Dadurch verstärkt sich die Wirkung des stromdurchflossenen Leiters bzw. die Stärke des erzeugten Magnetfeldes, wodurch es möglich ist, Ströme empfindlicher zu messen. Die mit einer Messskala versehenen Multiplikatoren wurden auch Galvanometer genannt. Um noch empfindlicher messen zu können erfand Ampère das astatische Nadelpaar, welches aus zwei Magnetnadeln besteht, welche gegenpolig angeordnet sind.

Eine weitere wichtiger Meilenstein war das Differentialgalvanometer, welches 1825 von Antoine César Becquerel entwickelt wurde. Dieses ist weitgehend unabhängig von Strom – und Temperaturschwankungen und kompensiert den Widerstand der Zuleitungen. Johann Nervander konstruierte 1834 den Vorläufer der Tangentenbussole, ehe Claude Pouillet diese weiterentwickelte und 1837 die verbesserten Geräte als Tangenten – und Sinusbussole veröffentlichte. Die Vorteile dieser Galvanometer waren, dass sie keine Eichung benötigten und die auf das Erdmagnetfeld bezogenen Messungen erstmals landesweit vergleichbar waren. Um die Homogenität des erzeugten Magnetfeldes zu verbessern wurden bei vielen Tangentenbussolen Helmholtzspulen verwendet.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neben dem historischen Hintergrund, auch den Aufbau der Messapparate, ihre Funktionsweise und Genauigkeit im Experiment zu untersuchen.

Ähnliche Galvanometer werden untereinander verglichen und somit Vor – und Nachteile

geschildert. Alle Messungen wurden am freien Pult des Christian – Doppler – Hörsaals der Fakultät für Physik durchgeführt, wo sich die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes als relativ ungestört erwies.

2. Theoretische Grundlagen zu den Experimenten

2.1. Historisches

Elektrische und magnetische Phänomene sind lange unabhängig voneinander gesehen und behandelt worden. Die ersten Erfahrungen mit magnetischen Materialien wurden in China gemacht. Es wurden Minerale gefunden, welche Eisen anzogen und deren Bruchstücke sich bei möglichst reibungsfreier Lagerung in N-S-Richtung ausrichteten.

Im Jahre 1269 führte Petrus Peregrinus experimentelle Untersuchungen bezüglich der Kräfte von Magneten durch. Mithilfe einer Nadel bestimmte er, so würde man heute sagen, die magnetischen Feldlinien eines kugelförmigen Magneten. Peregrinus entdeckte auch, dass Magneten zwei verschiedenartige Enden hatten und nannte diese „Pole“. Da seinen Untersuchungen zu dieser Zeit keine große Beachtung geschenkt wurde, dauert es mehrere Jahrhunderte bis William Gilbert im Jahr 1600 in seinem großen Werk „De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure“ (Über den Magneten, magnetische Körper und den großen Magneten Erde) dieses Thema wieder aufgriff. Seine wichtigste Aussage war, dass die Erde ein riesiger Magnet ist.¹

Dass die Erde ein Magnetfeld hat, wird auch zur Orientierung verwendet. Dies funktioniert, da der Nordpol der Kompassnadel sich zum magnetischen Südpol des Erdmagnetfeldes ausrichtet. Demnach befindet sich beim geografischen Nordpol der magnetische Südpol des Magnetfeldes der Erde.² Das Wort „Magnet“ selbst hat seinen Ursprung wohl im alten Griechenland. Man fand in der Nähe der Stadt „*Magnesia*“ (heute „*Magnisia*“) Gesteine, welche sich gegenseitig anzogen. Von diesem Fundort leitet sich die Bezeichnung Magnet ab.³

¹ (Simonyi, 2001, S. 320f)

² (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 308)

³ (Eucken, Lummer, & Waetzmann, 1932, S. 332)

Im 18. Jahrhundert wurden elektrische Ströme lediglich mit sogenannten Reibungselektisiermaschinen erzeugt. Diese lieferten allerdings nur geringe und undefinierte Ströme. Der Weg zur Erzeugung deutlicher Ströme führte über die Italiener Luigi Galvani (1737 – 1798) und Alessandro Volta (1745 – 1827). Letzterer war für die Entwicklung der ersten galvanischen Elemente, also Batterien, verantwortlich.

Im Jahre 1786 kam es zu einer Beobachtung, die für damalige Verhältnisse sensationell war.

„Man legt an den einen Schenkelnerv einen Metalldraht (dass es zu einem möglichst guten Kontakt kommt), dann an den anderen Schenkelnerv einen zweiten Draht aus einem anderen Metall. Berührt man dann die beiden Metalle und zwar so, dass ein geschlossener Kreis entsteht (bestehend aus dem Metall 1, dem Froschschenkel und dem Metall 2), so zuckt der Froschschenkel im Augenblick der Berührung.“⁴

Galvani schloss daraus, dass es neben der künstlichen und natürlichen Elektrizität auch eine „tierische“ Elektrizität geben müsse. Diese war aus seiner Sicht die Ursache für die Muskelzuckungen, welche durch die Berührung eines Metalls ausgelöst wurden.

Ganz im Gegenteil zu Galvani sah Alessandro Volta dieses Problem. Er führte diese Muskelzuckungen auf eine künstliche Elektrizität zurück, welche durch eine Berührung heterogener Leiter zustande kommt.⁵

Diesen Sachverhalt wies er mit seinem sogenannten „Pile“ nach. Dieser war ein Stapel aus Kupfer oder Silber – und Zinkscheiben, wobei zwischen den metallenen Scheiben immer eine in Salzwasser getauchte Pappscheibe lag. Mithilfe dieser Konstruktion konnte man elektroskopische Ablenkungen, Funken und Schocks beobachten. Volta hatte damit die erste Batterie erfunden, die erstmals kräftige und reproduzierbare Ströme erzeugen konnte. Eine zweite Erfindung, welche seine Theorie stütze war seine „crown of cups“. Diese „Krone“ bestand aus Trinkgläsern, welche mit Salzwasser gefüllt waren und durch Zink – und Kupferplättchen verbunden waren. Auch damit waren dieselben Effekte zu beobachten. Volta hatte damit gezeigt, dass die elektrischen Effekte nicht auf „tierische“ Elektrizität

⁴ (Hermann, 1980, S. 97)

⁵ (Aschoff, 1995, S. 3)

zurückzuführen sind.⁶ Die beiden Konstruktionen von Volta sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 1: Pile nach Volta⁷

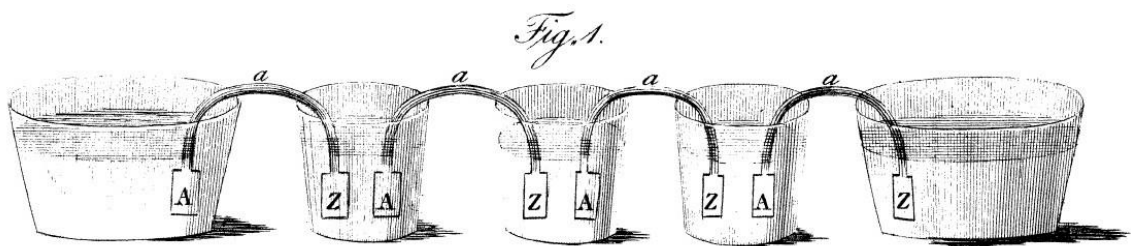


Abbildung 2: "Krone" nach Volta⁸

⁶ (Chipman, 1964, S. 124)

⁷ Von Luigi Chiesa, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5081899>, abgerufen am 25.01.2020

⁸ By en:User:Kurzon(Talk) -

http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Image:Volta_batteries.jpg&oldid=98003642, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2953158>, abgerufen am 25.01.2020

Die Korrelation zwischen elektrischen und magnetischen Phänomenen wurde erst 1820 von Hans Christian Oersted (1777 – 1851) beobachtet. In seinem berühmten Oersted-Experiment, welches den Ausgang dieser Arbeit darstellt, konnte er in einer seiner Vorlesungen beobachten,

„daß sich die Magnetnadel mittels des galvanischen Apparates aus ihrer Lage bewegen lass, und zwar bei geschlossenem galvanischen Kreis, und nicht bei offenem, wie es vor mehreren Jahren einige berühmte Physiker umsonst versucht haben.“⁹

Diese bahnbrechende Beobachtung des Dänen, welche ihm die Copley – Medaille brachte, eröffnete einen ganz neuen Weg elektrische und magnetische Phänomene zu beschreiben. Bis zu seiner Entdeckung wurden elektrische und magnetische Phänomene unabhängig voneinander beschrieben, nun konnte man sie miteinander verbinden und so gemeinsam erläutern. Selbst seine größten Kritiker, wie Ludwig Wilhelm Gilbert, welcher die Nachricht aus Kopenhagen nicht glauben wollte, stellte die Experimente selbst nach und überzeugte sich von der Entdeckung Oersteds.¹⁰

Nach einigen experimentellen Versuchen mit seiner Entdeckung schloss Oersted, dass ein elektrischer Leiter, welcher von einem elektrischen Strom durchflossen wird, ein Magnetfeld erzeugt, welches sich kreisförmig um den Leiter bildet.¹¹ Durch diese Entdeckung folgte eine sprunghafte Entwicklung der Erkenntnisse über Elektrizität und Magnetismus. Insbesondere ergab sich nun die Notwendigkeit elektrische Ströme zu messen.

Viele Wissenschaftler über ganz Europa beschäftigten sich zu dieser Zeit mit der Entdeckung von Oersted. Von 1820 bis 1825 waren Johann Schweigger (1779 – 1857), Johann Poggendorf (1796 – 1877), André-Marie Ampère (1775 – 1836) oder Alexander Cumming (1731 – 1814) maßgeblich an der Entwicklung sogenannter Multiplikatoren beteiligt.¹² In Abbildung 3 sind einige der ersten gebauten Schweigger – Multiplikatoren zu sehen, welche als Ausstellungsstücke im „Museum of History and Technology“ der „Smithsonian Institution“ dienten.¹³

⁹ (Aschoff, 1995, S. 44)

¹⁰ (Hermann, 1980, S. 119)

¹¹ (Keithley, 1990, S. 64f)

¹² (Keithley, 1990, S. 65)

¹³ (Chipman, 1964, S. 122)

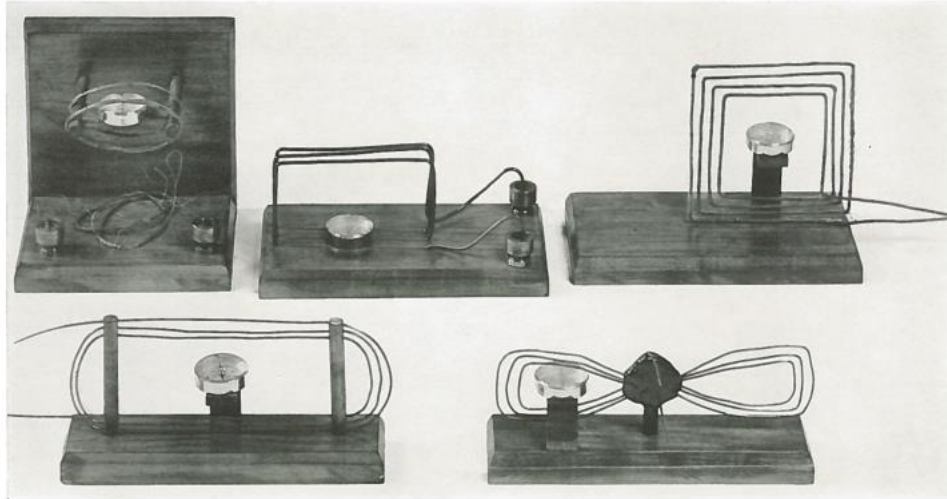


Abbildung 3: Elektromagnetische Instrumente nach Schweigger, Poggendorf und Cumming¹⁴

Der italienische Physiker Leopoldo Nobili (1784-1835) fügte die Ideen seiner Vorgänger zusammen und konnte somit einen hochsensiblen Multiplikator herstellen. Dadurch entstanden erste Galvanoskope. Wurden diese mit einer Skala versehen, entstanden Galvanometer. In Abbildung 4 ist ein Galvanometer abgebildet, welches nach dem Vorbild von Nobili gebaut wurde.

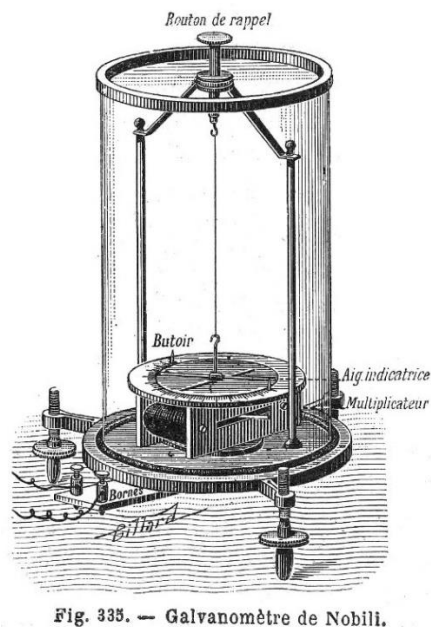


Abbildung 4: Galvanometer nach Nobili¹⁵

¹⁴ (Chipman, 1964, S. 122)

¹⁵ By Gillard - Leçons de Physique ; Éditions Vuibert et Nony, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2708690>

Antoine César Becquerel (1788 - 1878) entwickelte 1825¹⁶ das Differentialgalvanometer und verbesserte damit die Messung elektrischer Widerstände.

Johan Jakob Nervander (1805 – 1848) konstruierte im Zeitraum 1829 bis 1834 ein Tangenten-Galvanometer¹⁷. Claude Pouillet (1790 – 1868) verbesserte es und er prägte in seiner Arbeit von 1837¹⁸ die Begriffe die Tangentenbussole und Sinusbusssole. Beispiele dieser Bussolen sind in Abbildung 5 und 6 dargestellt. Der große Vorteil dieser beiden Geräte ist, dass sie nicht geeicht werden müssen und von vornherein eine absolute Strommessung ermöglichen, sofern die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes bekannt ist. Kennzeichnend für beide Instrumente sind die große kreisförmige Stromschleife und der Kompass in deren Zentrum. Näheres wird in Abschnitt 2.5 beschrieben. Einige Galvanometer und Bussolen aus der Zeit 1830 bis 1850 sowie Nachkonstruktionen befinden sich noch heute in der historischen Sammlung der Fakultät für Physik in Wien. Einige davon werden in der vorliegenden Arbeit untersucht, beschrieben, analysiert und experimentell getestet.

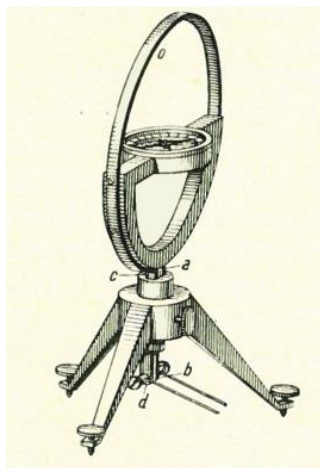


Abbildung 5: Tangentenbussole¹⁹

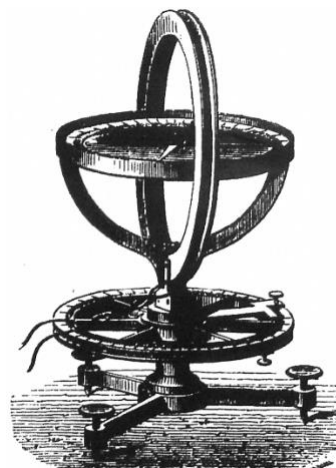


Abbildung 6: Sinusbusssole²⁰

¹⁶ (Becquerel, 1858, S. 186)

¹⁷ (Venermo & Sihvola, 2008)

¹⁸ (Pouillet, 1837, S. 611)

¹⁹ (Eucken, Lummer, & Waetzmann, 1932, S. 394)

²⁰ (Keithley, 1990, S. 82)

2.2. Grundlagen: Elektrischer Strom und Magnetfeld

2.2.1. Elektrische Ströme

Ein Strom ist prinzipiell ein mengenartiger Austausch bzw. Transport von Größen. Diese bleiben bei den Transportvorgängen erhalten. Beispielsweise könnte es sich um einen Transport der Stoffmengen n_A, n_B handeln, welchen man eben als Strom bezeichnet. Allgemein kann man also definieren: Die pro Zeiteinheit durch einen Pfad fließende Menge M bezeichnet man als Strom

$$I = \frac{dM}{dt} \quad (1)$$

Auch bei elektrischen Strömen wird eine mengenartige Größe transportiert. Diese Menge ist die elektrische Ladung Q . Daher folgt, dass der **elektrische Strom I** (oder auch **elektrische Stromstärke**) definiert ist, als jene Ladung, welche in einer bestimmten Zeit t durch eine gewisse Querschnittsfläche A tritt.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

Aus Gleichung (2) erkennt man, dass die Einheit der elektrischen Stromstärke Ladung pro Zeit sein muss. Da die Einheit der Ladung Coulomb ist, die der Zeit Sekunden, gilt

$$[I] = \left[\frac{Q}{t} \right] = C/s = A$$

Man bezeichnet die Einheit C/s als Amperè A . Die genaue Definition der Einheit ist in Kapitel 2.2.2.2. angeführt.

Im Allgemeinen ist die **elektrische Stromdichte $\vec{j}$** ein Indikator, wie stark sich ein Leiter erhitzt (ausgenommen Supraleiter), welcher von einem Strom I durchflossen wird und ist definiert als elektrischer Strom pro Querschnittsfläche A .

$$|\vec{j}| = \frac{I}{A} \quad (3)$$

Damit lautet die Einheit der elektrischen Stromdichte

$$[\vec{j}] = [I/A] = A/m^2$$

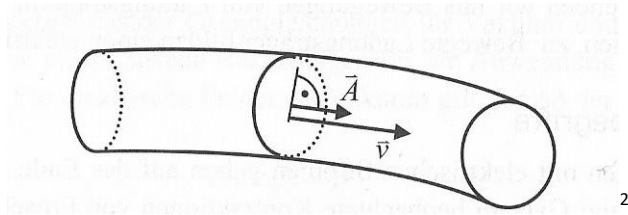


Abbildung 7: Stromleitung in einem Leiter

Aufgrund der Definition der Stromdichte als Stromstärke pro Flächenelement gilt offensichtlich (siehe Abbildung 7)

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

Da nach Gleichung (2) gilt, dass die Stromstärke gleich der Ladung pro Zeit ist, gilt

$$I = n \cdot q \cdot \vec{v} \cdot \vec{A}$$

Das Produkt aus Ladung q und Anzahl n ergibt die **Ladungsdichte** ρ . Da nach Gleichung (4) näherungsweise gilt $I = \vec{j} \cdot \vec{A}$, folgt die wichtige Beziehung zwischen elektrischer Stromdichte $\vec{j}$, Ladungsdichte ρ und der Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v}$ ²²

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v} \quad (5)$$

Als Stromrichtung wird die Bewegungsrichtung von positiven Ladungsträgern definiert. Das bedeutet also, dass bei negativen Ladungsträgern die technische Stromrichtung der Bewegungsrichtung der Ladungen entgegengesetzt ist.

2.2.2. Magnetfelder

Experimente mit Magneten zeigen, dass die Wirkung der Magnete mit größer werdendem Abstand abnimmt. So wie beim Gravitationsfeld, ging man auch hier anfangs von einer Fernwirkungstheorie, also von einer Kraft, die auch in sehr großer Entfernung instantan wirkt, aus.

²¹ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 284)

²² (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 284)

Um nun in eine Nahwirkungstheorie überzugehen, hat man das sogenannte **magnetische Feld** $\vec{B}$ eingeführt. Dieses Feld, z.B. das eines Stabmagneten, kann mit Eisenspänen sehr gut demonstriert werden (siehe Abbildung 8). Um die Stärke des Magnetfeldes zu charakterisieren, ist die Dichte der Feldlinien entscheidend. Je dichter diese sind, desto stärker ist das magnetische Feld $\vec{B}$. Die Einheit von $\vec{B}$ wurde nach dem kroatischen Physiker Nikola Tesla benannt.

$$[B] = 1 \text{ Tesla} = 1T$$

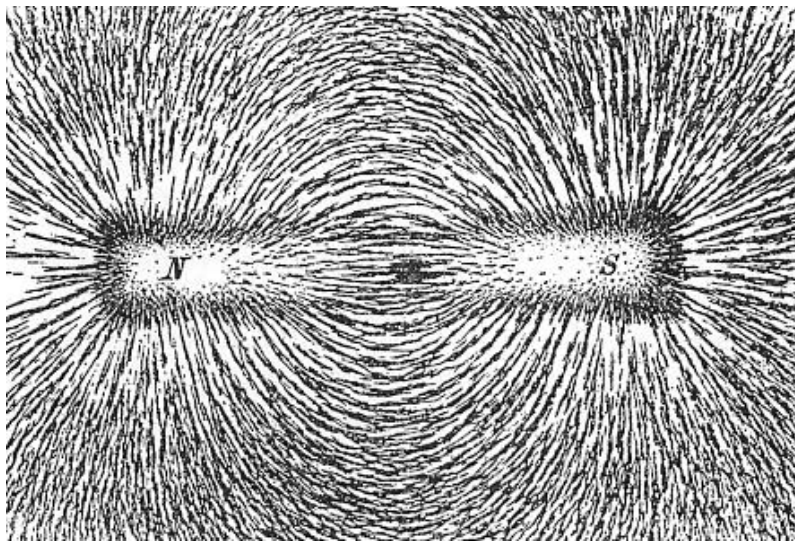


Abbildung 8: Magnetische Feldlinien mit Eisenspänen²³

2.2.2.1. Stärke des Magnetfeldes

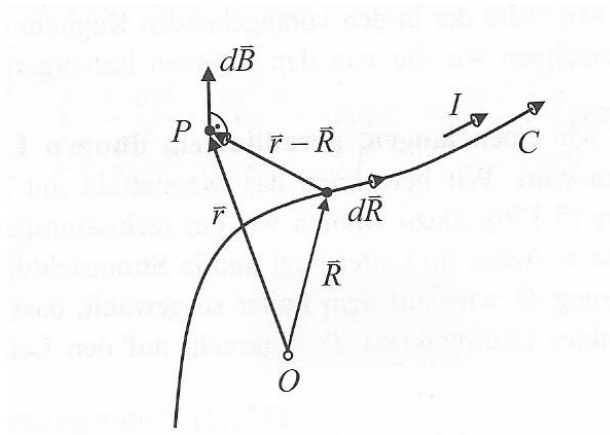
Das **Biot-Savart-Gesetz** beschreibt das Magnetfeld $\vec{B}$ bewegter Ladungen mithilfe der elektrischen Stromdichte $\vec{j}$. Das Gesetz ist in Gleichung (6) gegeben.²⁴

$$\vec{B} = -\frac{\mu}{4\pi} I \cdot \int_C \frac{(\vec{r} - \vec{R}) \times d\vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3} \quad (6)$$

Hierbei ist $\vec{r}$ der Ortsvektor des Beobachtungspunktes und $d\vec{R}$ ein Leiterelement in Stromrichtung. μ ist die sogenannte magnetische Permeabilität. Für Vakuum (näherungsweise auch Luft) wird diese Konstante als μ_0 geschrieben.

²³ Von Newton Henry Black - Newton Henry Black, Harvey N. Davis (1913) Practical Physics, The MacMillan Co., USA, p. 242, fig. 200, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73846>, abgerufen am 25.01.2020

²⁴ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 316)



25

Abbildung 9: Auftretende Vektoren im Biot-Savart-Gesetz

In Abbildung 9 sind die einzelnen Vektoren, welche im Biot-Savart-Gesetz auftreten, dargestellt. Das Magnetfeld wird durch Integration über die stromdurchflossenen Leitelemente $d\vec{R}$ berechnet. Die Richtung des Magnetfeldes $d\vec{B}$ der einzelnen Leitelemente $d\vec{R}$ ist durch Gleichung (6) gegeben. Wie in vielen Lehrbüchern gezeigt ist, ergibt das Biot-Savart-Gesetz das Magnetfeld um einen geraden stromdurchflossenen Leiter zu²⁶

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (7)$$

Dabei steht r für den Abstand vom Draht. Ein schematische Abbildung dieses Magnetfeldes ist in Abbildung 10 dargestellt.

²⁵ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 317)

²⁶ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 309)

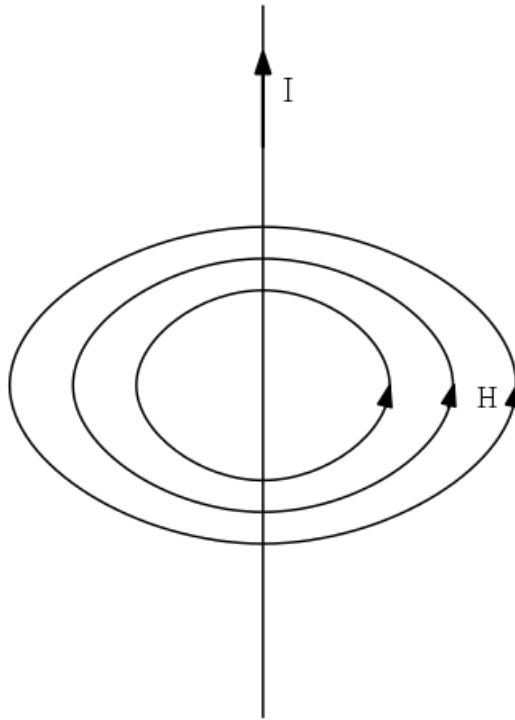


Abbildung 10: Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters

Gleichung (7) kann auch aus dem Ampere'schen Gesetz erhalten werden:

$$\oint \vec{B} \, d\vec{s} = \mu_0 \cdot I \text{ bzw. } \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j}^{27}$$

Mit dem Ampere'schen Gesetz sind elektrische und magnetische Phänomene verknüpft. Im Falle veränderlicher Ströme ist noch der Term des (historisch so genannten)

Verschiebungsstromes zu addieren, sodass sich dann folgende Maxwell-Gleichung ergibt:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \varepsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (8)$$

Die elektrische Permittivität ε und die magnetische Permeabilität μ geben dabei die Durchlässigkeit von Materie bzgl. der jeweiligen Felder an. Dies bedeutet, dass eine elektrische Stromdichte $\vec{j}$ ein sogenanntes Erregungsfeld $\vec{H}$ erzeugt.

²⁷ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 310, 349)

Mit $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$, Division durch μ und

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (9)$$

ergibt sich:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (10)$$

Aus Gleichung (7) lässt sich ablesen, dass das Magnetfeld um einen Leiter mit zunehmendem Abstand abnimmt, jedoch mit steigender Stromstärke zunimmt. Dieses Phänomen beschrieb bereits Oersted als er meinte, dass sich die Wirkung bei seinem Experiment nur beobachten ließe, wenn der Draht dünn wäre und glühe²⁸. Bald wurde erkannt, dass es nur auf die Stromstärke ankam und nicht auf die Dicke des Drahtes.

Um diesem Problem der sehr hohen Stromstärken zu entgehen entwickelte Johann Salomon Christoph Schweigger den sogenannten Schweigger-Multiplikator. Seine Idee war es, statt einem Draht, einen zweiten zu verwenden, um die magnetische Wirkung zu verstärken. Er wickelte einen Draht auf, sodass eine Spule entstand. Das Magnetfeld einer langen Spule, welches mit dem Ampere'schen Gesetz hergeleitet werden kann, lässt sich wie folgt beschreiben:²⁹

$$B = \frac{\mu N I}{\ell} \quad (11)$$

Man erkennt also, dass sich das Magnetfeld proportional zu der Anzahl der Windungen N , jedoch umgekehrt proportional zur Länge ℓ der Spule, verhält. Kurz gesagt: Das Magnetfeld innerhalb einer Spule ist stärker, als jenes eines geraden Leiters. Dies ist in Abbildung 11 dargestellt. Dort sieht man, dass die Feldlinien innerhalb der Spule sehr dicht liegen.

²⁸ (Aschoff, 1995, S. 45)

²⁹ (Lüders, 2010, S. 64)

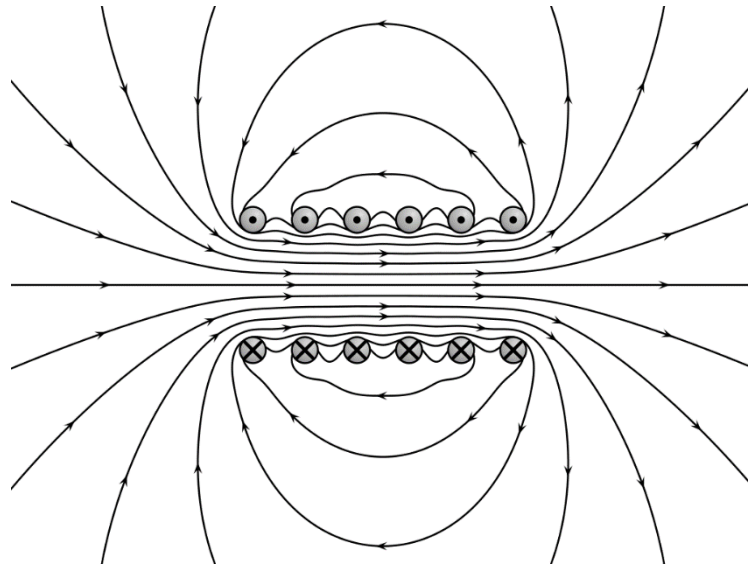


Abbildung 11: Magnetfeld einer Spule³⁰

Somit kann man, bei gleichem Strom, eine größere magnetische Wirkung erzielen, die Wirkung also multiplizieren. Dadurch erhielt diese Erfindung auch den bereits genannten Namen „*Multiplikator*“. Dieses Prinzip wird in jedem Galvanometer verwendet. Die oben bereits mehrfach verwendete magnetische Feldkonstante μ setzt sich wie folgt zusammen: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$. Dabei ist μ_r die Permeabilitätszahl, welche für Luft gleich 1 ist und μ_0 die Vakuumpermeabilität, für die gilt $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$. Daher folgt $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$.

2.2.2.2. Definition der Einheit Ampere

Die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern wurde bereits von Marie André Ampère im Jahre 1826 erkannt³¹, wenngleich das volle Verständnis dieser Kraft erst mit der Definition der Lorentzkraft erlangt wurde. Um zu verstehen, was die Einheit Ampere aussagt, benötigt man das **Ampere'sche Kraftgesetz**. Es definiert die Kraft F , welche ein langer gerader stromdurchflossener Leiter auf einen zweiten langen Geraden Leiter, welcher parallel zum ersten ist, ausübt. Dabei bezeichnen I_1 und I_2 die Ströme durch die Leiter, ℓ_2 die Länge des Abschnitts vom zweiten Leiter und d den Normalabstand zwischen den beiden Drähten.

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 \ell_2}{d} \quad (12)$$

³⁰ Von Geek3 - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10568283>, abgerufen am 25.01.2020

³¹ (Keithley, 1990, S. 67)

Ampère entdeckte aufgrund der Erkenntnisse von Oersted, dass auch zwei stromdurchflossene Leiter die oben beschriebene Kraft aufeinander ausüben. Sind die Ströme in den Leitern gleichgerichtet ziehen diese sich an, sind diese entgegengerichtet stoßen sie sich ab.³²

Von 1948 bis zum Mai 2019 wurde wie folgt vorgegangen um das Ampere zu definieren: Man betrachtet zwei gerade parallele lange Leiter, welche einen Normalabstand von $d = 1\text{ m}$ zueinander haben. Ein Strom von $I_1 = I_2 = 1\text{ A}$ fließt dann durch beide Leiter, wenn pro Längenabschnitt $\ell_2 = 1\text{ m}$ eine Kraft $F = 2 \cdot 10^{-7}\text{ N}$ wirkt. Damit war die SI-Einheit **Ampere** international definiert.³³

Die neue Definition, welche am 16. November 2018 bei der „Generalkonferenz für Maß und Gewicht“ beschlossen wurde und seit 20. Mai 2019 gilt, lautet wie folgt:

„The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.“³⁴

Diese Neudefinition hat den Vorteil, dass das Ampere nur zusätzlich noch von der Definition der Sekunde und nicht mehr von den Definitionen des Meters und des Kilogramms abhängt.

Die Stärke des Magnetfeldes im Mittelpunkt einer Leiterschleife mit Radius R folgt aus dem Gesetz von Biot – Savart

$$B = \frac{\mu I}{2R} \quad (13)$$

³² (Heller, 1882, S. 608)

³³ (Wagner, Reischl, & Steiner, 2010, S. 327f)

³⁴ (Bureau International des Poids et Mesures, 2019, S. 132)

2.2.2.3. Konische Spulen

Um möglichst homogene Magnetfelder zu erreichen, können konische Spulen verwendet werden. Diese werden auf Doppelkegel gewickelt, sodass dadurch ein Helmholtz'sches Spulenpaar entsteht. Um die Feldstärke zu berechnen kann man nun wie folgt vorgehen³⁵:

$$B = \frac{8}{5 \cdot \sqrt{5}} \cdot \frac{\mu \cdot N \cdot I}{R} \quad (14)$$

Hierbei steht R für:

$$R = \bar{R} \cdot \left(1 - \frac{1}{12} \cdot \frac{h^2}{\bar{R}^2} \right) \quad (15)$$

Die Größe $h = (R_2 - R_1)$ beschreibt dabei die Differenz der beiden äußeren Radien und $\bar{R}$ den mittleren Radius.

2.3. Grundlagen zum Differentialgalvanometer

Das Differentialgalvanometer wurde 1825 von Antoine César Becquerel entwickelt und präsentiert. Solche Galvanometer bestehen aus zwei Spulen gleicher Bauart. Zwischen den Spulen befindet sich eine Magnetnadel. Die Kräfte der beiden Spulen auf die Magnetnadel sollen sich im Idealfall kompensieren. In Abbildung 12 ist ein derartiger Aufbau skizziert. Dabei bezeichnen a_1 und a_2 bzw. e_1 und e_2 den Anfang bzw. das Ende der jeweiligen Spule. Zusätzlich sieht man einen Vorwiderstand R und eine Batterie E .

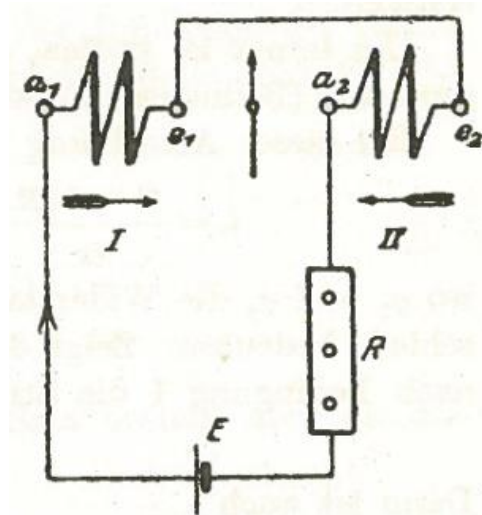


Abbildung 12: Schaltbild eines Differentialgalvanometers³⁶

³⁵ (Mie, 1932, S. 36)

³⁶ (Linker, 1920, S. 13)

Das Prinzip, welches hinter diesem Gerät steckt, kann wie folgt beschrieben werden: Fließt eine bestimmte Stromstärke durch beide Spulen, so ist, bei gleicher Windungsanzahl, gleichem Widerstand der Spulen und gleichem Abstand zur Nadel, das ausgeübte Drehmoment auf eben diese gleich groß und entgegengesetzt. Folglich zeigt das Gerät keinen Ausschlag an. Diese Art der Kompensationsmethode bringt einige Vorteile:

- Immun gegen Stromänderungen
- Immun gegen Temperaturänderungen
- Der Widerstand der Verbindungsdrähte geht nicht in die Messung ein
- Der maximale Strom, für den die Spulen geeignet sind, ist zulässig.

Damit ein Differentialgalvanometer zur Bestimmung eines unbekannten Widerstandes verwendet werden kann, müssen zuvor drei Bedingungen erfüllt werden:

- 1) *„Die beiden Spulen sollen gleich große, entgegengesetzt gerichtete Drehmomente auf die Nadel ausüben.“*
- 2) *Die Widerstände der Spulen müssen gleich groß oder das Verhältnis derselben bekannt sein.*
- 3) *Bei Nadelgalvanometern müssen die Spulen in die Meridianebene eingestellt werden.*³⁷ (Damit ist gemeint, dass die Ebene der Spulenmitte in Richtung des magnetischen Feldes ausgerichtet wird.)

Eine experimentelle Umsetzung dieser drei Bedingungen ist in Kapitel 9.2 dargestellt.

Sind diese drei Bedingungen erfüllt, so gilt es zwei Fälle zu unterscheiden:

- 1) $\frac{g_2}{g_1} = 1 = c$
- 2) $\frac{g_2}{g_1} = c \neq 1$

Dabei sind g_1 und g_2 die Widerstände der Spulen.

³⁷ (Linker, 1920, S. 13)

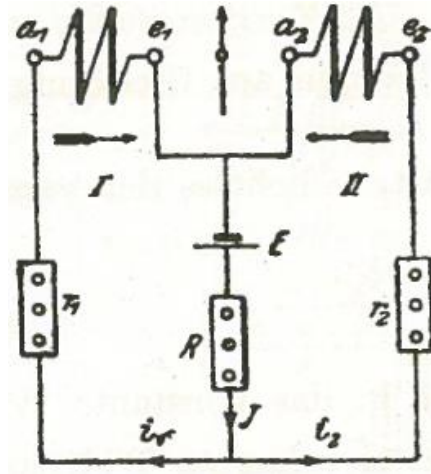


Abbildung 13: Widerstandsberechnung nach Linker³⁸

Betrachtet man Abbildung 13, so gilt nach der Maschenregel $I_1 \cdot g_1 = I_2 \cdot g_2 \Leftrightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{g_2}{g_1} = c$.

Schaltet man nun jeweils einen bekannten Widerstand r_1 und r_2 in die beiden Zweige, so

erhält man $\frac{I'_1}{I'_2} = c = \frac{g_2 + r_2}{g_1 + r_1}$. Aus diesen beiden Gleichungen folgt mit $\frac{g_2}{g_1} = c$

$$c = \frac{r_2}{r_1} \quad (16)$$

Ersetzt man nun r_1 durch einen unbekannten Widerstand W und kompensiert die Ablenkung der Nadel durch den bekannten Widerstand R_2 , so gilt:³⁹

$$\frac{g_2 + R_2}{g_1 + W} = c \text{ und mit } c = \frac{g_2}{g_1}$$

$$\frac{R_2}{W} = c \Leftrightarrow W = R_2 \cdot \frac{r_1}{r_2} \quad (17)$$

Wobei, wenn $\frac{r_2}{r_1} = 1 \Rightarrow W = R_2$

Dies bedeutet, dass für die Widerstandsmessung mit dem Differentialgalvanometer die Wirkung der beiden Spulen nicht unbedingt exakt gleich sein muss. Es ist ausreichend, die Werte von c und R_2 zu kennen.

³⁸ (Linker, 1920, S. 15)

³⁹ Vgl. (Linker, 1920, S. 16f.)

2.4. Astatisches Nadelpaar

Leopoldo Nobili zeigte sich gegenüber den Entdeckungen von Oersted sehr interessiert und wollte hochempfindliches Galvanometer entwickeln. Dazu vereinte er die besten Eigenschaften seiner Vorgänger. Er nahm sich die magnetische Nadel aus dem Oersted – Experiment, Schweiggers Multiplikator und auch Ampère's astatisches Nadelpaar.⁴⁰ Ein solches Nadelpaar ist in Abbildung 16 dargestellt.

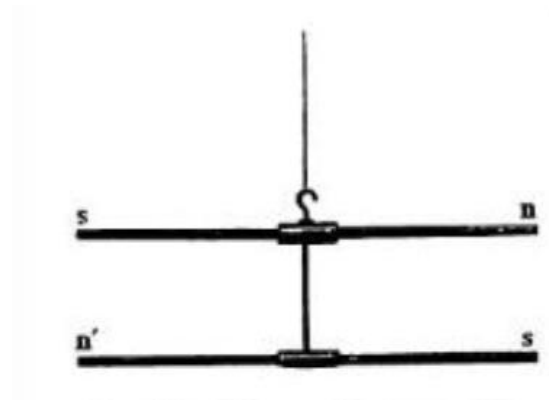


Abbildung 14: Astatisches Nadelpaar⁴¹

Durch die gegengleiche Polung der beiden Nadeln wird die Wirkung des Magnetfeldes verstärkt und der Ausschlag wird vergrößert. Dadurch wird das Gerät empfindlicher gegenüber kleinen Strömen, die so nun bestimmt werden konnten. Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion ist es, dass die Wirkung des Erdmagnetfeldes durch das Nadelpaar aufgehoben wird.

2.5. Grundlagen zur Tangentenbussole und Sinusbussole

Das Prinzip der Tangentenbussole wurde vom gebürtigen Finnländer Johan Jacob Nervander entwickelt, auch wenn er seine Konstruktion nur Galvanometer nannte. Im Jahre 1829 untersuchte er die Möglichkeit Stromstärken mithilfe der Ablenkung einer frei beweglichen Nadel zu messen. Die Konstruktion seines Galvanometers, die dem Prinzip der Tangentenbussole entspricht, gelang ihm im Frühling 1834.⁴² Claude Pouillet verbesserte Nervanders Galvanometer und bezeichnete es als Tangentenbussole, welche er im Jahre 1837 zugleich mit der Sinusbussole publizierte.⁴³ Er bestätigte mithilfe der Tangenten – und

⁴⁰ (Keithley, 1990, S. 79)

⁴¹ (Frölich, 1905)

⁴² (Venermo & Sihvola, 2008)

⁴³ (Pouillet, 1837, S. 611)

Sinusbussole das Ohm'sche Gesetz. Gaugain verbesserte die Tangentenbussole schließlich 1851.^{44 45} Um die Stromstärke mithilfe einer Sinus – bzw. Tangentenbussole berechnen zu können, wird das Gerät so ausgerichtet, dass die Ebene der kreisförmigen Leiterschleife nach Norden zeigt und somit parallel zum Erdmagnetfeld liegt. Das ist dann der Fall, wenn die Magnetnadel in der Windungsebene ausgerichtet ist. Die horizontale Magnetfeldkomponente der Erde $\vec{B}_E$ ist in den Abbildungen 15 und 16⁴⁶ als vertikaler Vektor dargestellt. Fließt durch den kreisförmigen Leiter nun ein Strom I , so erzeugt dieser ein Magnetfeld $\vec{B}_I$. Die Magnetnadel stellt sich dann in Richtung des resultierenden Magnetfeldes ein, wie es Abbildung 15 schematisch für die Tangentenbussole zeigt.

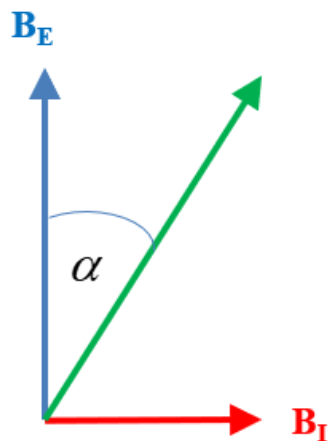


Abbildung 15: Feldvektoren
Tangentenbussole

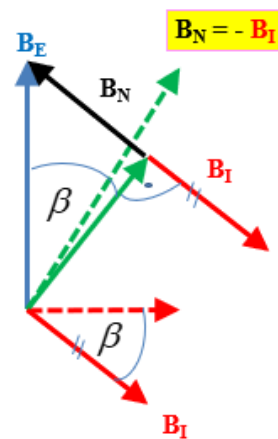


Abbildung 16: Feldvektoren
Sinusbussole

Dabei stehen die Vektoren des Erdmagnetfeldes $\vec{B}_E$ und des stromdurchflossenen Leiters $\vec{B}_I$ normal aufeinander. Durch diese beiden Felder entsteht eine Ablenkung des Zeigers vom Winkel α . Durch Parallelverschieben des Vektors $\vec{B}_I$ mit dem Betrag $B_I = \frac{\mu I}{2\pi r}$ ergibt sich der einfache trigonometrische Zusammenhang

$$\tan \alpha = \frac{\mu I}{2\pi r \cdot B_E} \quad (18)$$

Da der Winkel α gemessen werden kann und das Erdmagnetfeld B_E bekannt ist, lässt sich auch B_I berechnen. Daraus kann anschließend der Strom bestimmt werden.

⁴⁴ (Darmstaedter, Du Bois- Reymond, & C., 1908, S. 429)

⁴⁵ (Gaugain, 1853, S. 442 - 446)

⁴⁶ (Sachslehner, 2014)

In Abbildung 16 sieht man die schematische Funktionsweise einer Sinusbussole. Zunächst wird ein Ausschlag, wie bei einer Tangentenbussole erzeugt. Danach wird die Bussole in Richtung des Ausschlages gedreht, bis die Magnetnadel wieder die Nulllage erreicht. Wie Abbildung 16 zeigt, kompensieren sich dann die Komponenten B_N und B_E . Auch hier ergibt sich durch Parallelverschieben des Vektors $\vec{B}_I$ wieder ein rechtwinkeliges Dreieck. Daher gilt für die Beträge der Vektoren und den Ablenkungswinkel β des Zeigers:

$$\sin \beta = \frac{\mu I}{2\pi r \cdot B_E} \quad (19)$$

Somit ergibt sich wieder mit bekanntem B_E und durch Messen des Winkels β die gesuchte Stromstärke I .

Für konische Spulen in der Helmholtz-Geometrie gilt jedoch:

$$\tan \alpha = \frac{8}{5 \cdot \sqrt{5}} \cdot \frac{\mu \cdot N \cdot I}{R} \cdot \frac{1}{B_E} \quad (20)$$

bzw.

$$\sin \beta = \frac{8}{5 \cdot \sqrt{5}} \cdot \frac{\mu \cdot N \cdot I}{R} \cdot \frac{1}{B_E} \quad (21)$$

Eine wichtige Eigenschaft dieser Bussolen ist, dass die Messung von der Magnetisierungsstärke der Nadel unabhängig ist.⁴⁷ Da sich bei der Tangentenbussole die Magnetnadel möglichst in einem homogenen Magnetfeld $\vec{B}_I$ ⁴⁸ bewegen soll, darf die Magnetnadel nicht zu lang sein. Für präzise Messungen sollte die Länge der Magnetnadel maximal ein Zwölftel des Durchmessers der kreisförmigen Stromschleife haben.⁴⁹ Bei der Sinusbussole ist die Nadellänge nicht ganz so kritisch, weil in Kompensation gemessen wird.

⁴⁷ (Kohlrausch, 2013, S. 213)

⁴⁸ (Geiger & Scheel, 1927, S. 254)

⁴⁹ (Grawinkel & Strecker, 1893, S. 97)

3. Nobili – Galvanometer Ekling Nr.3

In den anschließenden Experimenten wurden die Unsicherheiten mithilfe des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet.

3.1. Aufbau des Gerätes

Das Gerät, welches für die folgenden Experimente verwendet wurde stammt aus dem Jahre 1834 und ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Galvanometer nach Nobili (Ekling Nr.3)⁵⁰

⁵⁰ <https://phaidra.univie.ac.at/o:725750>

Es wurde vom Wiener Johann Michael Ekling (1795 – 1876) ⁵¹ hergestellt – hat „Nr. 3 eingraviert – und wurde vermutlich noch von Andreas von Baumgartner (1793 – 1865) für das physikalische Museum der Universität Wien, welches Baumgartner von 1823 – 1833 leitete, in Auftrag gegeben. Der Eintrag im Inventar des damaligen physikalischen Museums lautet: „*Multiplikator nach Nobili mit rundrige Messinggestelle*“. Das Gerät ist $(34,0 \pm 0,5)$ cm hoch und die gedachte dreieckige Stellfläche hat eine Seitenkante von $(20,0 \pm 0,5)$ cm.

Wie in Abbildung 17 ersichtlich, besteht die Grundkonstruktion des Gerätes hauptsächlich aus Messing, wobei sich die Spulen in einem zylindrischen Glasgehäuse mit $(10,0 \pm 0,1)$ cm Durchmesser befinden. Auf dem Glasgehäuse befindet sich ein weiteres Metallrohr, welches am oberen Ende eine Stellschraube vorweist, mit welcher man den Faden des Galvanometers, an dem das Nadelpaar hängt, justieren kann. Der mittlerweile abgerissene Originalfaden selbst war ein Kokonfaden mit einem Durchmesser von $(0,03 \pm 0,01)$ mm. Das Nadelpaar ist nicht astatisch ausgeführt. Die obere Nadel ist amagnetisch und dient nur der Anzeige, während die untere Nadel ein kleiner Stabmagnet mit ca. 5mm Durchmesser ist. Des Weiteren befinden sich am Gerät zwei Wasserwaagen, die der Ausrichtung dienen. Die vier Anschlüsse (zwei A – und zwei B – Anschlüsse) befinden sich im unteren Teil des Gerätes, wie in Abbildung 18 zu sehen ist.

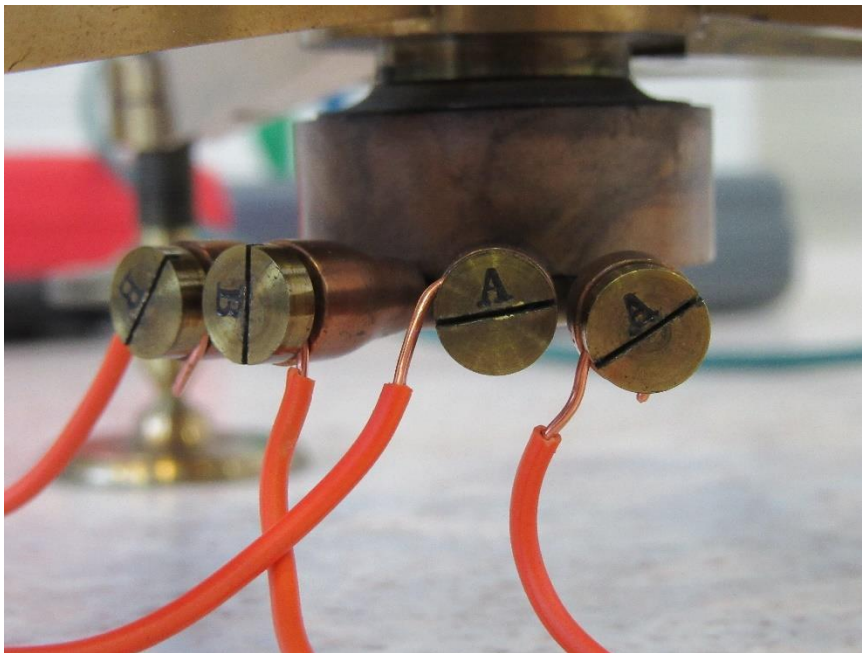


Abbildung 18: Anschlüsse des Nobili – Galvanometers

⁵¹ https://bibliothek.univie.ac.at/sammlungen/objekt_des_monats/009388.html

Am unteren Teil des Galvanometers befindet sich eine versilberte, verstellbare 360° - Skala mit Nonius. Das gesamte Gehäuse mit Skala wurde mithilfe eines Holzgriffes, welcher in Abbildung 17 gut zu sehen ist, justiert bzw. gedreht. So konnte das Messwerk exakt ins erdmagnetische Feld ausgerichtet werden. Außerdem ist dieser Multiplikator auch als Sinusbussole verwendbar, wenngleich zu bemerken ist, dass das Prinzip der Sinusbussole erst 1837 publiziert wurde. Die Spulen bestehen aus jeweils sieben Windungen von ein und demselben verdrehten Drähtepaar. Zur Ablesung der Skalen sind zwei Ablesefernrohre am Gerät angebracht. Die Skala für die Anzeigenadel, welche in den folgenden Experimenten verwendet wurde, ist in Abbildung 19 dargestellt. Diese Skala kann mithilfe des oberen Ablesefernrohrs abgelesen werden. Das untere Fernrohr, welches zur Ablesung der Winkelskala dient, ist mittlerweile trüb und kann daher nicht mehr verwendet werden.



Abbildung 19: Skala des Nobili-Galvanometers

Abbildung 19 zeigt drei wesentliche Eigenschaften des Gerätes:

1. Wie in Abbildung 20 besser zu sehen ist, hat das Galvanometer zwei Nadeln. Dabei ist nur die untere magnetisch, die zweite dient lediglich zum Anzeigen des Winkelausschlags.
2. Die Messskala umfasst nur $\pm 15^\circ$.
3. Betrachtet man die Spulen genauer, so erkennt man, dass die Drähte verdreht mit jeweils sieben Windungen und beide Spulen durchgehend mit einem Drähtepaar gewickelt sind, d.h. es liegt eigentlich nur eine Spule mit Luftspalt vor. Die Verdrehungen und die kurze Messskala sind ein starker Hinweis darauf, dass das Gerät für Kompensationsmessungen verwendet wurde. Insbesondere kommt die Verwendung als Differentialgalvanometer in Frage.

Die Spulen weisen einen Widerstand von $(1,5 \pm 0,2)\Omega$ auf.

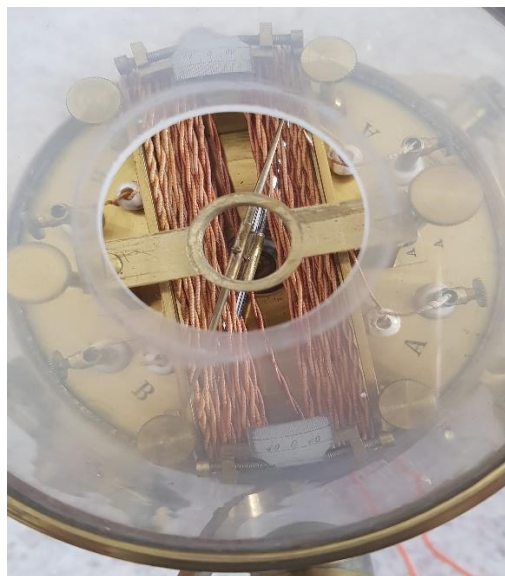


Abbildung 20: Nadelpaar des Nobili-Galvanometers

3.2. Restaurierungen

Da der Kokonfaden des Gerätes gerissen war, musste dieser ersetzt werden. Dabei stellte sich das Problem der Auswahl, da die kleine Öse der Justierschraube, durch welche der Faden am oberen Ende der Säule hindurch musste, nur für den Kokonfaden, aber nicht für einen etwas dickeren Ersatzfaden geeignet war. Aus diesem Grund wurde die Abdeckung mitsamt der Stellschraube durch ein vergleichbares Stück ausgetauscht. Die neue Abdeckung (rot) ist nun in Abbildung 22 zu sehen. Durch diese Konstruktion ist es ebenfalls möglich den Faden zu spannen bzw. auszudrillen. In Abbildung 21 sind neben dem Rohr die Originalabdeckung und die Vorrichtung zum Auf – und Abwickeln des Fadens zu sehen.



Abbildung 21: Originalabdeckung des Nobili-Galvanometers

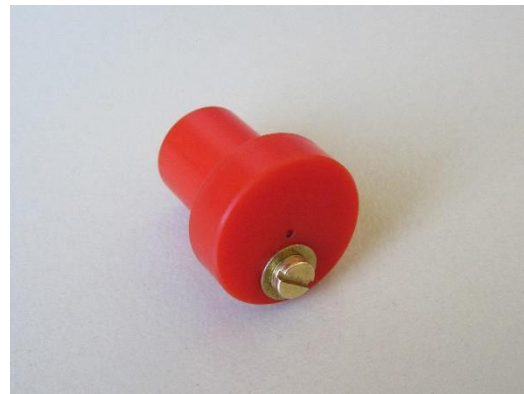


Abbildung 22: Neue PVC-Abdeckung für das Nobili – Galvanometer

Der Kokonfaden wurde durch einen ganz feinen Draht („Platinseele“ von W.C. Heraeus Hanau) mit einer Dicke von $(0,121 \pm 0,002) \text{ mm}$ ersetzt. Dieser ist zwar etwas dicker, wie der Originalfaden, jedoch bleibt damit die Anzeigenadel ausreichend empfindlich.

3.3. Experiment

3.3.1. Aufbau des Experiments

In Abbildung 23 ist der Aufbau für die Überprüfung des Nobili – Galvanometers als Differentialgalvanometer zu sehen. Es geht darum, dass sich zwei Stromflüsse im Messwerk des Galvanometers kompensieren sollen. Man sieht zwei Stromkreise, welche jeweils aus einer Stromquelle („DC Power Supply NTL 05“ (A) und „EL352 Power Supply (B)“) einem Vorwiderstand mit 230 Ohm (C), einem Potentiometer mit 200 Ohm (D) und einem Multimeter („Escort 97 Multi-Display Multimeter“ (E) und „VC 820 Voltcraft (F)“) bestehen. Bei der ersten Quelle wird in einem Spannungsbereich von 0 – 25 V und bei der zweiten mit ein Spannungsbereich von 0 – 30 V gearbeitet. Für die Messungen mit einer Spule, wird jeweils der andere Stromkreis nicht geschlossen, sodass sich der prinzipielle Aufbau nicht veränderte.



Abbildung 23: Messaufbau – Nobili-Galvanometer

In der Abbildung 24 ist die Schaltskizze für die Experimente dargestellt. Zu sehen ist die Anordnung um einen der beiden Spulendrähte in Betrieb zu nehmen. Dabei stehen „A“ und „B“ jeweils für den Anfang bzw. das Ende eines Spulendrahtes. Die Zahlen beschreiben ob es sich um den „ersten“ bzw. den „zweiten“ Spulendraht handelt. Für den Abgleich der beiden Spulenteile wurden beide Spulendrähte gleichzeitig nach dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Schema in Betrieb genommen.

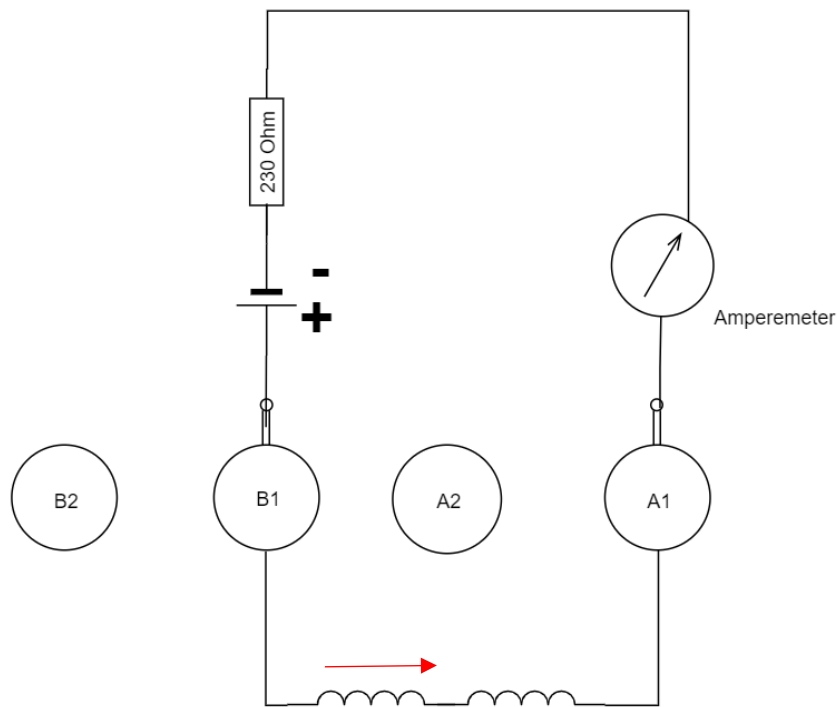


Abbildung 24: Schaltskizze zum Zeigen der Funktionsweise des Nobili-Galvanometers

3.3.2. Durchführung

Beim Aufbau ist darauf zu achten, dass die Magnetnadel sich in der Spulenmitte frei bewegen kann und nicht auf den Skalen aufliegt. Im Original ist hierfür eine Stellschraube vorhanden, welche den Faden spannen oder lockern kann, sodass die Doppelnadel richtig positioniert werden kann. Im restaurierten Modell gibt es im roten PVC-Hüttchen ebenfalls eine Schraube, mit welcher die Klemmposition des Drahtes für ein optimales Spiel der Doppelnadel variiert werden kann. Das PVC-Hüttchen ist im Messingrohr drehbar, damit die Anzeigenadel in die Nullposition gebracht werden kann. (siehe Abbildung 25). Hierbei ist es wichtig darauf zu achten, dass das Galvanometer in der Waage ist und die Nullposition der Anzeigenadel in Richtung des Erdmagnetfeldes ausgerichtet ist.



Abbildung 25: Hütchen mit Stellschraube für Positionieren der Nadel und Ausdrillen des Fadens

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass ein ausreichender Vorwiderstand verwendet wird, ($> 200 \text{ Ohm}$), da das Gerät bereits bei kleinen Strömen (mA) empfindlich ist.

Wenn die Messanordnung wie oben beschrieben aufgebaut ist, wird die Stromquelle eingeschaltet und die Stromstärke langsam erhöht. Bereits bei wenigen Milliampere wird das Gerät einen Ausschlag anzeigen. Ist ein Ausschlag zu erkennen, so wird die Stromquelle abgeschaltet und nun anstatt des ersten Spulendrahtes der zweite in Betrieb genommen. Nun ist es wichtig dieselbe Stromstärke, wie beim ersten Spulendraht einzustellen. Nun sollte das Galvanometer denselben Ausschlag wie zuvor anzeigen.

Abschließend werden beide Spulendrähte in Betrieb genommen. Hier muss darauf geachtet werden, dass die beiden bifilar gewickelten Spulendrähte gegenläufig vom Strom durchflossen werden, damit der Null-Abgleich durchgeführt werden kann. Nach dem Anschließen werden beide Stromquellen eingeschaltet und auf denselben Wert eingestellt. Nun sollte das Gerät keinen Ausschlag anzeigen.

3.3.3. Ergebnisse

Durch die Inbetriebnahme des ersten Spulendrahtes zeigte sich, dass das Galvanometer gut funktioniert und schon bei kleinen Strömen vergleichsweise große Ausschläge vorweist. Bei einem Strom von $(50 \pm 1) \text{ mA}$ zeigte die Nadel einen Ausschlag von $(15 \pm 2)^\circ$ an. In Abbildung 26 ist der Ausschlag der Nadel dargestellt. Aus Gründen der besseren Sichtbarkeit der Nadel wurde die Skala nicht ins Bild mitaufgenommen.

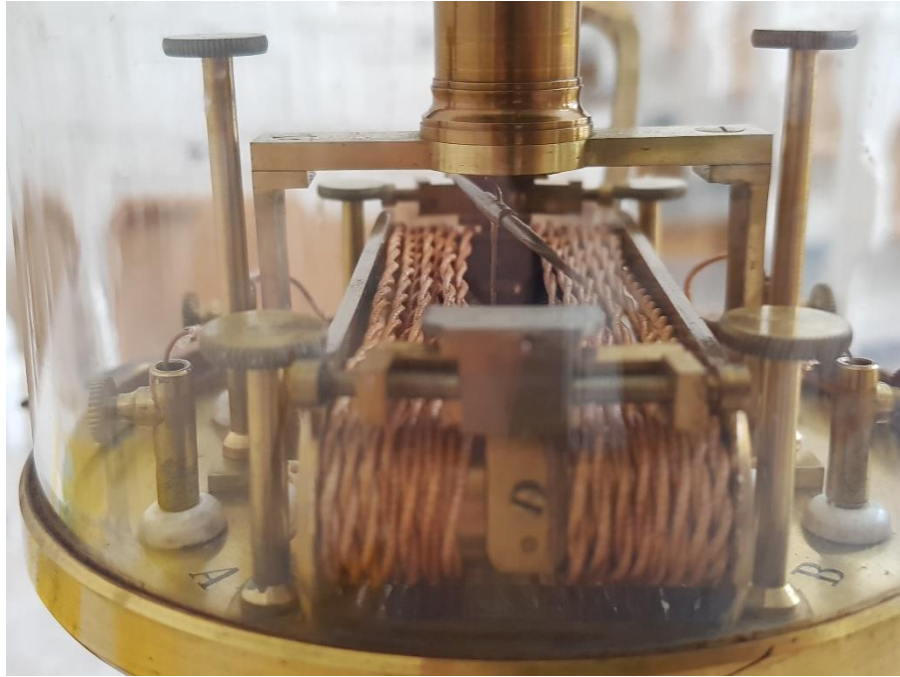


Abbildung 26: Ausschlag der Magnetnadel – Nobile - Galvanometer

Der betragsmäßig gleiche Zeigerausschlag zeigte sich auch, als nur der zweite Spulendraht in Betrieb genommen wurde. Vor den Messungen wurde das Gerät mithilfe der Wasserwaagen und einer Kompassnadel wie in der Durchführung besprochen ausgerichtet.

Bei gleichzeitiger Inbetriebnahme beider Spulendrähte zeigte das Gerät innerhalb der Messgenauigkeit von $(0 \pm 2)^\circ$ keinen Ausschlag.

3.3.4. Diskussion

Mithilfe der Messungen der einzelnen Spulendrähte konnte gezeigt werden, dass das Messwerk gut funktioniert. Jedoch muss hinzugefügt werden, dass der gerissene Originalfaden und die Originalabdeckung mit Stellschraube ausgetauscht werden mussten, um das Galvanometer nach Nobili funktionsfähig zu machen. Durch den Null-Abgleich zeigte sich auch, dass beide Spulen sehr präzise angefertigt wurden, da dieser bis auf die Messungenauigkeit sehr gut funktionierte. Die Messungenauigkeit kam neben dem schwierigen Ablesen auch durch ein Pendeln der Nadel zustande. Diese bewegte sich bereits bei kleinsten Erschütterungen, wodurch beim Arbeiten große Geduld gefragt war. In Anbetracht dessen, dass dieses Gerät ungefähr 185 Jahre alt ist, war es überraschenderweise durchaus funktionsfähig. Man konnte gut erkennen, dass durch den Multiplikator die Wirkung des durch den Strom erzeugten Magnetfeldes deutlich verstärkt wurde. Dadurch ist es möglich mit diesem Gerät Ströme im Milliampere – Bereich messen.

4. Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897

4.1. Aufbau des Gerätes

Dieses Differentialgalvanometer weist einige Unterschiede zum Galvanometer nach Nobili auf. Es besitzt zwar ebenfalls einen Stabmagneten in der Mitte der Spulen, welcher mit der Anzeigenadel über der Skala verbunden ist, jedoch hat es keine bifilare Wicklung, und deutlich mehr Windungen. Das Galvanometer ist um 1900 datiert, könnte aber durchaus auch bereits einige Jahrzehnte früher gebaut worden sein. Es ist $(16,0 \pm 0,5)$ cm hoch und hat eine runde Stellfläche mit einem Durchmesser von $(17,0 \pm 0,2)$ cm. Der obere Messingring hat einen Durchmesser von $(11,0 \pm 0,1)$ cm. In Abbildung 27 ist das Gerät von der Frontseite zu sehen. Der Messapparat steht auf einem Holzsockel, welcher selbst nicht zur Messvorrichtung gehört.



Abbildung 27: Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897

Das Dreibein und der Rahmen des Apparats bestehen aus Messing. Am linken Rand von Abbildung 27 sind zwei Anschlüsse des Gerätes zu erkennen, zwei weitere sind auf der Rückseite und somit nicht zu sehen. Diese sind mit den Kennzeichnungen „A1, A2, B1, B2“ beschriftet und zeigen somit den Anfang und das Ende der beiden Spulen an. Dabei gilt, dass die Ziffer für jeweils eine Spule steht und die Buchstaben Anfang und Ende symbolisieren. Beide sind von gleicher Bauart und zu hoher Wahrscheinlichkeit aus demselben Material und mit gleich vielen Windungen. Widerstandsmessungen mit einem „VC 820 Voltcraft“ – Multimeter zeigen, dass beide Spulen einen Wert von $(800 \pm 1) \Omega$ aufweisen. Oben auf dem Gerät befindet sich eine Justierschraube, welche den Faden und damit das Nadelpaar festhält. Die Anzeigenadel hängt knapp über der Skala, die mit einem

runden Stabmagnet zwischen den Spulen verbunden ist, der ähnlich wie beim Galvanometer nach Nobili ausgeführt ist. Durch einfaches Drehen der Justierschraube kann man über den Faden die Nadel absenken oder anheben. Des Weiteren findet man zwei weitere Schrauben, welche als Transportsicherung der Nadel dienen (siehe Abbildung 27, Pfeil 1 und Pfeil 2). Die untere der beiden Schrauben (Pfeil 1) justiert ein gabelförmiges Halteplättchen für die Anzeigenadel des Galvanometers. Die obere Schraube (Pfeil 2) bewegt den Messingbügel in der Mitte des Bildes zur Nadel hin oder von der Nadel weg. Dadurch kann beim Transport die Nadel arretiert bzw. der Faden gegen Verdrillungen geschützt werden. Diese Sicherheitsvorkehrungen sollten stets getroffen werden, wenn das Galvanometer transportiert wird, da das Gerät sonst durch mögliche Erschütterungen oder schnelle Bewegungen leicht beschädigt werden kann. In Abbildung 28 ist die Stellschraube für die Länge des Fadens besser und die Skala des Galvanometers zu sehen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Gerät in Messjustierung dargestellt ist, da das Halteplättchen unten und der Messingbügel eingefahren ist.



Abbildung 28: Skala des Differentialgalvanometers Nr. 2897

4.2. Experiment

4.2.1. Aufbau des Experiments

In Abbildung 29 ist der Aufbau des Experiments skizziert. Als Stromquellen dienten für Spule 1 ein „DC Power Supply NTL 05“ und für Spule 2 ein „EL352 Power Supply“. Die Spannungsbereiche sind die gleichen, wie bei den Experimenten mit dem Galvanometer nach Nobili. Da dieses Galvanometer wesentlich empfindlicher als das Galvanometer nach Nobili ist, diente jeweils ein Widerstand von $1000\ \Omega$ als Vorwiderstand. Die Ströme in den Stromkreisen wurden mithilfe eines „Escort 97 Multi-Display Multimeter“ bzw. eines „VC 820 Voltcraft“ – Multimeters gemessen.

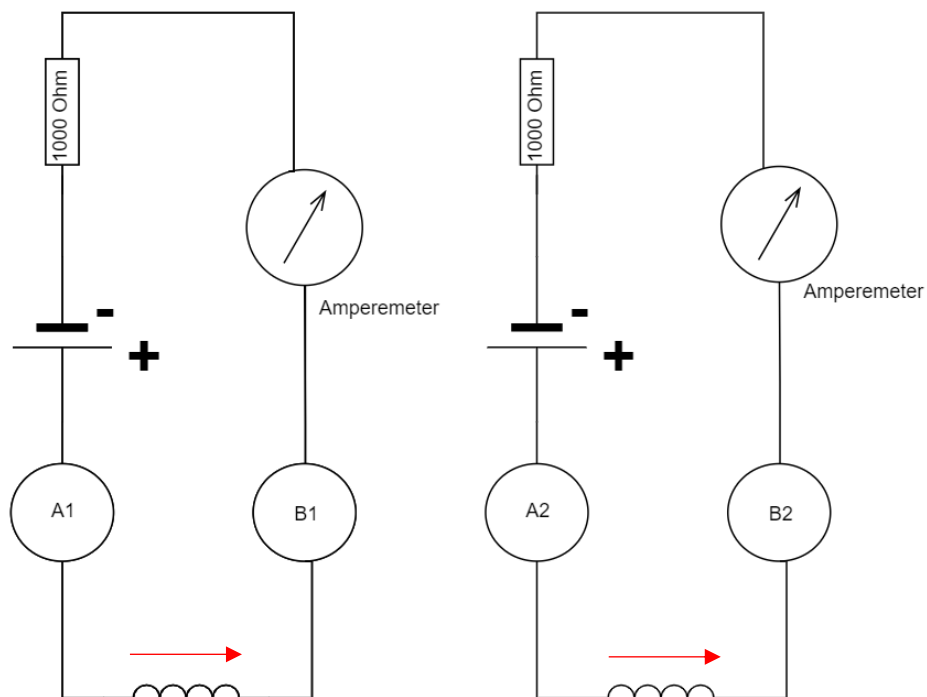


Abbildung 29: Schaltskizze des Experiments mit dem Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897

4.2.2. Durchführung

Beim Aufbau ist verstärkt darauf zu achten, dass die Nadel richtig justiert ist und der Faden kein Torsionsmoment aufweist. Dieser ist im Vergleich zum Galvanometer nach Nobili wesentlich empfindlicher und daher schwieriger in die richtige Position zu bringen. Da dieses Gerät sehr empfindlich auf Ströme reagiert, ist darauf zu achten, dass in jedem Fall ausreichende Vorwiderstände in den Stromkreis geschaltet sind, da das Gerät ansonsten mit hoher Wahrscheinlichkeit beschädigt werden könnte.

Gemäß Abbildung 29 werden durch beide Stromkreise gleiche Ströme (im Rahmen der Messunsicherheit) geschickt und beobachtet, wie sich die Magnetnadel verhält. Hier sollte, egal bei welcher Stromstärke, kein Ausschlag zu sehen sein. Da dieses Galvanometer auch sehr kleine Ströme (im Mikroampere – Bereich) anzeigen kann, ist mit Strömen in dieser Größenordnung zu beginnen und sukzessive kann der Strom erhöht werden. Dabei ist immer darauf zu achten, ob die Nadel eine vom Nullpunkt verschiedene Winkelzahl anzeigt. Des Weiteren ist aufgrund der Empfindlichkeit darauf zu achten, dass beide Ströme in ungefähr gleichem Maße erhöht werden, um einen zu großen Ausschlag der Nadel zu vermeiden. Hier ist anzumerken, dass die Schaltung nach Abbildung 12 vorteilhaft gewesen wäre, andererseits sollte eine möglichst einfache Regulierung der Spulenströme gewahrt bleiben.

4.2.3. Ergebnisse

In der folgenden Tabelle 1 sind die Messergebnisse des Experimentes zusammengefasst. Die Bezeichnungen I_1 und I_2 stehen dabei für die Ströme durch die erste bzw. die zweite Spule. Der Winkel α ist die Ablenkung der Magnetnadel vom Nullpunkt.

Nr.	$I_1 (\mu A)$	$I_2 (\mu A)$	$\alpha (^{\circ})$
1	98,1	97,1	15
2	172,9	173,4	10
3	315,1	315,6	5
4	405	406,1	5
5	503	504	5
6	602	599	5
7	705	704	5

Tabelle 1: Messergebnisse Siemens und Halske Nr. 2897

Für die Stromstärke durch die erste Spule gilt eine Messunsicherheit von $\Delta I_1 = 10 \mu\text{A}$. Die Stromstärke im zweiten Stromkreis ist mit einer Unsicherheit von $\Delta I_2 = 3 \mu\text{A}$ gegeben. Das Ablesen des Winkels funktioniert bei diesem Galvanometer aufgrund der Winkelanzeige zwar besser als bei jenem nach Nobili, jedoch zeigt der Faden vergleichsweise starke Torsionsmomente auf, wodurch die Nadel pendelt. Daher ist von einer Messunsicherheit von $\Delta \alpha = 2^\circ$ auszugehen.

In Abbildung 30 ist der Verlauf der Ablenkung der Magnetnadel vom Nullpunkt bei steigender Stromstärke dargestellt.

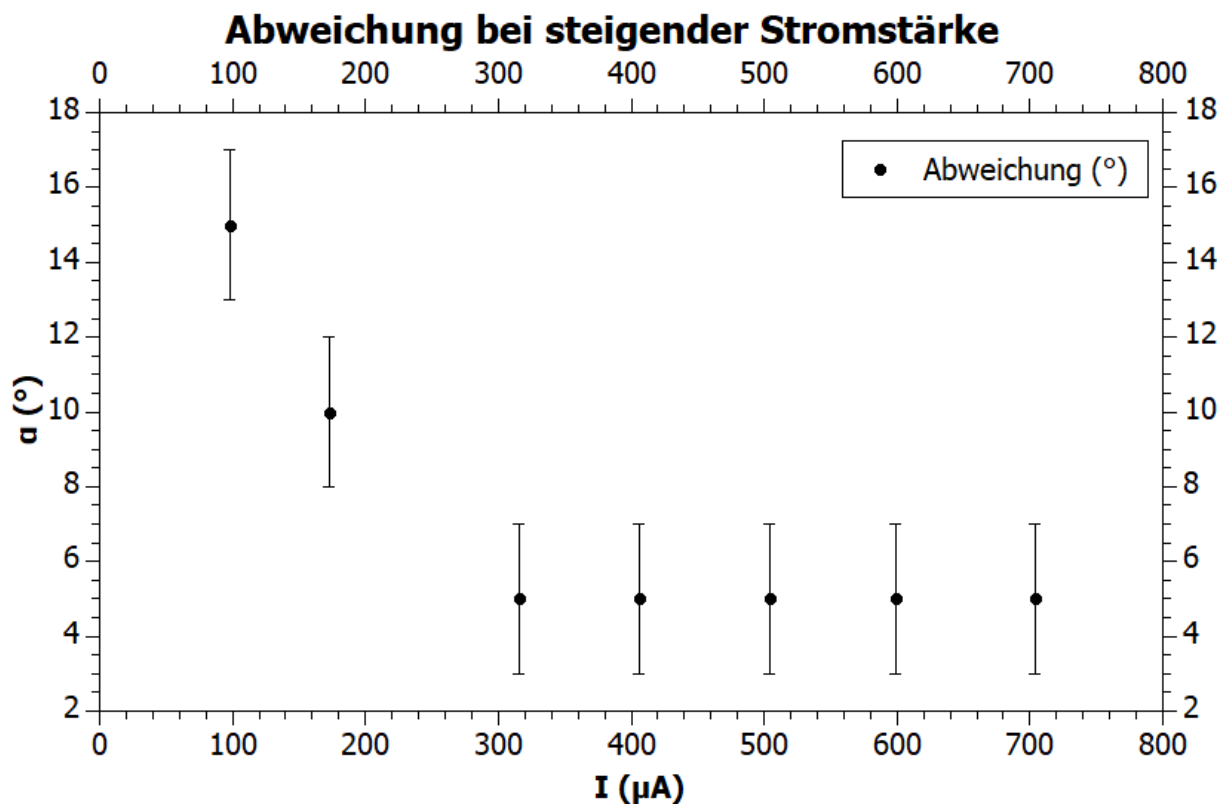


Abbildung 30: Abweichung bei steigender Stromstärke – Differentialgalvanometer von Siemens und Halske

Man kann an dieser Grafik erkennen, dass die Position der Nadel bei kleineren Stromstärken mehr vom Nullpunkt abweicht als bei größeren Strömen. Ab $315 \mu\text{A}$ bleibt die Abweichung der Magnetnadel konstant bei $\alpha = (5 \pm 2)^\circ$.

4.2.4. Diskussion

Das Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897 kann aufgrund der erhöhten Windungszahlen der beiden Spulen im Vergleich zum Galvanometer nach Nobili kleinere Ströme anzeigen. Dies ist in den Ergebnissen auch gut zu sehen, da es bereits bei einigen Mikroampere Reaktionen zeigt.

Man muss jedoch auch bemerken, dass ein Ausschlag, welcher bei allen Strömen zu beobachten war, eigentlich nicht vorhanden sein sollte. Aufgrund des Aufbaus als Differentialgalvanometer sollte die Magnetnadel keinen Ausschlag zeigen, wenn durch beide Spulen gleich große und entgegengesetzte Ströme laufen (siehe Kapitel 2.3). In Abbildung 30 kann man aber erkennen, dass bei größer werdenden Strömen die Ablenkung der Magnetnadel aus der Nulllage immer kleiner wird, bis sie einen konstanten Wert annimmt. Die größere Abweichung im Bereich von $100 - 200 \mu A$ liegt wohl vor allem an der Messunsicherheit der Multimeter. Da diese im Vergleich zu den gemessenen Werten recht groß (ca. 10%) ist, resultiert eine ebenso große Ablenkung der Nadel von $\alpha = 15^\circ$. Die trotzdem verbleibende konstante Abweichung liegt womöglich daran, dass die Spulen unter Umständen doch nicht vollständig gleich sind oder an den bereits angesprochenen Messunsicherheiten der Ströme. Da keine Hinweise auf die Anzahl der Windungen gegeben ist, können sich diese minimal unterscheiden. Dadurch würden die Spulen zwei unterschiedlich starke Magnetfelder erzeugen, welche die Nadel unterschiedlich stark ablenken.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Aufnahme der Ergebnisse war die Torsion des Fadens. Dadurch pendelte die Nadel nahezu immer, wodurch die Ablesung der Abweichungen sich als nicht trivial erwies. Dadurch ergab sich für diese eine relative große Messunsicherheit, welche ebenfalls in Abbildung 30 zu erkennen ist. Abschließend ist zu sagen, dass das Galvanometer von Siemens und Halske durchaus auf Ströme ab $100 \mu A$ reagiert und diese daher messen kann. Jedoch sind bei der Verwendung als Differentialgalvanometer Vorkehrungen treffen, welche in Kapitel 2.3 beschrieben werden, damit die mögliche geringfügige Ungleichheit der Spulen berücksichtigt werden kann.

5. Tangentenbussole nach Gaugain

5.1. Aufbau des Gerätes

Die Tangentenbussole nach Gaugain – eine Dauerleihgabe aus der Sammlung physikalischer Geräte der HTL Ottakring – ist in Abbildung 31 zu sehen (Datierung ca. 1880). Das Dreibein besteht aus Holz und hat am unteren Ende zwei Anschlüsse um die Stromzufuhr zu ermöglichen. Die Bussole ist $(53,0 \pm 0,5)$ cm hoch und benötigt eine gedachte dreieckige Stellfläche mit einer Kantenlänge von $(38,0 \pm 0,5)$ cm. Der maximale Durchmesser des Holzrings, der 15 Windungen trägt, beträgt $(31,0 \pm 0,2)$ cm. Bemerkenswert ist, dass die Tangentenbussole aus einer halben konischen Helmholtzspule anstatt einer Leiterschleife besteht. Der Geometrie einer Helmholtzspule entsprechend, ist das Kompassgehäuse (Durchmesser von $(13 \pm 0,1)$ cm) etwas horizontal aus dem Zentrum der Spule gerückt. Die Winkelmarkierungen, die Magnetnadel sowie deren Transportsicherung sind in Abbildung 32 zu sehen.



Abbildung 31: Tangentenbussole nach Gaugain



Abbildung 32: Magnetnadel und Transportsicherung - Tangentenbussole nach Gaugain

5.2. Experiment

5.2.1. Aufbau des Experiments

Die Schaltskizze des Experiments mit der Tangentenbussole nach Gaugain ist in Abbildung 33 skizziert. Als Stromquelle wird ein „DC – Power Supply NTL 05“ (0 – 25 V) verwendet. Mithilfe eines „VC – 820“ – Multimeters wird die Stromstärke im Stromkreis gemessen. Die Tangentenbussole selbst ist in Serie zu einem Vorwiderstand geschaltet, welcher einen Widerstandswert von $230\ \Omega$ aufweist.

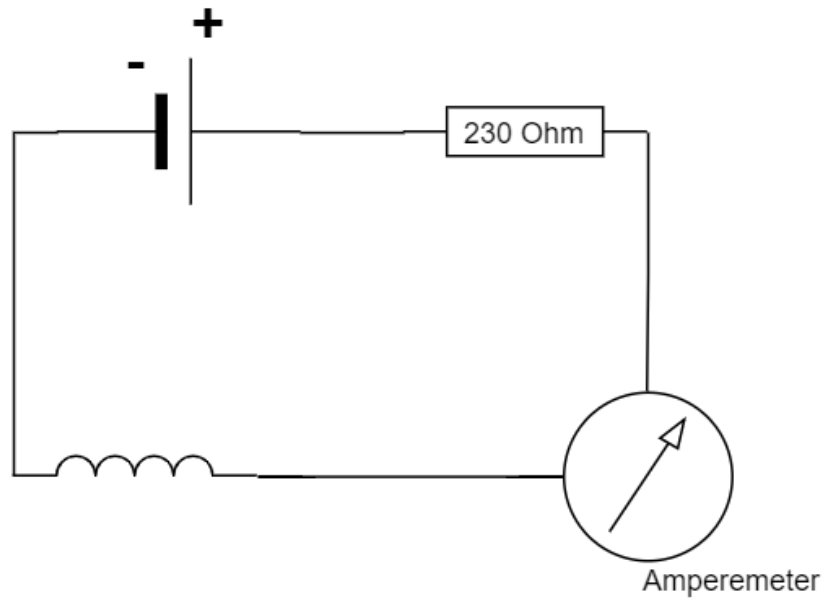


Abbildung 33: Schaltskizze - Tangentenbussole nach Gaugain

5.2.2. Durchführung

Zuerst wird der Radius der Tangentenbussole bestimmt. Dieser wird benötigt um das Magnetfeld zu berechnen, welches durch die halbe Helmholtzspule erzeugt wird. Aus dem Außendurchmesser d_A und dem Innendurchmesser d_I ergibt sich ein mittlerer Radius $\bar{R}$. Mit $\bar{R}$ und der Differenz der Radien h wird anschließend durch Gleichung (15) die Größe R bestimmt. Des Weiteren ist die Anzahl der Windungen n durch Abzählen zu bestimmen. Dies ist gut möglich, da die Windungen deutlich sichtbar sind.

Sind alle Parameter bestimmt, kann die Tangentenbussole in den Stromkreis integriert werden und das Experiment gestartet werden. Die Stromstärke wird so erhöht, dass der Ausschlag der Magnetnadel in 10° - Schritten zunimmt. Der mit dem Digitalmultimeter gemessene Wert der Stromstärke I_{DM} wird ebenfalls notiert. Aus den Werten für I_{DM} kann mit Gleichung (14) jeweils ein Wert für das erzeugte Magnetfeld B_{TB} bestimmt werden. Mittels Gleichung (20) werden schließlich Werte für das Erdmagnetfeld berechnet. Leider stand kein ausreichend genaues Messgerät für die direkte Messung des Erdmagnetfeldes zur Verfügung. Wohl konnte aber mit einem Teslameter die Größenordnung von $(20 \pm 10) \mu T$ bestätigt werden.

Umgekehrt können mithilfe eines Wertes für das Erdmagnetfeld aus der Literatur theoretische Werte für die zu den Abweichungswinkeln passenden Stromstärken berechnet werden. Damit können Genauigkeitsüberprüfungen gemacht werden.

5.2.3. Ergebnisse

Mithilfe eines Maßbandes wurden zuerst der Außendurchmesser $d_A = (296 \pm 1) \text{ mm}$ und der Innendurchmesser $d_I = (217 \pm 1) \text{ mm}$ gemessen, wodurch sich für äußeren bzw. inneren Radius $R_2 = (148 \pm 1,0) \text{ mm}$ bzw. $R_1 = (108,5 \pm 1,0) \text{ mm}$ ergeben. Aus diesen Werten ergibt sich ein mittlerer Durchmesser $\bar{d} = \frac{296+217}{2} = (256,5 \pm 2,0) \text{ mm}$ bzw. ein mittlerer Radius $\bar{R} = (128,25 \pm 1,00) \text{ mm}$. Die Differenz der Radien ist somit $h = (39,5 \pm 1,0) \text{ mm}$. Mithilfe von Gleichung (15) folgt $R = (127 \pm 1) \text{ mm}$. Die Magnetnadel hat eine Länge $L = (49,0 \pm 0,5) \text{ mm}$, wodurch sich das Verhältnis $\frac{L}{\bar{d}} \approx 0,191$ ergibt. Durch das Abzählen der Windungen des Gerätes ist die Windungszahl mit $N = 15$ gegeben. Tabelle 2 zeigt die mithilfe des Multimeters, gemessene Stromstärke I_{DM} , den Abweichungswinkel α der Magnetnadel, das nach Abschnitt 2.2.2.3 zu erwartende Magnetfeld B_{TB} im Zentrum der Bussole und das daraus berechnete Erdmagnetfeld B_E . Das Magnetfeld B_{TB} wird dabei mit Gleichung (14) berechnet, wobei diese zusätzlich mit dem Faktor $\frac{1}{2}$ zu multiplizieren ist, da nur eine der beiden Helmholtzspulen vorhanden ist. Das Erdmagnetfeld wurde abschließend mit Gleichung (20) ermittelt.

Nr.	$I_{DM} \text{ (A)}$	$\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	$B_{TB} \text{ (}\mu\text{T)}$	$B_E \text{ (}\mu\text{T)}$
1	0,080	10	4,24	24,05
2	0,162	20	8,59	23,59
3	0,251	30	13,30	23,04
4	0,359	40	19,03	22,68
5	0,514	50	27,24	22,86
6	0,739	60	39,17	22,61
7	1,192	70	63,18	23,00
8	2,323	80	123,13	21,71

Tabelle 2: Berechnung des Erdmagnetfeldes mittels Tangentenbussole nach Gaugain

Die Stromstärke ist mit einer Messunsicherheit von $\Delta I_{DM} = 0,005 \text{ A}$ gemessen worden. Da der Winkel bei dieser Tangentenbussole gut abzulesen war, jedoch ein leichtes Pendeln gegeben war, ist von einer Messunsicherheit von $\Delta \alpha = 1^\circ$ auszugehen. Daraus resultierte eine mittlere Messunsicherheit für den Tangens des Winkels von 1% des berechneten Wertes. Die aus diesen Werten resultierende Messunsicherheit für das erzeugte Magnetfeld liegt bei durchschnittlich $\Delta B_{TB} = 0,538 \mu\text{T}$. Berechnet man nun die Messunsicherheit für das Erdmagnetfeld B_E so liegt diese bei $\Delta B_E = 1,92 \mu\text{T}$. Die Standardabweichung der Werte für das Erdmagnetfeld liegt bei $\sigma_{B_E} = 0,65 \mu\text{T}$

Betrachtet man nun die Tangentenbussole so, wie sie früher verwendet wurde, so ist aus dem Abweichungswinkel α die Stromstärke I_{ber} zu berechnen. Dafür berechnet man sich mittels Gleichung (20) das erzeugte Magnetfeld, woraus man bei Kenntnis des Radius R und der Windungszahl n aus Gleichung (14) den Strom berechnen kann. Es wird $B_E = (20,8 \pm 0,1) \mu\text{T}$ verwendet.⁵² In Tabelle 3 sind die berechneten Ströme den jeweiligen Winkeln zugeordnet.

Nr.	α (°)	B_{TB} (μT)	I_{ber} (A)	I_{DM} (A)
1	10	3,659	0,069	0,080
2	20	7,552	0,142	0,162
3	30	11,98	0,226	0,251
4	40	17,41	0,329	0,359
5	50	24,73	0,467	0,514
6	60	35,94	0,678	0,739
7	70	57,01	1,076	1,192
8	80	117,7	2,220	2,323

Tabelle 3: Berechnung der Stromstärke mittels Tangentenbussole nach Gauß

⁵² Vgl. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/produkte-und-services-1/online-deklinationsrechner>

Für das von der Tangentenbussole erzeugte Magnetfeld B_{TB} beträgt die Messunsicherheit $\Delta B_{TB_1} = 0,318 \mu T$ für kleine Ströme und $\Delta B_{TB_2} = 5,232 \mu T$ für größere Ströme. Daher folgt eine Unsicherheit von $\Delta I_{ber} = 0,012 A$ für die Stromstärke I_{ber} .

5.2.4. Diskussion

Mithilfe der digital gemessenen Stromwerte berechnete Stärke des Erdmagnetfeldes (Tabelle 2) bewegt sich in der Größenordnung jener Stärke, welche in der Literatur angegeben ist. Wie oben bereits beschrieben, misst dieses in Wien ca. $21 \mu T$. Das zeigt, dass die mittlere Stärke der berechneten Werte $\overline{B_E} = (22,94 \pm 0,65) \mu T$ sich in dieser Größenordnung bewegt. Daher lässt sich sagen, dass sich mithilfe der Tangentenbussole nach Gauß die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes gut bestimmen lässt.

Abbildung 34 zeigt einen Vergleich der mit dem Multimeter gemessenen und der berechneten Stromstärke. Es ist ein ähnlicher Verlauf dieser zu sehen, wobei die berechnete Stromstärke stets etwas unter dem Wert des Multimeters liegt. Dies kann auch in Tabelle 3 nachvollzogen werden, indem die Spalten I_{ber} und I_{DM} verglichen werden.

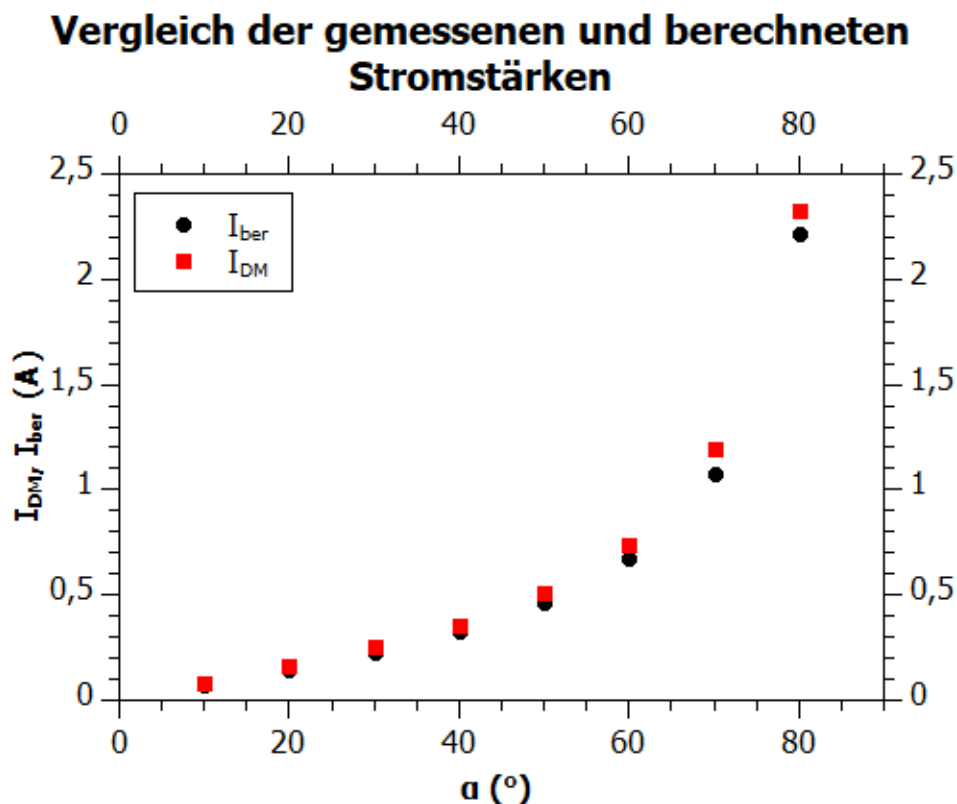


Abbildung 34: Vergleich der Stromstärken vs. Ausschlagwinkel – Tangentenbussole nach Gauß

Man kann also schließen, dass man mithilfe der Tangentenbussole nach Gauss den durch die konische Helmholtzspulen-Hälfte fließenden Strom bis auf einige wenige Milliampere gut bestimmen kann.

Wilke beschreibt die Wirkung einer Tangentenbussole wie folgt:

„Die Intensität eines Kreisstromes, welcher im magnetischen Meridian steht und auf eine in seiner Axe aufgehängte kleine Magnetnadel wirkt, ist proportional der Tangente des Ablenkungswinkels.“⁵³

Dieser Sachverhalt (siehe Gleichung 18 und 20) ist mit den Werten aus dem Experiment gut darzustellen. In Abbildung 35 sind in Rot die Werte dargestellt, welche mit dem Multimeter aufgenommen worden sind. Jene Werte, die aufgrund der Abweichung der Nadel berechnet wurden sind schwarz. Man erkennt gut, dass bei beiden Messreihen die Linearität zum Tangens des Winkels gegeben ist. Tendenziell wurde mit der Tangentenbussole weniger Strom gemessen, als es das Multimeter tat. Diese Abweichungen befinden sich jedoch innerhalb der Messunsicherheit.

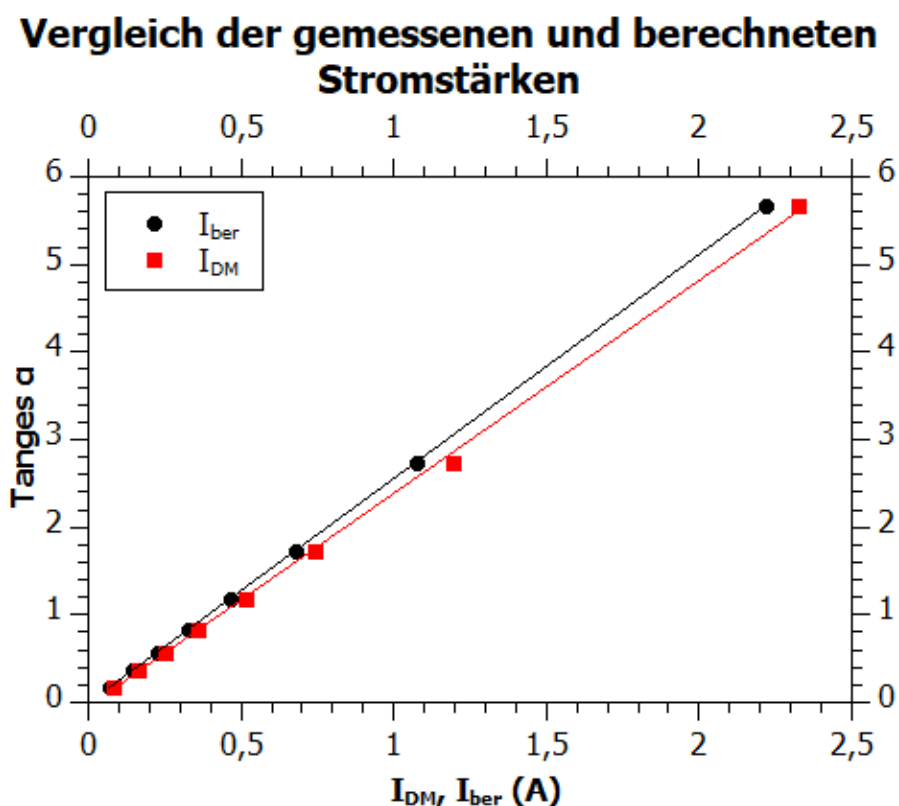


Abbildung 35: Tangens des Ausschlagwinkels vs. Stromstärken – Tangentenbussole nach Gauss

⁵³ (Wilke, 1884, S. 34)

Sowohl bei jenen Werten, welche durch das Multimeter aufgenommen worden sind, als auch jenen, welche mithilfe des Ablenkungswinkels berechnet worden sind, ist die Linearität, welche Wilke beschrieben hat, gezeigt.

6. Tangentenbussole von Hartmann & Braun

6.1. Aufbau des Gerätes

Abbildung 36 zeigt eine Tangentenbussole von Hartmann & Braun. Sie wurde im Jahre 1897 erworben. Die Bussole ist $(57,0 \pm 0,5)$ cm hoch und das Dreibein benötigt die Fläche eines Dreiecks mit einer Seitenkante von $(25,0 \pm 0,5)$ cm. Das Dreibein besteht aus Holz und hat drei Stellschrauben an den Beinen um das Gerät entsprechend zu justieren. Auf einem Holzsockel steht eine weitere runde Holzplatte, welche ebenfalls mit drei Stellschrauben in die Waage gebracht werden kann. In der Mitte der runden Platte befindet sich ein Schraubengewinde, auf welches ein Holzzyylinder geschraubt ist. Die beiden Teile sind in Abbildung 37 separat voneinander abgebildet.



Abbildung 36: Tangentenbussole von Hartmann & Braun



Abbildung 37: Einzelteile der Messvorrichtung – Tangentenbussole von Hartmann & Braun

Der Holzzylinder wiederum hat eine Glasröhre aufgesetzt. In dieser Röhre befindet sich der Faden, welcher mit der Anzeigevorrichtung verbunden ist. Wie in Abbildung 37 zu sehen ist, kann beim Holzzylinder die Abdeckung abgenommen werden. Dazu müssen die drei Schrauben, welche am Sockel der Glasröhre zu sehen sind, gelockert werden. Im Inneren – d.h. am Ende des Fadens – findet man einen runden Stab, an welchem ein magnetischer Ring befestigt ist. Ebenfalls an diesem Stab ist mittels federnder Klemme (Abbildung 38) der Spiegel befestigt. Dieser dient zur Reflexion eines Lichtstrahls, sodass man an einer externen Skala den Ablenkungswinkel ablesen kann. Direkt an der Unterkante des Spiegels befindet sich eine ca. 10 mm lange rot-grüne (unmagnetische) Anzeigenadel. Der Stab und der Spiegel sind in Abbildung 36 durch das Loch in der Mitte des Zylinders zu sehen.



Abbildung 38: Klemmvorrichtung für den Spiegel bei der Tangentenbussole von Hartman & Braun

Oben auf der Glasröhre findet man eine Stellschraube, mit welcher der Faden gespannt bzw. gelockert werden kann. Dabei wird der Faden entweder auf – oder abgewickelt. Diese Stellschraube befindet sich an einer Kupferkappe, welche ebenfalls entfernt werden kann. Rund um diese Konstruktion ist die Leiterschleife der Tangentenbussole angebracht. Diese hat einen äußeren Durchmesser von $(39,3 \pm 0,1)$ cm und besteht aus einem Kupferband mit einem rechteckigen Querschnitt $(6,9 \pm 0,1) \times (4,0 \pm 0,1)$ mm.

6.2. Restaurierungen

So wie beim Galvanometer nach Nobili war auch hier der Faden gerissen und musste ersetzt werden. Da die entsprechenden Öffnungen aber wesentlich größer und zugänglicher sind, als jene beim Gerät nach Nobili, stellte dies kein Problem dar. Allerdings stellte sich bei ersten Experimentierversuchen heraus, dass die Tangentenbussole keine Reaktion auf den fließenden Strom zeigt. Selbst bei einem kurzzeitigen Strom von elf Ampere war keine Bewegung des Spiegels zu beobachten. Bei genauerer Untersuchung wurde festgestellt, dass die eigentliche Magnetnadel fehlt, welche auf das erzeugte Magnetfeld der Bussole reagieren soll. Die kleine rot-grüne Nadel scheint nur zur Justierung zu dienen. Offenbar diente der ringförmige Permanentmagnet nicht nur zur Wirbelstromdämpfung in der angepassten Kupferschale, sondern auch als „Magnetnadel“⁵⁴. Auf die vorsichtige Näherung eines kleinen Stabmagneten zeigte das Gehänge dieser Bussole durchaus eine

⁵⁴ Vgl. (Frölich, 1905, S. 20)

Drehbewegung. Vermutlich ist einerseits die Magnetisierung des Ringes bereits zu schwach, andererseits müsste der Magnetring genau in die Mitte des Stromkreises positioniert werden (daher auch die langen Justierschrauben an der Messzelle) – mindestens 10 mm höher, was allerdings die Bauhöhe des Glasrohres (bzw. des unteren Abstandhalters) nicht zuließ. Um diesen Sachverhalt zu umgehen wurde der Zylinder samt Spiegel und Glasröhre entfernt. Ersetzt wurde dieser durch eine Konstruktion mit einem kleinen PVC-Becher, welcher verkehrt auf dem Sockel, welcher für den Zylinder vorgesehen ist, steht.

Auf den Becher wurde anschließend eine herkömmliche Kompassnadel platziert. Die Erhöhung mithilfe des Bechers ist notwendig, damit sich die Magnetenadel im Zentrum der Bussole befindet. Die Konstruktion ist in Abbildung 39 dargestellt.



Abbildung 39: Vorrichtung mit herkömmlicher Magnetenadel – Tangentenbussole von Hartman & Braun

6.3. Experiment

6.3.1. Aufbau und Durchführung

Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 40 dargestellt. Als Stromquelle wurde ein „PHYWE Stelltrafo mit Gleichrichter“ (0-40 V) verwendet. Für die Messung der Stromstärke im Stromkreis wurde ein „VC-820“-Multimeter benutzt. Der Vorwiderstand für dieses Experiment betrug 0,6 Ohm. Alle Geräte wurde in Serie zueinander geschaltet. Das Experiment und die Auswertung wurden analog zu Abschnitt 5.2.2. durchgeführt, jedoch wird das Magnetfeld mit Gleichung (13) berechnet.



Abbildung 40: Schaltung für die Tangentenbussole von Hartmann & Braun

6.3.2. Ergebnisse

Der kupferne Ring der Bussole hat einen mittleren Durchmesser von

$\bar{d} = (0,389 \pm 0,002) \text{ m}$. Daraus resultiert ein Radius $R = (0,195 \pm 0,001) \text{ m}$. Die

Magnetnadel hat eine Länge $L = (52,0 \pm 0,5) \text{ mm}$, wodurch sich das Verhältnis $\frac{L}{\bar{d}} \approx 0,134$

ergibt. Die durch die Messungen aufgenommenen Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Nr.	$I_{DM} \text{ (A)}$	$\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	$B_{TB} \text{ (}\mu\text{T)}$	$B_E \text{ (}\mu\text{T)}$
1	1,004	8	2,916	23,018
2	1,998	14	5,174	25,692
3	2,978	24	9,239	21,552
4	4,03	32	12,966	20,781
5	5,17	40	17,411	19,853
6	6,12	42	18,683	21,901
7	7,20	44	20,038	24,024
8	8,03	50	24,729	21,711

Tabelle 4: Ergebnisse - Tangentenbussole Hartmann & Braun . Berechnung von B_E .

Für die Stromstärke I_{DM} ergibt sich eine Messunsicherheit von $\Delta I_{DM} = 0,095 \text{ A}$. Da der verwendete Kompass bereits eine Winkelskala besitzt und die Nadel sehr wenig pendelte, waren die Werte gut abzulesen. Aufgrund der improvisierten Konstruktion ist jedoch trotzdem eine Unsicherheit von $\Delta \alpha = 1^\circ$ anzunehmen. Aus der Messungenauigkeit der Stromstärke ergibt sich die Unsicherheit für das erzeugte Magnetfeld mit $\Delta B_{TB} = 0,311 \mu\text{T}$. Mithilfe dieses Wertes und der Ungenauigkeit für den Ablenkungswinkel folgt die Unsicherheit für das Erdmagnetfeld $\Delta B_E = 1,100 \mu\text{T}$. Die Standardabweichung der Werte für das Erdmagnetfeld liegt bei $\sigma_{B_E} = 1,70 \mu\text{T}$.

In nachfolgender Tabelle sind jene Werte dargestellt, mit welchen die Stromstärke I_{ber} berechnet worden ist. Zusätzlich ist die Stromstärke I_{DM} angegeben, welche durch das Multimeter aufgenommen wurde. Das durch den Kupferring der Bussole erzeugte Magnetfeld ergibt sich hier durch Gleichung (18) und einem Erdmagnetfeld $B_E = (20,8 \pm 0,1) \mu\text{T}$.

Nr.	α (°)	B_{TB} (μT)	I_{ber} (A)	I_{DM} (A)
1	8	2,916	0,905	1,004
2	14	5,174	1,606	1,988
3	24	9,239	2,867	2,978
4	32	12,966	4,024	4,03
5	40	17,411	5,404	5,17
6	42	18,683	5,798	6,12
7	44	20,038	6,219	7,2
8	50	24,729	7,675	8,03

Tabelle 5: Berechnung der Stromstärke – Tangentenbussole von Hartman & Braun

Aus Tabelle 5 folgt eine Unsicherheit für das erzeugte Magnetfeld von $\Delta B_{TB} = 0,214 \mu T$. Daraus und aus der Ungenauigkeit für den Ablenkungswinkel $\Delta \alpha = 1^\circ$ resultiert die Unsicherheit für die Stromstärke $\Delta I_{ber} = 0,074 A$. Wie man an den Werten in Tabelle 5 erkennen kann bewegen sich die Ergebnisse der beiden Ströme I_{ber} und I_{DM} in derselben Größenordnung und weichen nur wenig voneinander ab.

6.3.3. Diskussion

In Tabelle 4 erkennt man, dass die Werte für das Erdmagnetfeld B_E sich sehr nahe an den Werten aus der Literatur befinden. Im Mittel ergibt sich hier eine Abweichung von $1 \mu T$. In Abbildung 41 ist der Vergleich der mit dem Multimeter gemessenen und der berechneten Stromstärke zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass beide Werte meist nahe beieinander liegen. Lediglich beim Ausschlag von $\alpha = 44^\circ$ ist eine größere Differenz von ca. $\Delta I = 0,8 A$ gegeben.

Vergleich der gemessenen und berechneten Stromstärke

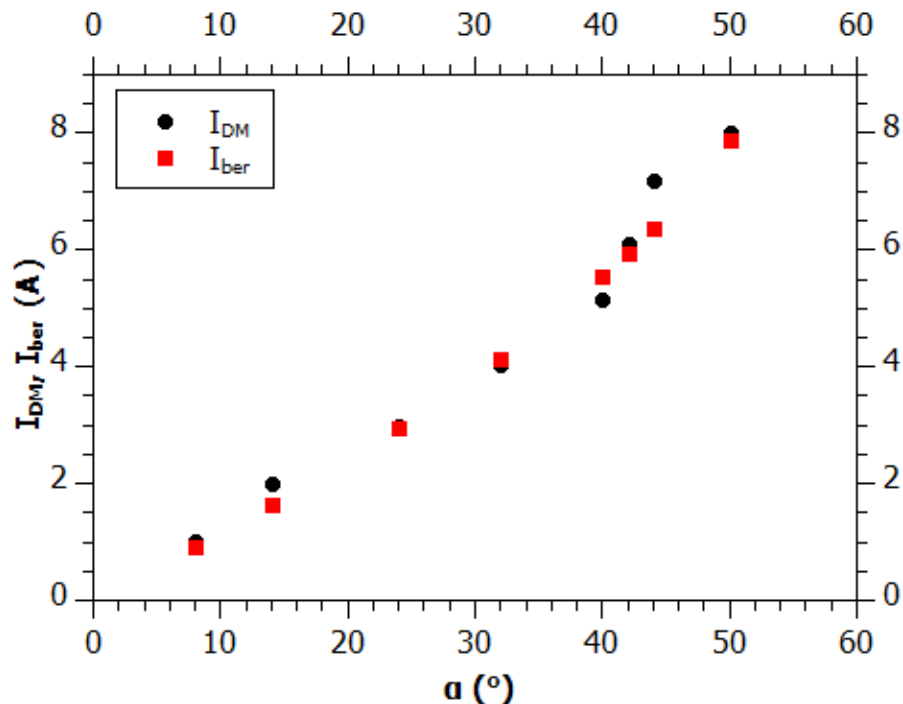


Abbildung 41: Stromstärke gegen Ausschlagwinkel – Tangentenbussole Hartmann & Braun

Es gilt anzumerken, dass die digital gemessenen Ströme I_{DM} eine größere Abweichung aufweisen, als die berechneten Werte I_{ber} . Das könnte möglicherweise an Erwärmungseffekten des Digitalmultimeters liegen.

Auch die Ergebnisse aus Tabelle 5 weisen durchaus gute Ergebnisse auf. Hier ergibt sich im Mittel eine Ungenauigkeit von rund 7%. Betrachtet man die Ergebnisse genauer, so fällt auf, dass die Datensätze zwei und sieben Ausreißer sind. Eliminiert man diese Werte, so ergibt sich eine Unsicherheit von ca. 4%. Daraus lässt sich schließen, dass trotz der improvisierten Messvorrichtung die Tangentenbussole von Hartmann & Braun sehr gute Ergebnisse liefert. Sowohl bei der Berechnung des Erdmagnetfeldes, als auch bei der Berechnung der Ströme liegt man immer im Bereich jener Zahlen, welche die Literatur bzw. moderne Geräte liefern.

Abbildung 42 zeigt, dass auch bei der Tangentenbussole von Hartmann & Braun der angegebene lineare Zusammenhang vom Tangens des Winkels und der Stromstärke gegeben ist, welcher von Wilke beschrieben wird. Jedoch ist zu erkennen, dass die Messpunkte, welche mit dem Multimeter aufgenommen wurden eine größere Abweichung von der Geraden aufweisen, als jene Messpunkte, welche mithilfe der Tangentenbussole berechnet wurden.

Vergleich der Linearität zwischen der Tangente eines Winkels und der Stromstärke

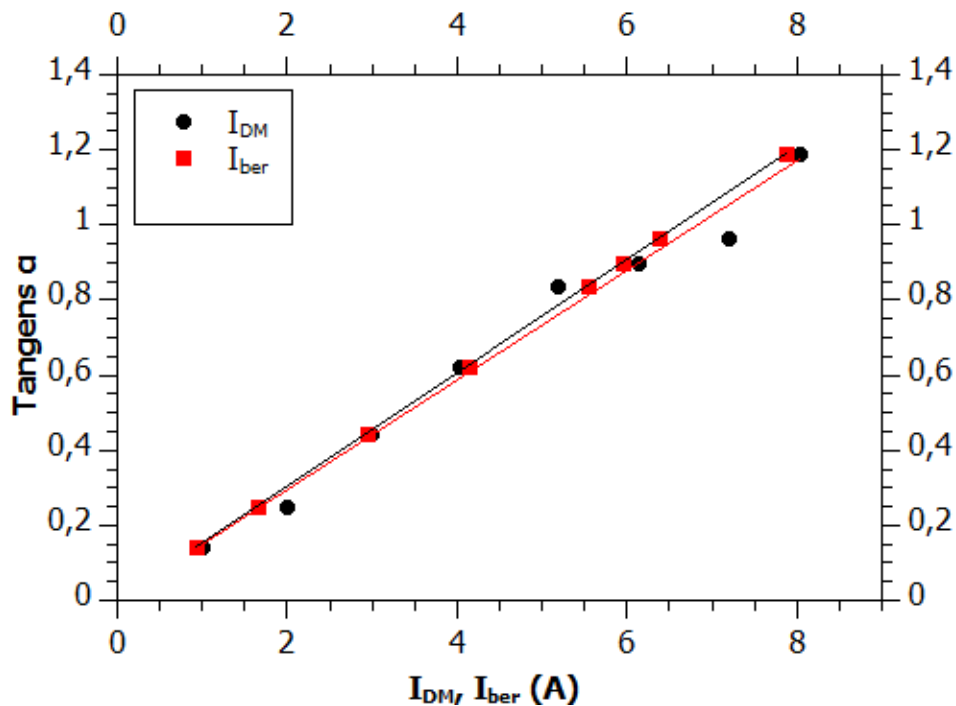


Abbildung 42: Tangentenbussole Hartmann & Braun - Tangens gegen Stromstärke

7. Tangenten – und Sinusbussole Ekling Nr.14

7.1. Aufbau des Gerätes

Die Tangenten – und Sinusbussole Nr. 14 von Johan Michael Ekling (Datierung vor 1850) ist in Abbildung 43 dargestellt und hat eine Höhe von $(43,0 \pm 0,5)$ cm. Zu sehen ist ein Dreibein aus Holz, welches eine dreieckige Fläche mit einer Seitenkante von $(25,0 \pm 0,5)$ cm benötigt und mit drei Stellschrauben versehen ist. Diese dienen der Justierung des Gerätes. Am unteren Ende im Zentrum befinden sich die Anschlüsse der Bussole. Bei diesen sind ebenfalls Schrauben zu finden, welche zum Festklemmen von Drähten dienen. In der Mitte des Gerätes findet man einen horizontalen, Teilkreis zur Verwendung als Sinusbussole. Der Stromring mit der fix verbundenen Kompassbussole kann relativ zur dieser Winkelskala verdreht werden. Die kreisförmige Leiterschleife hat einen äußeren Durchmesser von $d = (22,5 \pm 0,2)$ cm. Im Zentrum dieser ist das Gehäuse montiert, in welchem sich die Magnetnadel befindet. Am Steg des Gehäuses ist zusätzlich eine Wasserwaage angebracht, die der Einstellung der Bussole dient.



Abbildung 43: Tangenten – und Sinusbussole - Ekling Nr. 14

Sowohl die Leiterschleife, als auch das Gehäuse bestehen aus demselben Metall. Vermutlich handelt es sich dabei um eine Aluminium, Zinn - oder Zink-Legierung. Wie bei Tangentenbussolen meist üblich, ist nur der zentrale Teil der Anzeigenadel magnetisch. Dieser ist zusätzlich mit einer Nadel verlängert, welche selbst nicht magnetisch ist und somit lediglich der besseren Anzeige dient. Das Gehäuse ist in Abbildung 44 dargestellt und hat einen Durchmesser von $(13,0 \pm 0,1)$ cm. Hier erkennt man, dass einer der beiden Anzeigefühler (unten) bereits leicht verbogen ist.



Abbildung 44: Anzeige von Ekling Nr.14

7.2. Experiment

7.2.1. Aufbau und Durchführung

Der Aufbau ist in Abbildung 45 skizziert. Als Spannungsquelle wird ein „PHYWE Stelltrafo mit Gleichrichter“ (0 – 40 V) verwendet. Zusätzlich wird ein Vorwiderstand benötigt. Dieser hat einen Widerstandswert von $R = 230 \, \Omega$. Um die Stromstärke im Stromkreis zu messen wird ein „VC-820 Multimeter“ verwendet. Die Geräte und die Bussole sind alle in Serie geschaltet. Das Experiment und die Auswertung für die Verwendung als Tangentenbussole wird wiederum analog zu Abschnitt 5.2.2. durchgeführt.

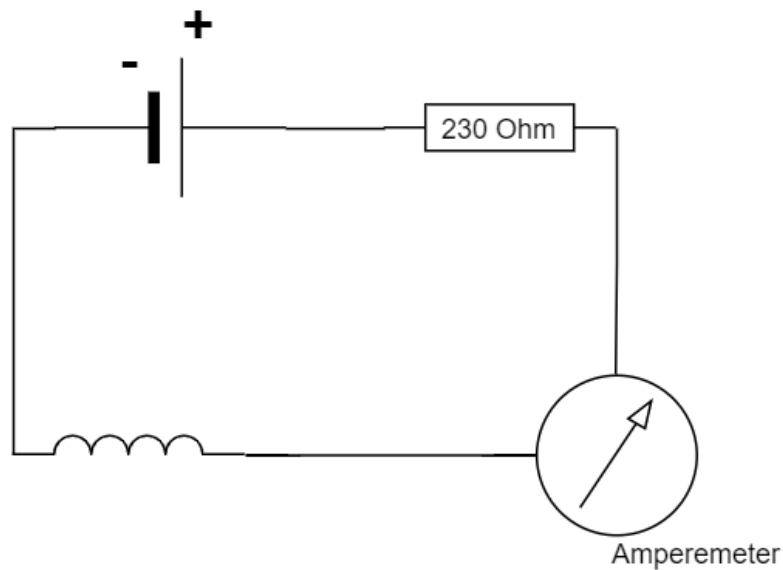


Abbildung 45: Schaltskizze Ekling Nr.14

Hinsichtlich der Verwendung als Sinusbussole ist folgendes zu bemerken:

Um das Gerät als Sinusbussole zu verwenden ist die bereits in Kapitel 7.1. angesprochene Drehbarkeit des Stromrings gegenüber der Winkelskala notwendig. Es wird mit einem Winkelausschlag von 5° begonnen. Ist dieser erreicht wird die Stromstärke notiert. Anschließend wird am Griff unter der besagten Winkelskala die Bussole gedreht, sodass wieder die Nulllage der Nadel erreicht ist. Danach wird die Stromstärke so erhöht, dass wieder ein Ausschlag von 5° zu erreicht ist. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis dieselbe Anzahl an Werte erreicht ist, welche bei der Verwendung als Tangentenbussole erreicht worden ist.

Nach dem Aufnehmen der einzelnen Ergebnisse ist wieder mithilfe von Gleichung (13) das erzeugte Magnetfeld B_{SB} zu bestimmen. Aus diesen Werten wird diesmal mithilfe von Gleichung (21) das Erdmagnetfeld B_E ermittelt. Diese Ergebnisse werden anschließend mit jenen bei der Verwendung als Tangentenbussole verglichen. Abschließend wird die zu den Ablenkungswinkeln passende Stromstärke I_{ber} berechnet. Dazu wird so wie bei der Verwendung als Tangentenbussole zuerst der Wert für das erzeugte Magnetfeld B_{SB} aus dem Ablenkungswinkel β und dem Erdmagnetfeld B_E durch Gleichung (21) berechnet. Anschließend ist aus Gleichung (13) die Stromstärke I_{ber} zu bestimmen, welche mit den Werten des Multimeters zu verglichen werden kann.

7.2.2. Ergebnisse

Mithilfe eines Maßbandes ergeben sich ein Außendurchmesser $d_A = (0,225 \pm 0,002) \text{ m}$ und ein Innendurchmesser $d_I = (0,205 \pm 0,002) \text{ m}$. Daraus resultiert ein mittlerer Durchmesser von $\bar{d} = (0,215 \pm 0,002) \text{ m}$, wodurch sich der Radius $R = (0,1075 \pm 0,001) \text{ m}$ ergibt. Die Magnetnadel hat eine Länge $L = (24,5 \pm 0,5) \text{ mm}$, wodurch sich das Verhältnis $\frac{L}{\bar{d}} \approx 0,114$ ergibt. Die Ergebnisse der ersten Messungen als Tangentenbussole sind in Tabelle 6 dargestellt.

Nr.	$I_{DM} \text{ (A)}$	$\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	$B_{TB} \text{ (}\mu\text{T)}$	$B_E \text{ (}\mu\text{T)}$
1	0,37	5	2,163	24,719
2	0,672	10	3,928	22,275
3	1,001	15	5,851	21,835
4	1,36	20	7,949	21,840
5	1,685	25	9,849	21,120
6	2,165	30	12,654	21,917
7	2,606	35	15,232	21,753
8	3,079	40	17,996	21,447
9	3,663	45	21,410	21,410
10	4,27	50	24,957	20,942
11	5,03	55	29,400	20,586

Tabelle 6: Tangentenbussole Ekling Nr.14 – Berechnung des Erdmagnetfeldes

Für die Stromstärke I_{DM} ergibt sich aufgrund der Herstellerinformationen im Mittel eine Ungenauigkeit von $\Delta I_{DM} = 0,063 \text{ A}$. Die Winkelanzeige ist prinzipiell sehr gut zu lesen, jedoch aufgrund des sehr dünnen Fühlers, welcher leicht pendelt, ist eine Unsicherheit von $\Delta\alpha = 1^\circ$ anzunehmen. Aus der Ungenauigkeit für die Stromstärke folgt für die Abweichung des erzeugten Magnetfeldes $\Delta B_{TB} = 0,404 \mu\text{T}$. Dadurch folgt unmittelbar für die Unsicherheit des Erdmagnetfeldes $\Delta B_E = 2,023 \mu\text{T}$. Die Standardabweichung der Werte für das Erdmagnetfeld liegt bei $\sigma_{B_E} = 1,03 \mu\text{T}$.

Die Ergebnisse für die Berechnungen bei der Verwendung als Sinusbussole sind in der folgenden Tabelle 7 dargestellt.

Nr.	$I_{DM} \text{ (A)}$	$\beta \text{ (}^\circ\text{)}$	$B_{SB} \text{ (}\mu\text{T)}$	$B_E \text{ (}\mu\text{T)}$
1	0,325	5	1,900	21,795
2	0,667	10	3,899	22,451
3	0,953	15	5,570	21,521
4	1,231	20	7,195	21,037
5	1,469	25	8,586	20,316
6	1,759	30	10,281	20,562
7	2,024	35	11,830	20,625
8	2,264	40	13,233	20,586
9	2,461	45	14,384	20,342
10	2,683	50	15,682	20,471
11	2,913	55	17,026	20,785

Tabelle 7: Sinusbussole Ekling Nr.14 – Berechnung des Erdmagnetfeldes

Die Unsicherheiten für die Stromstärke bleibt, aufgrund des Verwendens desselben Multimeters, unverändert. Da bei der Verwendung als Sinusbussole zweimal ein Winkel abgelesen wird, wird die Unsicherheit des Sinus mit 1% des Messwertes angenommen. Daraus resultiert für das Magnetfeld B_{SB} eine Ungenauigkeit von $\Delta B_{SB} = 0,383 \mu\text{T}$. Somit folgt für die Unsicherheit des Erdmagnetfeldes $\Delta B_E = 1,889 \mu\text{T}$. Die Standardabweichung der Werte für das Erdmagnetfeld liegt bei $\sigma_{B_E} = 0,65 \mu\text{T}$.

In Abbildung 46 werden die Ergebnisse für B_E von Tangenten (schwarz) – und Sinusbussole (rot) verglichen. Als Referenz ist das Erdmagnetfeld (blau) als konstante Größe angegeben. Es ist dabei gut zu erkennen, dass die sowohl mittels als Tangenten – als auch Sinusbussole, erhaltenen Werte nur sehr wenig um das Erdmagnetfeld streuen.

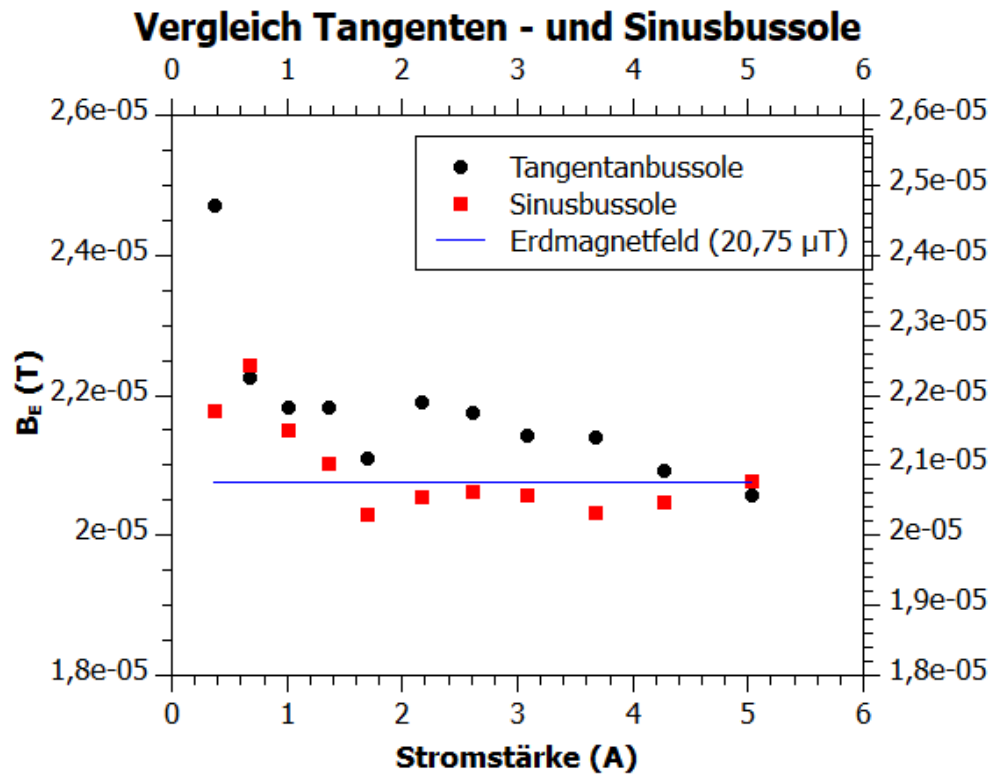


Abbildung 46: Berechnung von B_E : Vergleich Tangenten - und Sinusbussole (Ekling Nr. 14)

In der folgenden Tabelle 8 sind die Ergebnisse für die berechneten Stromstärke bei der Verwendung vom Ekling Nr. 14 als Tangentenbussole dargelegt. Aus diesen folgt, dass eine mittlere Abweichung zum Wert des Multimeters von ca. 5% gegeben ist.

Nr.	α (°)	B_{TB} (μT)	I_{ber} (A)	I_{DM} (A)
1	5	1,815	0,311	0,370
2	10	3,659	0,626	0,672
3	15	5,560	0,951	1,001
4	20	7,552	1,292	1,360
5	25	9,676	1,655	1,685
6	30	11,980	2,050	2,165
7	35	14,529	2,486	2,606
8	40	17,411	2,979	3,079
9	45	20,750	3,550	3,663
10	50	24,729	4,231	4,27
11	55	29,634	5,070	5,03

Tabelle 8: Stromstärke via Tangentenbussole – Ekling Nr.14

Die Ergebnisse für das erzeugte Magnetfeld B_{TB} sind dabei mit einer Unsicherheit von $\Delta B_{TB} = 0,359 \mu T$ zu betrachten. Daraus folgt für die Stromstärke I eine mittlere Ungenauigkeit von $\Delta I_{ber} = 0,069 A$.

Betrachtet man die Ergebnisse, welche bei der Verwendung von Ekling Nr. 14 als Sinusbussole aufgenommen wurden, ergibt sich folgendes Bild in Tabelle 9.

Nr.	β (°)	B_{SB} (μT)	I_{ber} (A)	I_{DM} (A)
1	5	1,808	0,309	0,325
2	10	3,603	0,616	0,667
3	15	5,370	0,919	0,953
4	20	7,097	1,214	1,231
5	25	8,769	1,500	1,469
6	30	10,375	1,775	1,759
7	35	11,902	2,036	2,024
8	40	13,338	2,282	2,264
9	45	14,672	2,510	2,461
10	50	15,895	2,720	2,683
11	55	16,997	2,908	2,913

Tabelle 9: Stromstärke via Sinusbussole – Ekling Nr.14

Dabei errechnet sich das erzeugte Magnetfeld B_{SB} mit einer Ungenauigkeit von $\Delta B_{SB} = 0,068 \mu T$. Woraus eine Unsicherheit von $\Delta I_{ber} = 0,021 A$ für die Stromstärke folgt.

Wie in Tabelle 9 zu erkennen ist, ergibt sich somit eine mittlere Abweichung von berechneter Stromstärke zur mit dem Multimeter gemessenen Stromstärke von rund 2,5 %. Diese Abweichung ist somit nur die Hälfte jener Abweichung, welche bei der Verwendung als Tangentenbussole aufgetreten ist. Dieser Sachverhalt ist in den folgenden Abbildungen 47 und 48 dargestellt.

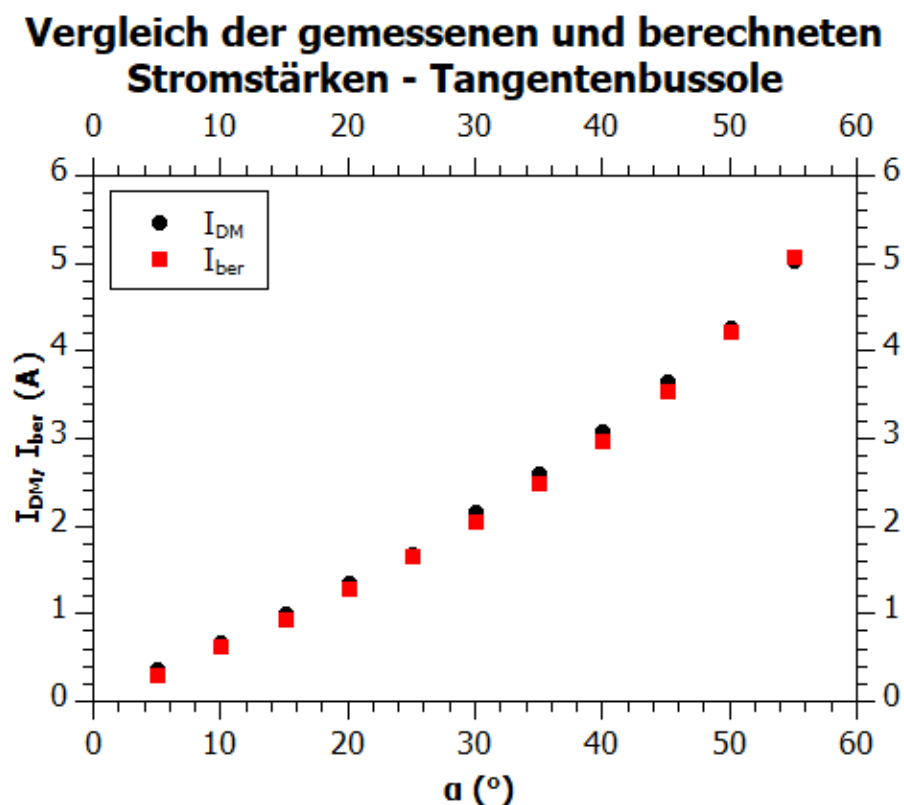


Abbildung 47: Vergleich der Stromstärken - Ekling Nr. 14 als Tangentenbussole

Vergleich der gemessenen und der berechneten Stromstärken - Sinusbussole

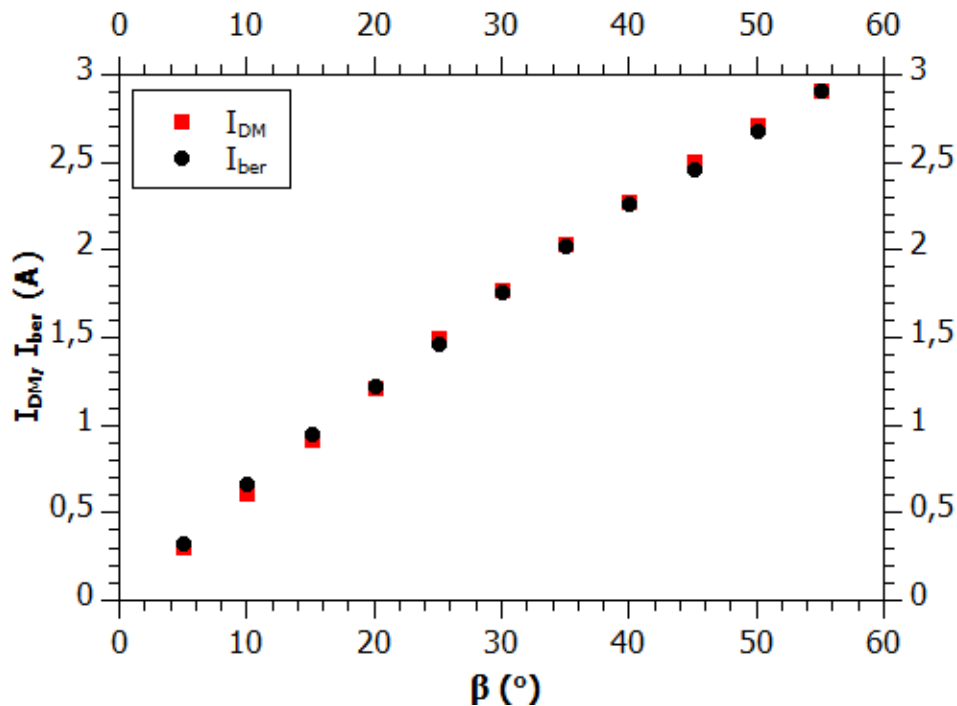


Abbildung 48: Vergleich der Stromstärken - Ekling Nr. 14 als Sinusbussole

7.2.3. Diskussion

Vergleicht man die Berechnungen des Erdmagnetfeldes mit beiden Methoden, so gibt sich Abbildung 46. Dort ist zu erkennen, dass die Ergebnisse bei der Verwendung als Sinusbussole im Mittel doch näher am Wert aus der Literatur liegt. Es gilt jedoch festzuhalten, dass bei beiden Methoden nur sehr geringe Abweichungen vorhanden sind.

Betrachtet man nun die Ergebnisse für die mithilfe der Tangenten – bzw. Sinusbussole gemessenen Stromstärken, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei der Tangentenbussole weichen die gemessenen Werte im Schnitt 5% von dem mit dem Multimeter aufgenommenen Wert ab. Mit ca. 2,5 % im Mittel zeigt die Sinusbussole doch eine geringere Abweichung.

In Abbildung 49 ist ein Vergleich der Entwicklung der Stromstärken bei größer werdendem Ablenkungswinkel α bzw. β dargestellt. Man erkennt, dass bei der Sinusbussole geringere Stromstärken notwendig sind, um denselben Ausschlag zu generieren.

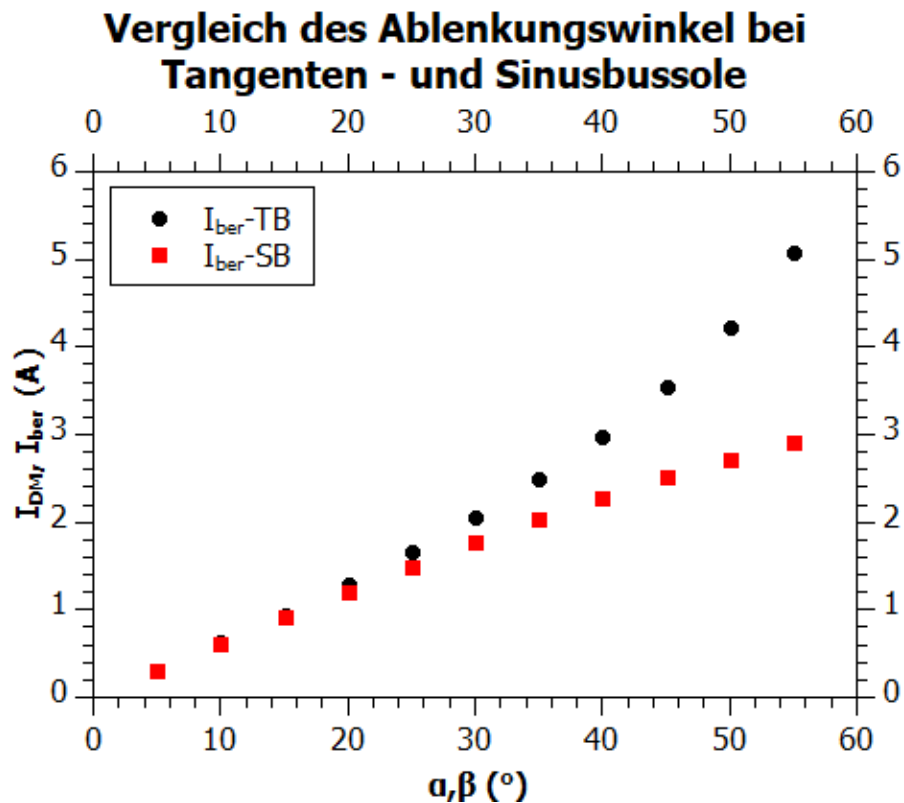


Abbildung 49: Vergleich des Ablenkungswinkels von Tangenten - und Sinusbussole (Ekling Nr. 14)

Wie bereits bei den Tangentenbussolen nach Hartman & Braun oder Gaugain kann man auch hier die Linearität zwischen Tangens des Winkels und gemessener Stromstärke erkennen (siehe. Abbildung 50). Jedoch ist der erste Messwert ($\alpha = 5^\circ$) als Ausreißer zu betrachten, was am Fehler der Tangentenbussole für kleine Winkel ($\alpha \leq 5^\circ$) liegt^{55 56}. Diese Linearität gilt nicht nur für die Tangenten eines Winkels, sondern auch für seinen Sinus, wie Abbildung 51 zeigt.

⁵⁵ (Grawinkel & Strecker, 1893, S. 98)

⁵⁶ (Dub, 1861, S. 10)

Linearität zwischen Tangente des Winkels und Stromstärke

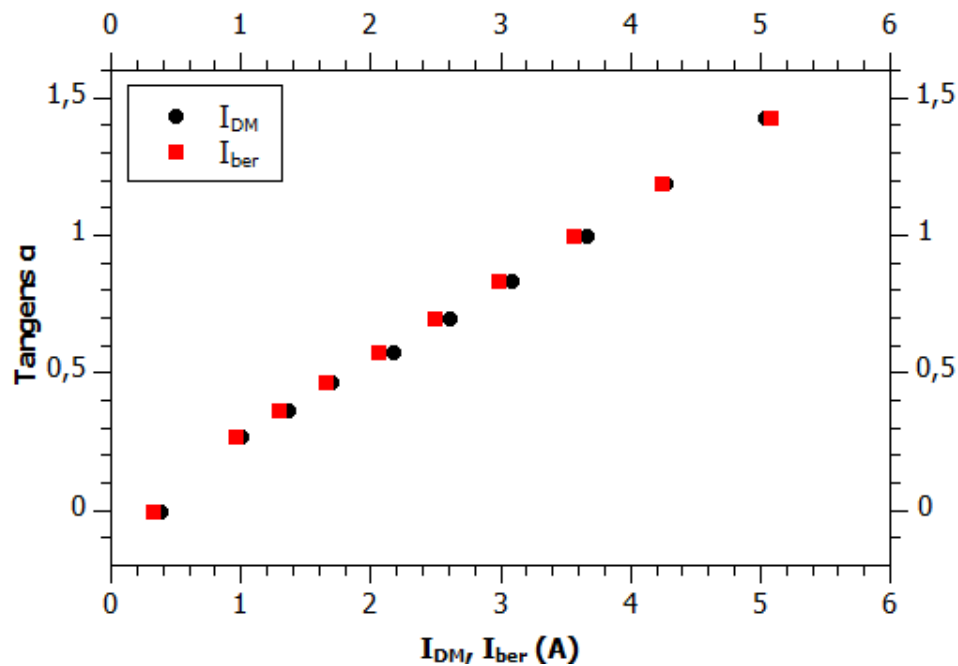


Abbildung 50: Linearität zwischen Tangens und Stromstärke (Ekling Nr. 14)

Vergleich der Linearität des Sinus eines Winkels und der Stromstärke

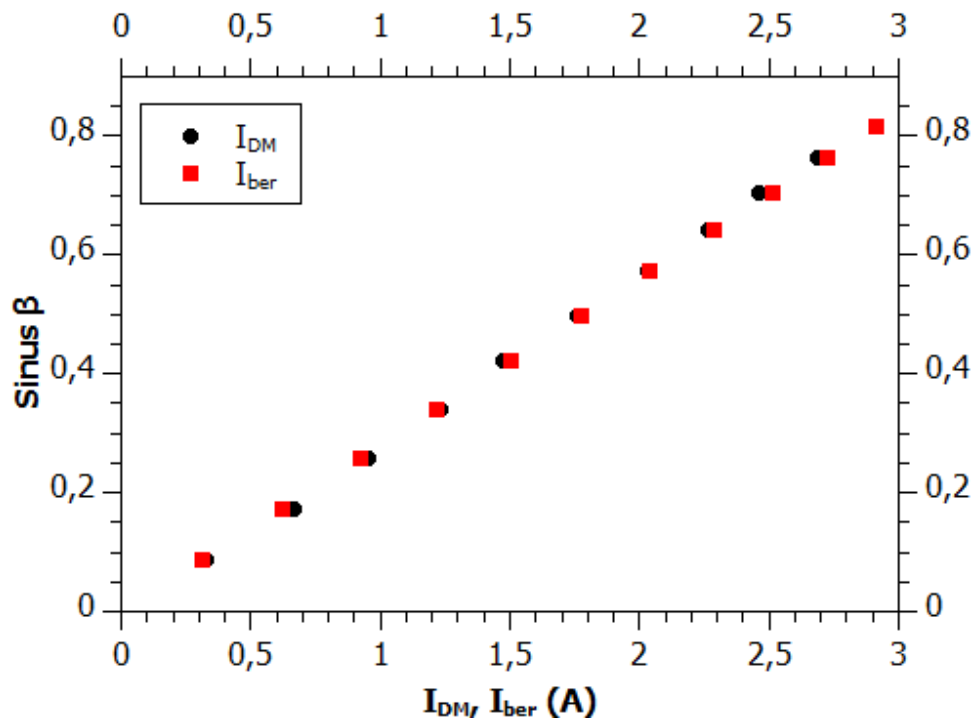


Abbildung 51: Linearität zwischen Sinus und Stromstärke (Ekling Nr. 14)

8. Tangentenbussole von Siemens & Halske Nr. 1541

8.1. Aufbau des Gerätes

In Abbildung 52 ist die Tangentenbussole von Siemens & Halske Nr. 1541 dargestellt. Diese hat eine Höhe von $(28,0 \pm 0,5)$ cm. Das Dreibein besteht aus Messing und besitzt an jedem Bein eine Stellschraube zur Justierung des Gerätes. Es benötigt eine dreieckige Stellfläche mit einer Seitenkante von $(18,0 \pm 0,5)$ cm. Im unteren Teil des Bildes sind die Anschlüsse und direkt darüber der Haltering der Spule zu sehen (Außendurchmesser $(18,0 \pm 0,2)$ cm). Direkt neben der Spule ist das Gehäuse für die Kompassnadel mit einem Durchmesser von $(12,5 \pm 0,1)$ cm zu sehen. Darin befindet sich die Nadel und die Winkelmarkierungen zum Ablesen des Abweichungswinkels. Das Gehäuse ist in Abbildung 53 dargestellt. Dort ist auch zu erkennen, dass dieses Gerät mit der Nummer 1541 versehen wurde.



Abbildung 52: Tangentenbussole von Siemens & Halske

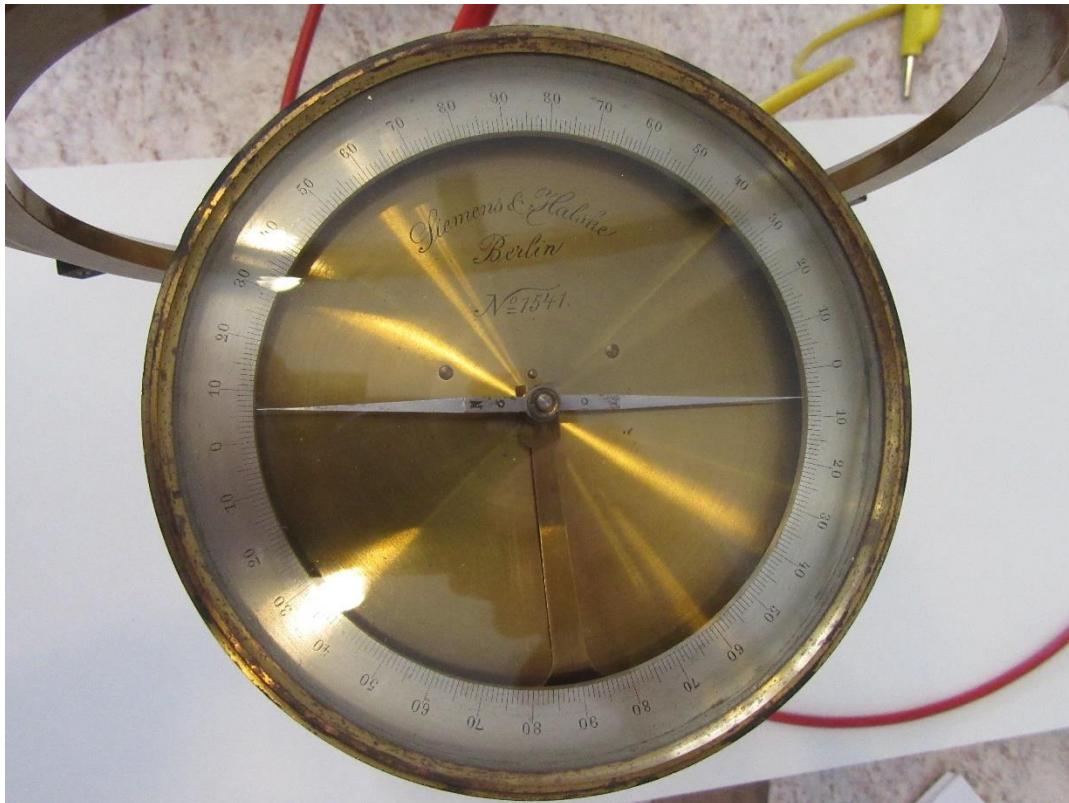


Abbildung 53: Kompassgehäuse mit Gravur: „Siemens & Halske Berlin No 1541“

8.2. Experiment

8.2.1. Aufbau und Durchführung

Der Aufbau des Experiments erfolgt gemäß Abbildung 40. Als Stromquelle diene ein Netzgerät

„DC Power Supply NTL 05“ (0 – 25 V), welches in Serie zu einem Widerstand $R = 230 \, \Omega$ und der Tangentenbussole geschaltet wurde. Zur Messung der Stromstärke im Stromkreis wurde ein „Uni – T UT-56“ – Multimeter verwendet. Hinsichtlich Durchführung und Auswertung des Experiments wird analog zu 5.2.2. verfahren.

8.2.2. Ergebnisse

Mit dem Außendurchmesser $d_A = (0,176 \pm 0,002) \text{ m}$ und dem Innendurchmessers $d_I = (0,155 \pm 0,002) \text{ m}$ ergibt sich ein mittlerer Durchmesser von $\bar{d} = (0,162 \pm 0,001) \text{ m}$. Daraus folgen der Außenradius $R_2 = (0,088 \pm 0,001) \text{ m}$, der Innenradius $R_1 = (0,081 \pm 0,001) \text{ m}$ und der mittlere Radius $\bar{R} = (0,0845 \pm 0,001) \text{ m}$. Damit folgt für die Differenz der Radien $h = (0,070 \pm 0,001) \text{ m}$. Aus diesen Werten ergibt sich mit Gleichung (15) $R = (0,084 \pm 0,001) \text{ m}$. Die Magnetnadel hat die Länge $L = (26,0 \pm 0,5) \text{ mm}$, wodurch sich das Verhältnis $\frac{L}{\bar{d}} \approx 0,160$ ergibt. Die Anzahl der Windungen $n = 5$ ergibt sich durch einfaches Zählen. Die Ergebnisse der ersten Messungen sind in Tabelle 10 zu finden.

Nr.	$I_{DM} \text{ (A)}$	$\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	$B_{TB} \text{ (}\mu\text{T)}$	$B_E \text{ (}\mu\text{T)}$
1	0,107	5	2,847	32,536
2	0,178	10	4,735	26,855
3	0,221	15	5,879	21,942
4	0,324	20	8,619	23,681
5	0,382	25	10,162	21,793
6	0,509	30	13,541	23,453
7	0,606	35	16,121	23,024
8	0,717	40	19,074	22,732
9	0,842	45	22,400	22,400
10	1,063	50	26,443	22,189
11	1,270	55	33,786	23,657
12	1,514	60	40,277	23,254
13	1,886	65	50,173	23,396
14	2,356	70	62,676	22,812

Tabelle 10: Messungen - Tangentenbussole Siemens & Halske – Berechnung von B_E

Für den Winkel wird eine Ungenauigkeit von $\Delta\alpha = 1^\circ$ angenommen. Aus den Angaben des Herstellers folgt für die Stromstärke eine mittlere Messunsicherheit von $\Delta I_{DM} = 0,01A$. Für das erzeugte Magnetfeld B_{TB} folgt aus den obigen Werten eine Messunsicherheit von $\Delta B_{TB} = 0,439 \mu T$. Dadurch ergibt sich die Messungenauigkeit für das Erdmagnetfeld zu $\Delta B_E = 2,154 \mu T$. Die Standardabweichung der Werte für das Erdmagnetfeld liegt bei $\sigma_{B_E} = 2,69 \mu T$. Man erkennt also, dass die berechneten Werte des Erdmagnetfeldes B_E durchaus im Bereich jener Werte aus der Literatur ($20,8 \mu T$) liegen.

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse unter Verwendung des Erdmagnetfeldes $B_E = (20,8 \pm 0,1) \mu T$.

Nr.	α (°)	B_{TB} (μT)	I_{ber} (A)	I_{DM} (A)
1	5	1,815	0,068	0,107
2	10	3,659	0,138	0,178
3	15	5,560	0,209	0,221
4	20	7,552	0,284	0,324
5	25	9,676	0,364	0,382
6	30	11,980	0,450	0,509
7	35	14,529	0,546	0,606
8	40	17,411	0,654	0,717
9	45	20,750	0,780	0,842
10	50	24,729	0,930	0,994
11	55	29,634	1,114	1,27
12	60	35,940	1,351	1,514
13	65	44,499	1,673	1,886
14	70	57,010	2,143	2,356

Tabelle 11: Berechnung der Stromstärke – Tangentenbussole von Siemens & Halske

Mit den angegebenen Werten ergibt sich somit für das erzeugte Magnetfeld eine Messunsicherheit von $\Delta B_I = 0,543 \mu T$. Mithilfe dieser Unsicherheit folgt jene für die Stromstärke. Diese ergibt sich zu $\Delta I_{ber} = 0,025 A$.

In Tabelle 11 ist also ersichtlich, dass die mithilfe der Tangentenbussole gemessenen Stromstärken, von jenen die mit dem Multimeter aufgenommen wurden, um ca. 12% im Mittel abweichen.

8.2.3. Diskussion

Lässt man den ersten Messwert aus Tabelle 10 außen vor, so ist auch bei der Tangentenbussole von Siemens & Halske zu erkennen, dass die Ergebnisse für das Erdmagnetfeld B_E um den Wert aus der Literatur liegen. Die große Abweichung des ersten Wertes ist vermutlich auf den Fehler der Tangentenbussole bei kleinen Winkeln zurückzuführen. In Abbildung 54 ist der Verlauf der Stromstärke bei steigendem Winkel dargestellt. Da hier Werte bis zu einer Abweichung von $\alpha = 70^\circ$ aufgenommen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Tangentenbussole für Stromstärken bis zu 2,5 A geeignet ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die berechnete Stromstärke tendenziell niedriger ist, als jene, die mit dem Multimeter gemessen wurde.

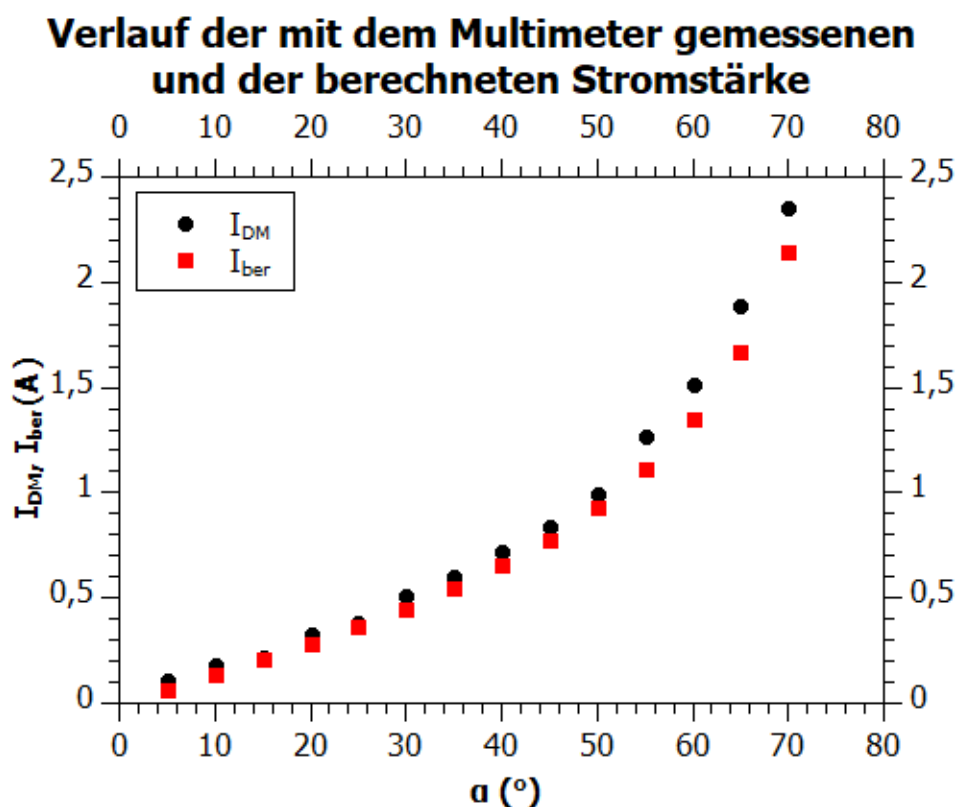


Abbildung 54: Verlauf der Stromstärken vs. Auslenkwinkel α – Tangentenbussole von Siemens & Halske

Dieses Gerät ist vor allem mit jenem nach Gauss zu vergleichen, da es ebenfalls eine Hälfte einer Helmholtzspule hat, welche konische Wicklungen aufweist. Jedoch ist dieses Gerät im Vergleich viel kleiner und hat anstatt 15 nur fünf Windungen. Trotzdem sind die aufgenommenen Werte durchaus brauchbar, wie Tabelle 11 zeigt.

Die bereits mehrmals erwähnte Linearität zwischen dem Tangens des Ausschlagwinkels und dem Strom bei einer Tangentenbussole ist in Abbildung 55 dargestellt. Hier ist zu bemerken, dass die extrapolierten Kurven eigentlich durch den Nullpunkt gehen sollten. Das ist nicht der Fall, was an dem Fehler der Tangentenbussole für kleine Winkel ($\leq 5^\circ$) liegt.

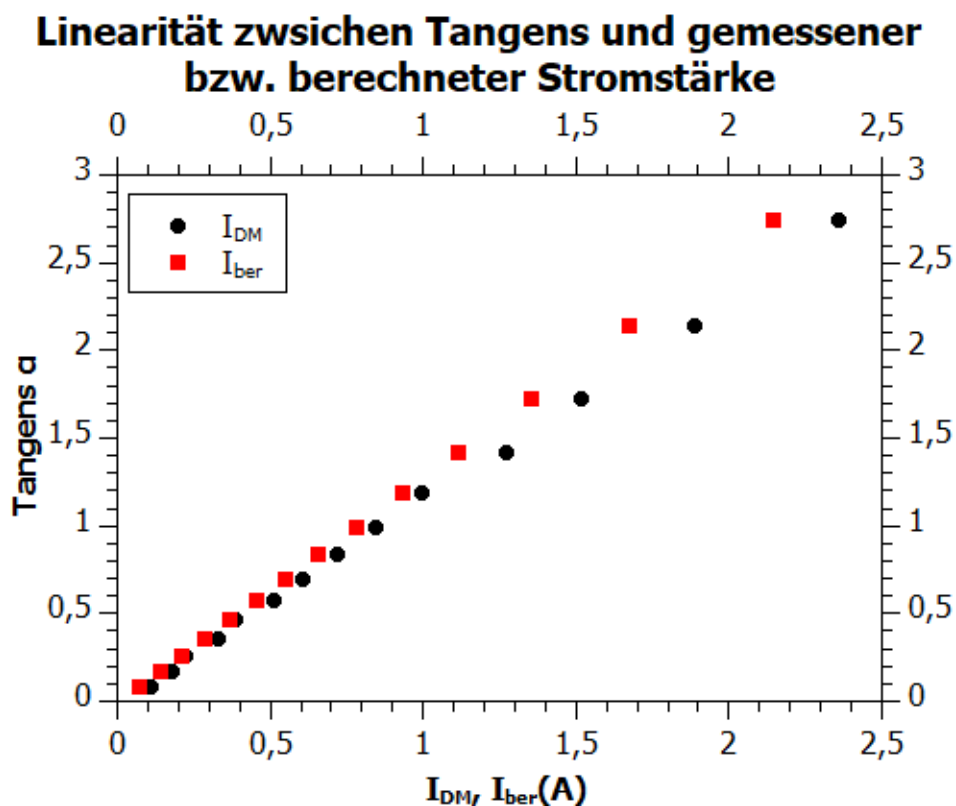


Abbildung 55: Linearität zwischen Tangens und Stromstärke – Tangentenbussole Siemens & Halske

9. Demonstrationsgalvanometer von Hartman & Braun

9.1. Aufbau des Gerätes

Meistens waren die Skalen bzw. die Geräte dazu designt, dass einzelne Experimentatoren oder Teams Experimente durchführen und beobachten konnten. Um diese in Vorlesungen oder in der Schule zu zeigen, waren die meisten Galvanometer aufgrund ihrer Erschütterungsempfindlichkeit nicht geeignet. Zu diesem Zwecke wurden Demonstrationsgalvanometer entwickelt, welche vorrangig zum Demonstrieren der Funktion solcher Geräte diente. Abbildung 58 zeigt das Demonstrationsgalvanometer von Hartmann & Braun Nr. 415 mit einer Höhe von $(37,0 \pm 0,5)$ cm.

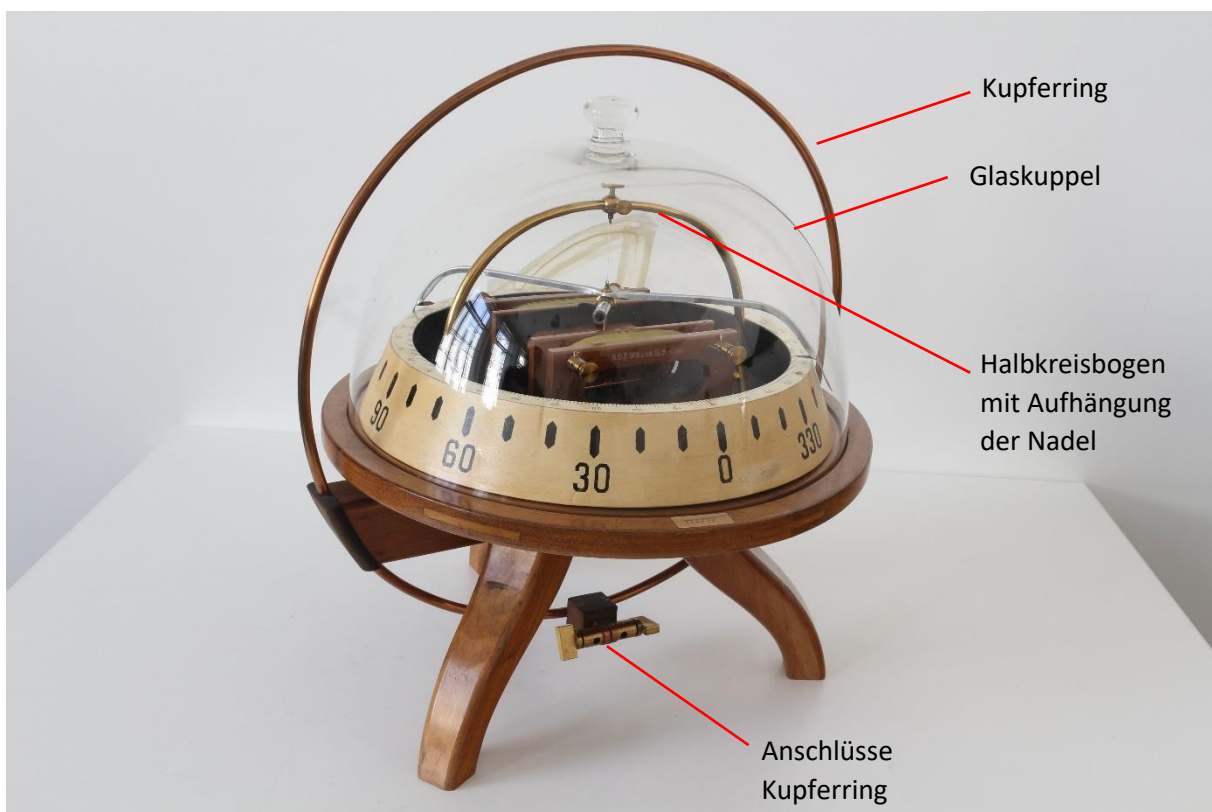


Abbildung 56: Demonstrationsgalvanometer von Hartman & Braun

Erworben wurde es im Jahre 1909 vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien. Das Dreibein aus Holz benötigt eine dreieckige Stellfläche mit einer Seitenkante von $(27,0 \pm 0,5)$ cm und trägt einen Holzteller. Darauf liegt unbefestigt ein konischer Holzring mit Winkelskala und Holzboden. Auf dieser Grundfläche des Konus sind mittig zwei Spulen angebracht, welche jeweils 303 Windungen mit $(5,3 \pm 0,1) \Omega$ bzw. $(6,3 \pm 0,1) \Omega$ besitzen. Am unteren Rand des Bildes sieht man zwei Stromanschlüsse, für den Kupfering. Dieser

dient zum Betrieb als Tangentenbussole und hat einen maximalen Durchmesser von $(34,0 \pm 0,2)$ cm. Die Spulen sind in Abbildung 57 dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass sich diese in kleinen Holzgestellen befinden, welche entlang von zwei Messingstäben verschiebbar sind, damit der Abstand der Spulen zueinander variiert werden kann. Des Weiteren sind die Anschlüsse zu sehen, welche durch Löcher in der Bodenplatte mit Drähten erreichbar sind. Die Spulen bzw. die Holzgestelle sind jeweils mit „A“ an einem und „B“ an dem anderen Ende beschriftet. Eine wichtige Eigenschaft des Demonstrationsgalvanometers ist das astatistische Nadelpaar, welches aus zwei gleichartigen magnetischen Röhrchen besteht. Das obere Röhrchen (obere Nadel) ist in Abbildung 57 gut zu erkennen. Darüber ist orthogonal zur Magnetnadel eine Anzeigenadel angebracht, welche nicht magnetisiert ist. Dem gesamten Zentrum des Galvanometers ist ein Glassturz übergestülpt, welcher bereits einzelne Sprünge vorweist. Diese beeinflussen die Experimentiertätigkeiten jedoch nicht.

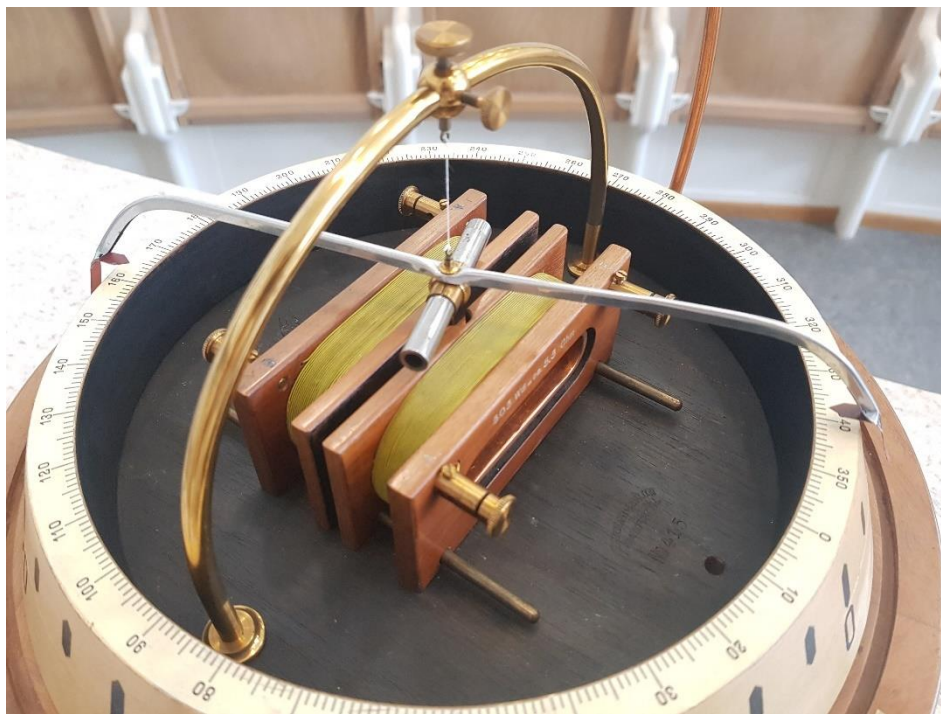


Abbildung 57: Spulen des Demonstrationsgalvanometers von Hartman & Braun

Zwischen den beiden Spulen befindet sich ein hohler Kupferblock, welcher in Abbildung 58 gezeigt ist. Dieser dient gemäß dem Prinzip der Wirbelstrombremse der Schwingungsdämpfung der unteren Magnetnadel. Die Besonderheit dieses Galvanometers ist, dass alles zerlegbar ist (auch die Doppelnadel ist zerlegbar) und so alle wichtigen Bestandteile eines Galvanometers und Differentialgalvanometers demonstriert werden können. Weiters könnte es nicht nur als Tangentenbussole sondern auch als Sinusbussole verwendet werden, da der Holzkonus mit Winkelskala am Holzboden frei drehbar ist.



Abbildung 58: Hohler Kupferkern zur Schwingungsdämpfung

9.2. Experiment

9.2.1. Aufbau des Experiments

Das Experiment wird in zwei Teile aufgegliedert. In Teil eins wird die Auswirkung des Abstandes der Spulen auf die Ablenkung der Nadel untersucht. Im zweiten Teil wird eine Widerstandsmessung gemäß dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Prinzips durchgeführt. Dazu werden zuerst die drei Bedingungen überprüft, welche notwendig sind, damit das Gerät als Differentialgalvanometer verwendet werden kann. Da das Experiment in zwei Teile unterteilt wird, wird der Aufbau dieser hier separat behandelt.

Teil 1

Der Aufbau zur Untersuchung der Auswirkung des Abstandes auf den Ablenkungswinkel ist in Abbildung 59 skizziert. Dabei ist zu beachten, dass die Spulen gleichgerichtet geschaltet sind. Als Stromquelle wird ein Netzgerät „DC Power Supply NTL 05“ (0 – 25 V) verwendet, welches die in Serie geschalteten Spulen versorgt. Des Weiteren sind ein Vorwiderstand $R = 230\Omega$ und ein „VC-820“ Multimeter in den Stromkreis integriert.

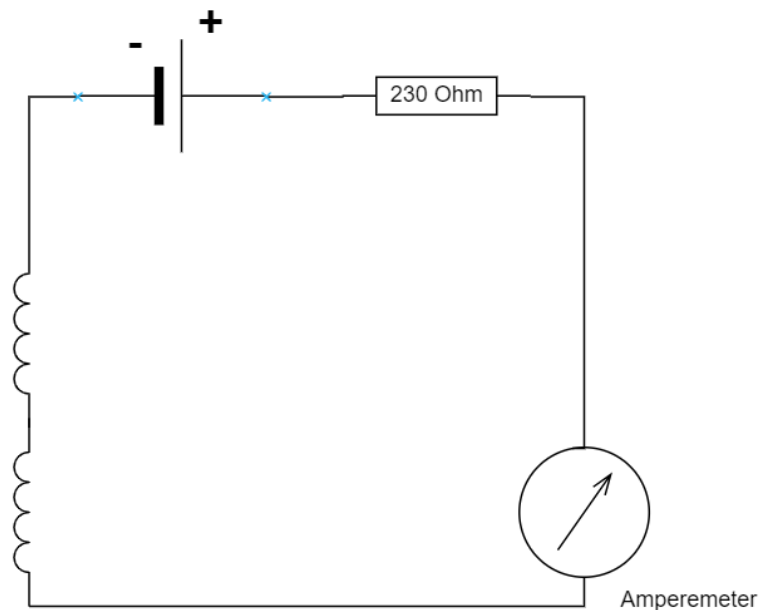


Abbildung 59: Schaltskizze zur Untersuchung der Auswirkung des Abstandes

Teil 2

Um die erste der drei Bedingungen (Bedingungen für das Experimentieren mit einem Differentialgalvanometer) aus Kapitel 2.3 zu überprüfen wird ebenfalls die Schaltung aus Abbildung 61 verwendet. Allerdings werden die Spulen nun gegenläufig durchlaufen. Daher sollte das Drehmoment, welches auf die Magnetnadel ausgeübt wird, gleich Null sein.

Die dritte Bedingung wird mithilfe der Schaltung, welche in Abbildung 60 skizziert ist, überprüft. Dabei stellt U einen Umpolschalter dar. Der verwendete Polwender ist in Abbildung 61 dargestellt.

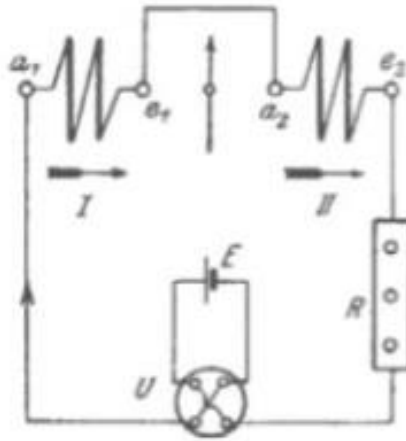


Abbildung 60: Schaltskizze - Überprüfung Bedingung 3⁵⁷

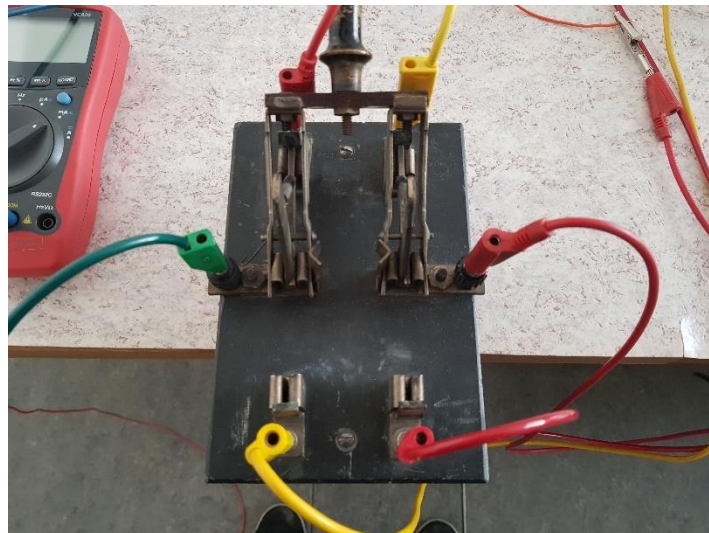


Abbildung 61: Polwender

Für den zweiten Teil des Experimentes wird, die in Abbildung 62 skizzierte Schaltung verwendet.

⁵⁷ (Linker, 1920, S. 16)
Seite **79** von **92**

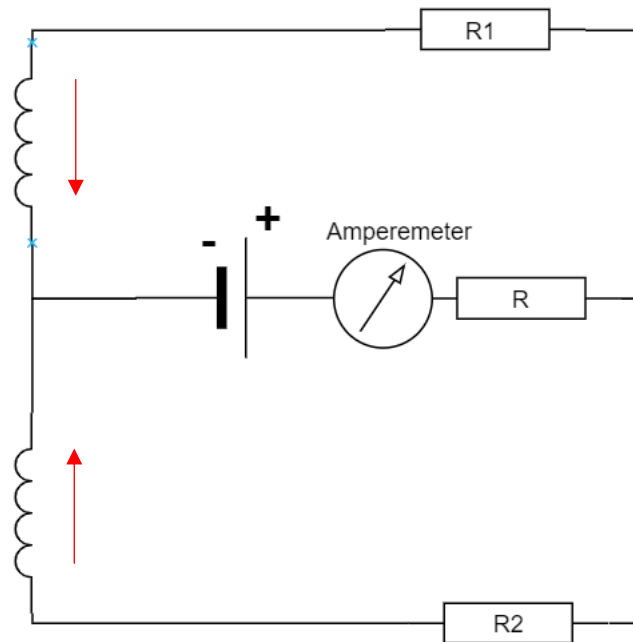


Abbildung 62: Schaltskizze zur Widerstandsmessung

Dabei muss einer der beiden Widerstände R_1 oder R_2 bekannt sein, während der andere gemessen werden kann. Der Widerstand $R = 230\Omega$ wird als Vorwiderstand verwendet.

9.2.2. Durchführung

Teil 1

Verwendet wird das Schaltschema laut Abbildung 59. Hier ist nur wichtig, dass sich die Magnetnadel im Feld der Spulen symmetrisch bewegt. Das heißt, falls die Magnetnadel zu einer Spule stärker gezogen wird, muss der Spulenabstand entsprechend korrigiert werden.

Ist das Gerät richtig eingestellt werden, die Länge der Spulen und deren Abstand gemessen. Dabei wird der Abstand der beiden Holzgestelle bestimmt. Anschließend kann der Stromkreis geschlossen werden. Beginnend bei 10° werden nun in Zehnerschritten Werte für die Stromstärke aufgenommen. Sind die Werte bestimmt, wird der Abstand der Spulen vergrößert und wieder gleich viele Werte aufgenommen. Dieser Vorgang wird ein drittes Mal durchgeführt. Abschließend werden die Stromstärken verglichen, welche nötig waren um einen gewissen Ablenkungswinkel α der Anzeigenadel zu erhalten. Danach wird mit dem zweiten Teil des Experiments fortgefahren.

Teil 2

Hier wird das Schaltschema gemäß Abbildung 60 und 62 verwendet. Um die drei Bedingungen für ein Differentialgalvanometer zu überprüfen, wird wie folgt vorgegangen:

1. Die beiden Spulen werden im gleichen Abstand zur Nadel positioniert. Anschließend wird das Netzgerät eingeschaltet und somit der Stromkreis geschlossen. Zeigt die Nadel eine Ablenkung wird eine der beiden Spulen solange verschoben, bis sich die Nadel wieder in der Nulllage befindet.
2. Die Widerstände werden mithilfe eines Multimeters gemessen.
3. Das Experiment wird so wie in Abbildung 62 skizziert aufgebaut. Nach dem Einschalten der Stromquelle, sollte in beiden Richtungen die Ablenkung der Nadel gleich groß sein. Ist dies nicht der Fall, so werden die Spulen in der Achse des Gerätes so eingestellt, dass sie in der richtigen Lage sind.

Dazu ist zuerst das Widerstandsverhältnis zweier bekannter Widerstände zu bestimmen. Anschließend sind ein unbekannter und ein bekannter Widerstand so in den Stromkreis zu integrieren, dass die Ablenkung der Nadel Null ist (siehe Abbildung 62). Ist dieser Sachverhalt gegeben kann mit Gleichung (17) der unbekannte Widerstand bestimmt werden.

9.2.3. Ergebnisse

Ergebnisse 1. Experiment

Die Ergebnisse des ersten Teils des Experiments sind in den folgenden Tabellen 12, 13 und 14 dargestellt. Tabelle 12 zeigt jene für einen Spulenabstand $d_1 = (0,005 \pm 0,0002)m$, Tabelle 13 jene für einen Spulenabstand $d_2 = (0,0205 \pm 0,0002)m$ und Tabelle 14 die Ergebnisse für einen Abstand $d_3 = (0,0405 \pm 0,0002)m$.

Nr.	$\alpha(^{\circ})$	$I_{DM}(mA)$
1	10	0,03
2	20	0,22
3	30	0,42
4	40	0,65
5	50	1,09
6	60	1,93

Tabelle 12: Spulenabstand 5mm

Nr.	$\alpha(^{\circ})$	$I_{DM}(mA)$
1	10	0,35
2	20	0,50
3	30	0,66
4	40	0,86
5	50	1,19
6	60	1,57

Tabelle 13: Spulenabstand 20,5mm

Nr.	$\alpha(^{\circ})$	$I_{DM}(mA)$
1	10	0,94
2	20	1,36
3	30	1,55
4	40	1,67
5	50	1,93
6	60	2,38

Tabelle 14: Spulenabstand: 40,5mm

In den obigen Tabellen ist also gut zu erkennen, dass mit steigendem Spulenabstand die Stromstärke größer sein muss, um denselben Zeigerausschlag zu erhalten.

Ergebnisse 2. Experiment

Mit einem „Escort 97“ – Multimeter ergeben sich die Widerstandswerte

$g_1 = (5,300 \pm 0,013)\Omega$ und $g_2 = (6,300 \pm 0,015)\Omega$ für die Spulen. Damit diese das gleiche Drehmoment auf die Nadel ausüben, wurde zuerst bei einem Abstand von $(0,0400 \pm 0,0002)m$ der Stromkreis geschlossen. Da die Nadel eine Ablenkung zeigt, wurde jene Spule, welche einen geringeren Widerstand hat, von der Nadel weggeschoben. Die Nadel war bei einem Abstand von $d = (45,0000 \pm 0,0002)mm$ wieder in der Nulllage. Bei der Überprüfung von Bedingung drei zeigte sich, dass die Spulen bereits in der Meridianebene eingestellt waren.

Die Widerstandsmessungen der beiden bekannten Widerstände ergaben

$r_1 = (111,3 \pm 0,6) \, \Omega$ und $r_2 = (117,0 \pm 0,6) \, \Omega$. Daraus folgt das Verhältnis mit

$c = \frac{r_1}{r_2} = (0,9513 \pm 0,0071)$. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Widerstandsmessungen

dargestellt. Wobei W_{ber} mithilfe von Gleichung (17) und R_2 mit einem Digitalmultimeter bestimmt werden.

Nr.	$I_{DM}(mA)$	$R_2 (\Omega)$	$W_{ber}(\Omega)$	$W_{DM}(\Omega)$	Abweichung (%)
1	23,6	87,9	83,618	85,4	2,1
2	41,9	40,0	38,051	42,8	11,1
3	109,6	6,40	6,088	6,4	4,9
4	20,5	95,1	90,470	108,7	16,8
5	40,0	108,9	103,595	108,7	4,7

Tabelle 15: Widerstandsmessungen mit dem Demonstrationsgalvanometer

Für die Stromstärke ergibt sich aus den Herstellerinformationen eine mittlere Unsicherheit von $\Delta I_{DM} = 0,85 \, mA$. Für die Widerstandswerte folgt ebenfalls durch die Herstellerangaben eine mittlere Ungenauigkeit von $\Delta R_2 = 0,24 \, \Omega$. Diese Fehlerangabe wird auch für den mit dem Multimeter gemessenen Wertes des unbekannten Widerstandes W_{DM} verwendet. Für den berechneten Widerstand folgt eine Unsicherheit von $\Delta W_{ber} = 0,579 \, \Omega$. Aus den Werten der letzten Spalte ergibt sich somit eine mittlere Abweichung von rund 8 %.

9.2.4. Diskussion

Teil 1: Variation des Spulenabstandes – gleichsinnige Schaltung der Spulen

In Abbildung 65 ist deutlich zu sehen, dass die Stromstärke umso höher sein muss, je größer der Abstand der Spulen ist, um denselben Zeigerausschlag zu erhalten.

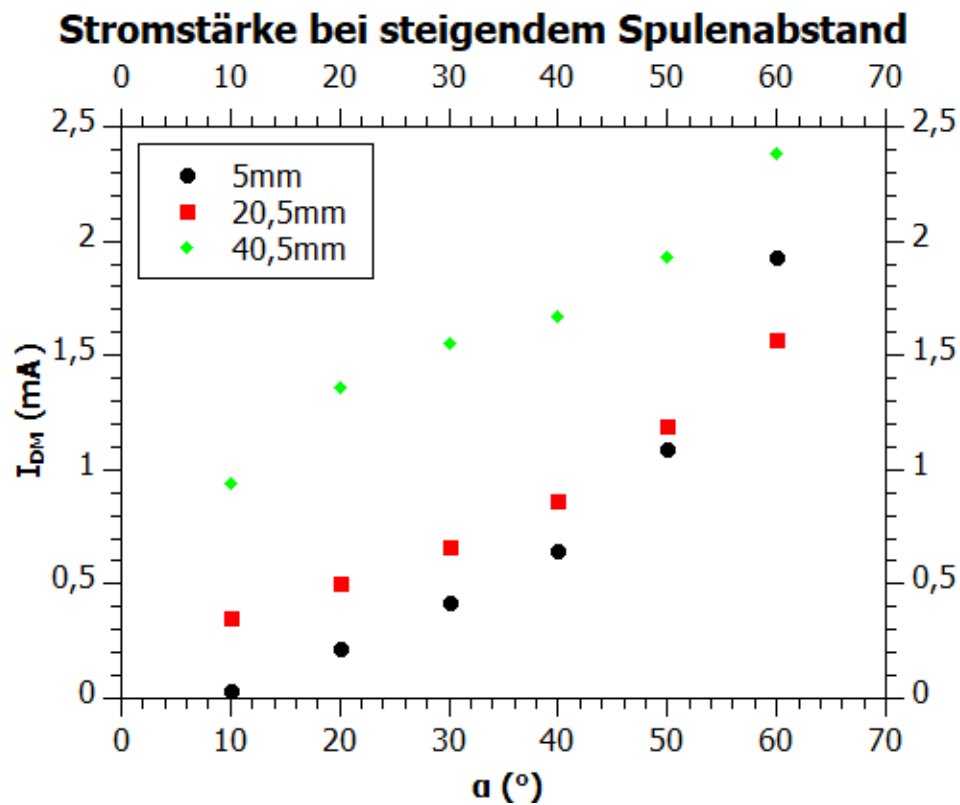


Abbildung 63: Stromstärke vs. Auslenkungswinkel α bei steigendem Spulenabstand

Teil 2: Schaltung als Differentialgalvanometer – gegensinnige Schaltung der Spulen

Mithilfe der Ergebnisse aus Tabelle 15 ist gut zu erkennen, dass bei diesem Experiment nahezu die Situation $\frac{r_2}{r_1} = 1$ vorliegt. Daraus resultiert, dass $R_2 \approx W$ gelten muss. Vergleicht man nun die Werte von R_2 und W erkennt man, dass W immer um ca. 5% von R_2 abweicht.

Die exakte Nullstellung der Anzeigenadel kann nur bei abgenommenen Glassturz vorgenommen werden. Weil dabei das Gerät minimalen Erschütterungen oder auf dem Luftzug ausgesetzt ist, nimmt die Kalibrierung sehr viel Zeit in Anspruch. Nach der Kalibrierung ist der Glassturz so schnell als möglich wieder über die Nadel zu geben.

Die drei Bedingungen, welche notwendig sind, um das Demonstrationsgalvanometer von Hartman & Braun zur Widerstandsmessung zu verwenden, konnten allesamt gut überprüft werden. Das Verschieben der Spulen funktionierte gut und die anderen beiden Bedingungen waren entweder erfüllt oder wurden mit modernen Geräten gemessen. Auch wenn das Demonstrationsgalvanometer deutlich ungenauer ist als die anderen in dieser Arbeit untersuchten Messgeräte, so erfüllt es dennoch überzeugend seinen didaktischen Zweck.

10. Fazit der Experimente

Ziel der Arbeit war es, Strommessgeräte, die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gebaut oder konzipiert wurden, zu analysieren und im Experiment zu testen.

Das Galvanometer nach Nobili, das als Ekling Nr. 3 hergestellt und im Jahre 1834 bereits im Physikalischen Museum der Universität Wien angeschafft wurde, ist das älteste Gerät der Versuchsreihe. Trotz des sehr fortgeschrittenen Alters des Gerätes konnte nach Ersatz des abgerissenen Aufhängefadens der Magnet – und Anzeigenadel mit dem Messinstrument das grundlegende Prinzip eines Galvanometers gezeigt werden. Der Abgleich der beiden Spulenteile, die in einem durch mit einem verdrehten Drähtepaar gewickelt sind, zeigte sich bemerkenswert präzise.

Das Differentialgalvanometer nach Siemens & Halske Nr. 2897 ist ein etwas jüngerer Modell als jenes von Nobili. Es zeigte sich noch voll funktionsfähig. Wohl ist dies auch der aufwändigen Transportsicherung des Nadelpaares zu verdanken. Die Empfindlichkeit des Gerätes reicht in den Mikroampere – Bereich, sodass sogar die Fehler der im Experiment verwendeten Digitalmultimeter deutlich sichtbar wurden. Dieses Differentialgalvanometer ist relativ gut abgeglichen. Zwei gleich große, entgegengerichtete Ströme erzeugen innerhalb der Messfehler keinen nennenswerten Zeigerausschlag.

Die Tangentenbussolen nach Gaugain und Siemens & Halske sind mit einem konischen Helmholtzspulenteil versehen. Die Tangenten – Sinusbussole Ekling Nr. 14 und die Tangentenbussole von Hartmann & Braun weisen einen einfachen Stromring auf. Bei letzterer war die Anzeigevorrichtung defekt bzw. war die Magnetisierung nicht mehr ausreichend. Daher wurde eine provisorische Magnetonadel verwendet. Das Verhältnis magnetische Nadellänge zu mittlerem Durchmesser des Stromrings lag bei den untersuchten Bussolen im Bereich 0,11 bis 0,19. Damit konnte für alle Bussolen im Wesentlichen recht genau (max. Fehler von ca. 1%) die Linearität zwischen dem Tangens des Ausschlagwinkels und des Messstromes gezeigt werden. Lediglich bei den zwei kleinsten Bussolen deutete sich im Bereich des Ausschlags von fünf Grad eine Abweichung von der Linearität an. Wie erwartet, war der Betrieb von Ekling Nr. 14 als Sinusbussole genauer als Tangentenbussole. Insgesamt zeigen alle vier untersuchten Bussolen nur geringe Abweichungen gegenüber modernen Messgeräten, was vermutlich durch eine genaue Messung des lokalen Erdmagnetfeldes noch verbessert werden könnte.

Mithilfe des Demonstrationsgalvanometers von Hartmann & Braun, das komplett zerlegbar ist, konnte abschließend nachvollzogen werden, wie ein Differentialgalvanometer einzustellen ist, damit man Widerstandsmessungen durchführen kann. Auch dieses Gerät ist ohne Restaurierungsarbeiten noch funktionsfähig gewesen, zeigte sich jedoch bezogen auf Erschütterungen und Luftzug sehr empfindlich. Durch das Verschieben der Spulen konnte die Auswirkung der Abstandsänderung auf die Magnetnadel gut gezeigt werden. Dieses Gerät ist sowohl als ein einfaches Nadelgalvanometer, Differentialgalvanometer, Tangentenbussole und Sinusbussole verwendbar.

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pile nach Volta.....	8
Abbildung 2: "Krone" nach Volta.....	8
Abbildung 3: Elektromagnetische Instrumente nach Schweigger, Poggendorf und Cumming	10
Abbildung 4: Galvanometer nach Nobili	10
Abbildung 5: Tangentenbussole.....	11
Abbildung 6: Sinusbussole.....	11
Abbildung 7: Stromleitung in einem Leiter	13
Abbildung 8: Magnetische Feldlinien mit Eisenspänen.....	14
Abbildung 9: Auftretende Vektoren im Biot-Savart-Gesetz.....	15
Abbildung 10: Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters.....	16
Abbildung 11: Magnetfeld einer Spule.....	18
Abbildung 12: Schaltbild eines Differentialgalvanometers.....	20
Abbildung 13: Widerstandsberechnung nach Linker	22
Abbildung 14: Astatistisches Nadelpaar.....	23
Abbildung 15: Feldvektoren Tangentenbussole.....	24
Abbildung 16: Feldvektoren Sinusbussole	24
Abbildung 17: Galvanometer nach Nobili (Ekling Nr.3).....	26
Abbildung 18: Anschlüsse des Nobili – Galvanometers	27
Abbildung 19: Skala des Nobili-Galvanometers	28
Abbildung 20: Nadelpaar des Nobili-Galvanometers.....	29
Abbildung 21: Originalabdeckung des Nobili-Galvanometers	30
Abbildung 22: Neue PVC-Abdeckung für das Nobili –Galvanometer.....	30
Abbildung 23: Messaufbau – Nobili-Galvanometer.....	31
Abbildung 24: Schaltskizze zum Zeigen der Funktionsweise des Nobili-Galvanometers.....	32
Abbildung 25: Hütchen mit Stellschraube für Positionieren der Nadel und Ausdrillen des Fadens.....	33
Abbildung 26: Ausschlag der Magnetnadel – Nobili - Galvanometer	34
Abbildung 27: Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897.....	36
Abbildung 28: Skala des Differentialgalvanometers Nr. 2897	37
Abbildung 29: Schaltskizze des Experiments mit dem Differentialgalvanometer von Siemens und Halske Nr. 2897	38
Abbildung 30: Abweichung bei steigender Stromstärke – Differentialgalvanometer von Siemens und Halske	40
Abbildung 31: Tangentenbussole nach Gaugain	42
Abbildung 32: Magnetnadel und Transportsicherung - Tangentenbussole nach Gaugain.....	43
Abbildung 33: Schaltskizze - Tangentenbussole nach Gaugain.....	44
Abbildung 34: Vergleich der Stromstärken vs. Ausschlagwinkel – Tangentenbussole nach Gaugain .	47
Abbildung 35: Tangens des Ausschlagwinkels vs. Stromstärken – Tangentenbussole nach Gaugain ..	48
Abbildung 36: Tangentenbussole von Hartmann & Braun.....	49
Abbildung 37: Einzelteile der Messvorrichtung – Tangentenbussole von Hartmann & Braun.....	50
Abbildung 38: Klemmvorrichtung für den Spiegel bei der Tangentenbussole von Hartman & Braun .	51
Abbildung 39: Vorrichtung mit herkömmlicher Magnetnadel – Tangentenbussole von Hartman & Braun	52
Abbildung 40: Schaltung für die Tangentenbussole von Hartmann & Braun	53
Abbildung 41: Stromstärke gegen Ausschlagwinkel – Tangentenbussole Hartmann & Braun.....	56
Abbildung 42: Tangentenbussole Hartmann & Braun - Tangens gegen Stromstärke	57
Abbildung 43: Tangenten – und Sinusbussole - Ekling Nr. 14.....	58
Abbildung 44: Anzeige von Ekling Nr.14	59

Abbildung 45: Schaltskizze Ekling Nr.14	60
Abbildung 46: Berechnung von BE : Vergleich Tangenten - und Sinusbussole (Ekling Nr. 14)	63
Abbildung 47: Vergleich der Stromstärken - Ekling Nr. 14 als Tangentenbussole	65
Abbildung 48: Vergleich der Stromstärken - Ekling Nr. 14 als Sinusbussole	66
Abbildung 49: Vergleich des Ablenkungswinkels von Tangenten - und Sinusbussole (Ekling Nr. 14) ..	67
Abbildung 50: Linearität zwischen Tangens und Stromstärke (Ekling Nr. 14)	68
Abbildung 51: Linearität zwischen Sinus und Stromstärke (Ekling Nr. 14)	68
Abbildung 52: Tangentenbussole von Siemens & Halske	69
Abbildung 53: Kompassgehäuse mit Gravur: „Siemens & Halske Berlin No 1541“	70
Abbildung 54: Verlauf der Stromstärken vs. Auslenkwinkel α – Tangentenbussole von Siemens & Halske	73
Abbildung 55: Linearität zwischen Tangens und Stromstärke – Tangentenbussole Siemens & Halske	74
Abbildung 56: Demonstrationsgalvanometer von Hartman & Braun	75
Abbildung 57: Spulen des Demonstrationsgalvanometers von Hartman & Braun	76
Abbildung 58: Hohler Kupferkern zur Schwingungsdämpfung	77
Abbildung 59: Schaltskizze zur Untersuchung der Auswirkung des Abstandes	78
Abbildung 60: Schaltskizze - Überprüfung Bedingung 3	79
Abbildung 61: Polwender	79
Abbildung 62: Schaltskizze zur Widerstandsmessung	80
Abbildung 63: Stromstärke vs. Auslenkungswinkel α bei steigendem Spulenabstand	84

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messergebnisse Siemens und Halske Nr. 2897	39
Tabelle 2: Berechnung des Erdmagnetfeldes mittels Tangentenbussole nach Gaugain	45
Tabelle 3: Berechnung der Stromstärke mittels Tangentenbussole nach Gaugain	46
Tabelle 4: Ergebnisse - Tangentenbussole Hartmann & Braun . Berechnung von B_E	54
Tabelle 5: Berechnung der Stromstärke – Tangentenbussole von Hartman & Braun	55
Tabelle 6: Tangentenbussole Ekling Nr.14 – Berechnung des Erdmagnetfeldes	61
Tabelle 7: Sinusbussole Ekling Nr.14 – Berechnung des Erdmagnetfeldes	62
Tabelle 8: Stromstärke via Tangentenbussole – Ekling Nr.14	64
Tabelle 9: Stromstärke via Sinusbussole – Ekling Nr.14	64
Tabelle 10: Messungen - Tangentenbussole Siemens & Halske – Berechnung von BE	71
Tabelle 11: Berechnung der Stromstärke – Tangentenbussole von Siemens & Halske	72
Tabelle 12: Spulenabstand 5mm	82
Tabelle 13: Spulenabstand 20,5mm	82
Tabelle 14: Spulenabstand: 40,5mm	82
Tabelle 15: Widerstandsmessungen mit dem Demonstrationsgalvanometer	83

13. Literaturverzeichnis

- Aschoff, V. (1995). *Geschichte der Nachrichtentechnik* (Bd. 2: Nachrichtentechnische Entwicklungen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts). Berlin: Springer Verlag.
- Becquerel, P. m. (1858). *Résumé de l'histoire de l'Électricité et du magnétisme*. Paris. Abgerufen am 13. 01 2020 von <https://archive.org/details/rsumdelhistoire00becqgoog>
- Bureau International des Poids et Mesures. (2019). The International System of Units. 17. Abgerufen am 07. 01 2020 von <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2019.pdf>
- Chipman, R. A. (1964). The Earliest Electromagnetic Instruments. In *Contributions from the museum of history and technology* (S. 121 - 136). Washington D.C.: Smithsonian Institution.
- Darmstaedter, L., Du Bois- Reymond, R., & C., S. (1908). *Handbuch zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik* (Zweite Ausg.). Berlin: Springer Verlag.
- Dub, J. (1861). *Der Elektromagnetismus*. Berlin: Springer Verlag. Abgerufen am 13. 01 2020 von <http://data.onb.ac.at/rep/10673F09>
- Eucken, A., Lummer, A. O., & Waetzmann, E. (1932). *Müller - Pouillet's Lehrbuch der Physik* (11 Ausg., Bd. 4: Elektrizität und Magnetismus Teil 1). Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Akt. - Ges.
- Frölich, O. (1905). *Die Wissenschaft Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien* (Bd. 5: Entwicklung der elektrischen Messungen). Braunschweig: Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn.
- Gaugain. (1853). *Annalen der Physik und Chemie* 88.
- Geiger, H., & Scheel, K. (1927). *Handbuch der Physik* (Bd. 16: Apparate und Messmethoden für Elektrizität und Magnetismus). Berlin: Springer Verlag.
- Grawinkel, C., & Strecker, K. (1893). *Hilfsbuch der Elektrotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

- Heller, A. (1882). *Geschichte der Physik von Aristoteles bis auf die neueste Zeit* (Bd. 2: von Descartes bis Robert Mayer). Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Hermann, A. (1980). *Weltreich der Physik - Von Galilei bis Heisenberg*. Esslingen am Neckar: Bechtle Verlag.
- Keithley, J. (1990). *The story of electrical and magnetic measurements*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Kohlrausch, F. (2013). *Leitfaden der praktischen Physik* (Erste Ausg.). Bremen: Europäischer Hochschulverlag GmbH & Co KG.
- Linker, P. A. (1920). *Elektrotechnische Messkunde* (Dritte Ausg.). Berlin: Springer Verlag.
- Lüders, K. (2010). *Pohls Einführung in die Physik* (Bd. 2: Elektrizitätslehre und Optik). (P. R. O., Hrsg.) Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Mie, G. (1932). *Handbuch der Experimentalphysik* (Bd. 11: Elektrodynamik). (H. F. Wien W., Hrsg.) Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft mbH.
- Pouillet, C. (1837). *Éléments de physique expérimentale et de météorologie* (Dritte Ausg.). Paris: Imprimerie et Fonderie de Felix Locquin et Comp. Von <https://archive.org/details/lmentsdephys01poui/page/n5> abgerufen
- Sachslehner, F. (2014). Vortrag am 27.09.2014: "Erste Galvanometer in der Zeit 1820 bis 1840". 64. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, ECHOPHYSICS Pöllau .
- Simonyi, K. (2001). *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*. (Dritte Ausg.). Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- Venermo, J., & Sihvola, A. (Juni 2008). The Tangent Galvanometer of Johan Jacob Nervander. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, S. 16-23.
- Wagner, P., Reischl, G., & Steiner, G. (2010). *Einführung in die Physik* (Zweite Ausg.). Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG.
- Wilke, A. (1884). *A. Hartleben's elektrotechnische Bibliothek* (Zweite Ausg., Bde. 8: Die elektrischen Mess- und Präzisionsinstrumente). Wien: A. Hartleben's Verlag.