



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

**„Spezielle elektrische Messgeräte in der historischen
Sammlung der Fakultät für Physik“**

verfasst von / submitted by

Leschnik Alfred, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Education (MEd)

Wien, 2021 / Vienna, 2021

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

UA 199 520 523 02

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

Masterstudium Lehramt SEK (AB) UF Mathematik
UF Physik Lehrverbund

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Zusammenfassung

In der historischen Sammlung der Fakultät für Physik gibt es zahlreiche elektrostatische Messgeräte und Drehspulspiegelgalvanometer, die einige Jahrzehnte vor 1900 oder um 1900 verwendet wurden.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es Aufbau und Funktion einiger dieser Messgeräte zu analysieren und sie auch im Experiment einzusetzen. Voll einsatzfähig erwies sich das Elektrostatische Voltmeter nach Thomson in einem Messbereich von 0 bis 10 kV. Ein näher untersuchtes Binantenelektrometer von Bartels war nicht mehr einsatzfähig. Es konnte soweit restauriert werden, dass ein kleiner Ausschlag merkbar war, weiteren Optimierungsversuchen hielten leider die filigranen mehr als hundert Jahre alten Bernsteinisolationen und auch die dünne Folie der zweiteiligen Nadel nicht stand. Auch der Versuch, ein Einfadenelektrometer nach Wulf von Günther und Tegetmeyer zu restaurieren scheiterte an fehlenden Materialien und handwerklichem Knowhow. Ein mit Quecksilber zu betreibendes Torsions-Elektrodynamometer wurde nur theoretisch behandelt. Näherungsweise berechnete Werte für das Drehmoment bestätigen die Sinnhaftigkeit der Konstruktion aus dem Jahr 1883.

Durchaus erfolgreich waren die Experimente mit den fünf ausgewählten Drehspulspiegelgalvanometern von Hartmann & Braun, Siemens & Halske sowie Kipp & Zonen. Die Transportsicherung, Galvanometerwiderstand, der aperiodische Grenzfall und gute Linearität konnten für die jeweiligen Geräte herausgefunden werden. Die kleinste gefundene Spannungskonstante betrug $3 \frac{\mu V}{mm}$ bei einem Skalenabstand von einem Meter.

Abstract

The historical collection of the Faculty of Physics at the University of Vienna owns numerous electrostatic measuring devices and mirror galvanometers that were used a few decades before 1900 or around 1900.

The aim of this master's thesis is to analyze the construction and functionality of some of these measuring devices and also to use them in experiments. The Thomson electrostatic voltmeter with a measuring range of 0 to 10 kV proved to be fully operational. A more closely examined binant electrometer by Bartels was defective. It could be restored to such an extent that a small deflection of the needle was noticeable. Unfortunately, the filigree amber insulation, which was more than a hundred years old, and the thin foil of the two-part needle did not withstand further optimization attempts. The restoration of a unifilar Wulf electrometer from Günther and Tegetmeyer also failed due to a lack of materials and craftsmanship. A torsion electro-dynamometer from Siemens & Halske was only treated theoretically in order to avoid the use of mercury. Ap-

proximately calculated values for the torque confirm that the construction from 1883 was useful.

The experiments with the five selected reflective galvanometers from Hartmann & Braun, Siemens & Halske and Kipp & Zonen were quite successful. The transport lock, the resistance of the moving coil system, the critical damping and good linearity could be found for the respective devices. The smallest voltage constant found was $3 \frac{\mu V}{mm}$ with a scale distance of one meter.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Allgemeine Grundlagen	3
2.1	Grundlagen zu den Elektrometern	3
2.1.1	Quadranten- und Binantenelektrometer	3
2.1.2	Saiten- und Fadenelektrometer	6
2.2	Grundlagen zum Drehspulspiegelgalvanometer	7
2.2.1	Schwingungsgleichung und Dämpfungskräfte	10
2.2.2	Schwingungszustände und Dämpfungsanpassung	12
2.2.3	Nullpunktsunsicherheit	13
2.2.4	Empfindlichkeit des Galvanometers	14
2.3	Grundlagen zu den Versuchsaufbauten	16
2.3.1	Spannungsteiler	16
2.3.2	Polwender und der Seebeck-Effekt	17
3	Voltmeter nach Thomson Nr.24632 - Siemens und Halske	19
3.1	Aufbau des Gerätes	19
3.2	Experiment	23
3.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	23
3.2.2	Ergebnisse und Diskussion	24
4	Binantenelektrometer Nr.288067 - Bartels	26
4.1	Aufbau des Gerätes	26
4.2	Restaurierungsversuch, Experiment und Diskussion	31
5	Einfadenelektrometer nach Wulf Nr.3246 - Günther und Tegetmeyer	33
5.1	Aufbau des Gerätes	33
5.2	Restaurierungsversuch, Experiment und Diskussion	37
6	Torsions-Elektrodynamometer Nr.1638 - Siemens und Halske	38
6.1	Aufbau des Gerätes	38
6.2	Berechnung des Drehmoments	41

6.3	Ergebnisse und Diskussion	44
6.3.1	Anschluss 2 - Messbereich 5 - 15 A	44
6.3.2	Anschluss 3 - Messbereich 15 - 50 A	44
7	Experimente mit Spiegelgalvanometern	46
7.1	Versuchsaufbau	46
7.2	Durchführung	48
8	Spiegelgalvanometer Nr.187 - Hartmann und Braun	50
8.1	Aufbau des Gerätes	50
8.2	Experiment	53
8.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	53
8.2.2	Ergebnisse und Diskussion	54
9	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Siemens und Halske	56
9.1	Aufbau des Gerätes	56
9.2	Experiment	60
9.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	60
9.2.2	Ergebnisse und Diskussion	60
10	Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Hartmann und Braun	64
10.1	Aufbau des Gerätes	64
10.2	Experiment	68
10.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	68
10.2.2	Ergebnisse und Diskussion	69
11	Zernikegalvanometer Nr.14177 - Kipp und Zonen	71
11.1	Aufbau des Gerätes	71
11.2	Experiment	74
11.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	74
11.2.2	Ergebnisse und Diskussion	75
12	Spiegelgalvanometer mit Doppelspule Nr.865 - Hartmann und Braun	77
12.1	Aufbau des Gerätes	77
12.2	Experiment	80
12.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	80
12.2.2	Ergebnisse und Diskussion	81
13	Fazit der Arbeit	83
	Abbildungsverzeichnis	85

Tabellenverzeichnis	88
Literaturverzeichnis	89

Kapitel 1

Einleitung

Schickt man durch einen geraden Draht einen elektrischen Strom, so kann man feststellen, dass eine beiliegende Kompassnadel eine Auslenkung erfährt. Diese Entdeckung machte erstmals der dänische Physiker Hans Christian Oersted im Jahre 1820. Mit seinem berühmten Oersted'schen Experiment verband der Physiker erstmals elektrische und magnetische Phänomene miteinander.[Simonyi, 2001]

Das Galvanometer begleitete nach seiner Erfindung als wichtigstes Messgerät die heranwachsende Elektrotechnik und wurde stetig verbessert. Eine der grundlegenden Verbesserungen kam von Johann Schweigger, welcher mit dem Multiplikator (in mehrere Windungen geformter Draht) die Wirkung des elektrischen Stromes auf eine Magnetnadel verstärken konnte. Die Spiegelableseung führte Johann Poggendorf im Jahre 1826 ein, wodurch die Empfindlichkeit der Galvanometer weiter verbessert wurde.[Schlosser und Winterling, 1960]

Noch vor der Zeit der Galvanometer gab es bereits Elektroskope und Elektrometer, welche sowohl Ladungen als auch Spannungen messen konnten. Das erste Elektroskop, das „Versorium“, wurde von William Gilbert im Jahre 1600 erstellt.[Simonyi, 2001]

In der historischen Sammlung der Fakultät für Physik befinden sich zahlreiche Galvanometer und einige Elektrometer aus der Zeit um 1900. Die vorliegende Masterarbeit untersucht einige dieser Geräte, um so einen tieferen Einblick in frühere Messtechniken und deren physikalische Hintergründe zu gewinnen. Zu beachten ist, dass hier sehr unterschiedliche elektrische Messgeräte analysiert werden. Galvanometer arbeiten nach dem elektrodynamischen Prinzip und Elektrometer nach dem elektrostatischen. Mittlerweile ist der Umgang mit diesen alten Geräten weitgehend in Vergessenheit geraten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den sehr speziellen hohen technischen Stand dieser Geräte aufzuzeigen, ihren Aufbau und die Funktionsweise zu verstehen und damit auch Experimente durchzuführen.

Folgende elektrostatische Geräte wurden ausgewählt: ein elektrostatisches Voltmeter nach Thomson, ein Binantenelektrometer und ein Einfadenelektrometer nach Wulf. Weiters wird ein Torsions-

Elektrometer analysiert. Ein gewisser Schwerpunkt liegt auf den Drehspulspiegelgalvanometern. Sie stammen von den Firmen Hartmann & Braun, Siemens & Halske und Kipp & Zonen. Bei den Spiegelgalvanometern werden individuelle Eigenheiten untersucht, es ist herauszufinden, wie die Transportsicherung funktioniert und der Galvanometerwiderstand muss beachtet oder bestimmt werden. Außerdem ist es sinnvoll bei den Versuchsdurchgängen den aperiodischen Grenzfall einzustellen und Aspekte der Schwingungsgleichung sind zu berücksichtigen. Bei diesen mehr als hundert Jahre alten Geräten müssen mehrere Punkte beachtet werden, ganz anders als bei modernen Digitalmultimetern, die einfach in Schaltkreise eingebunden werden.

Alle Messungen wurden im Christian-Doppler-Hörsaal der Fakultät für Physik in Wien durchgeführt. Das dort befindliche Pult für Hörsaalexperiment und auch der Fußboden rund um das Pult erwies sich als sehr stabil, was eine unabdingbare Voraussetzung für die Experimente mit den sehr erschütterungsempfindlichen Spiegelgalvanometern ist.

Kapitel 2

Allgemeine Grundlagen

2.1 Grundlagen zu den Elektrometern

Elektrometer sind Elektroskope mit kalibrierter Skala und dienen dem Nachweis elektrischer Ladungen und Spannungen. Sie beruhen auf der Wirkung einer elektrischen Kraft auf ein bewegliches mechanisches System. Diese elektrostatische Anziehung oder Abstoßung ist die unmittelbare Folge einer Potentialdifferenz zwischen zwei Leitern. Das Goldblattelektroskop zählt zu den ältesten elektrischen Messgeräten der Physiker.[Palm, 1942]

2.1.1 Quadranten- und Binantenelektrometer

Das Quadrantenelektrometer von Thomson besteht aus einem Zylinder, welcher in vier symmetrischen Quadranten unterteilt ist. In der Mitte dieses Zylinders schwebt zentriert eine Nadel in der Form zweier Kreissektoren. Die gegenüberliegenden Quadranten sind miteinander verbunden. In der Ruhelage befindet sich die Nadelachse parallel zu einer der Trennungslinien der Quadranten. Bei einer Potentialdifferenz beider Quadrantenpaare dreht sich die Nadel demjenigen Paar hin, dessen Potential stärker vom eigenen abweicht. Die entgegengerichtete Rückstellkraft des Aufhängfadens der Nadel, welches durch dessen Torsion entsteht, sorgt bei Gleichheit für eine finale Stellung beim Winkel ϑ (siehe Abb.2.1a). Solange sich die Nadel nur um einen kleinen Winkel ϑ von der Ruhelage entfernt, können die störenden Einwirkungen der Ränder vernachlässigt werden.[Geiger und Scheel, 1927]

Eine Abwandlung dieser sind die Binantenelektrometer (siehe Kapitel 4). Hier besteht die Nadel aus zwei voneinander isolierten Hälften, welche auf entgegengesetzte Potentiale geladen werden (siehe Abb.2.1b). Dadurch können einige Unstimmigkeiten des Quadrantenelektrometers vermieden werden:

- die fehlende Proportionalität zwischen Empfindlichkeit und Ladung der Nadel,
- die von den Rändern der Nadeln wirkenden Störungen und folglich

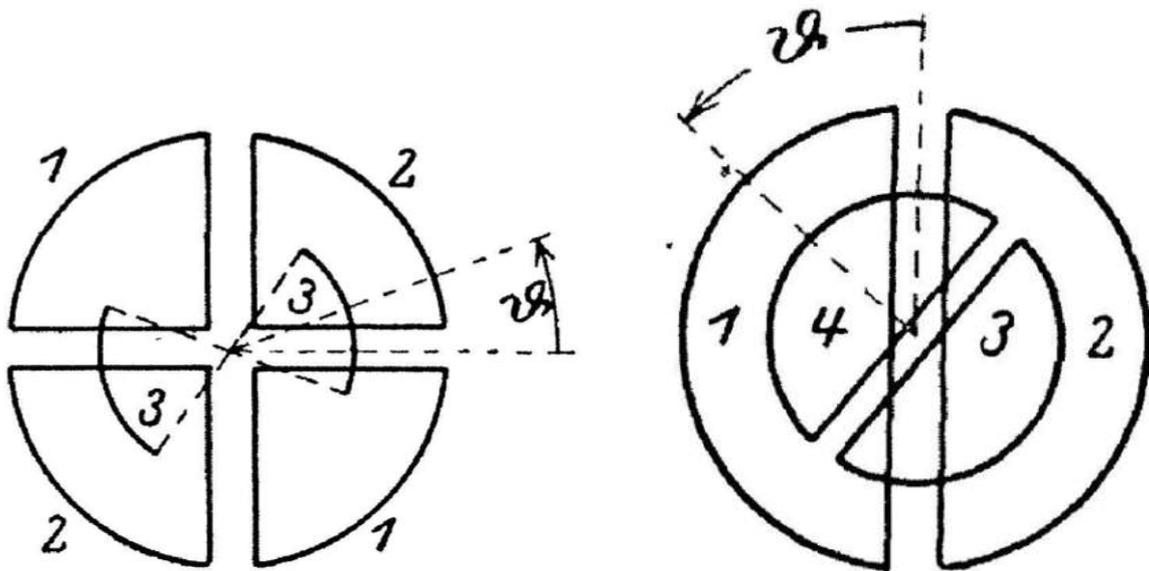


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung (a) Quadrantenelektrometer (b) Binantenelektrometer [Geiger und Scheel, 1927]

- die Messgenauigkeit nur bei kleinen ϑ (im Binantenelektrometer sind Winkel bis zu $\vartheta = 80^\circ$ möglich).

Werden die Ladungen der Nadelhälften mit N_1 und N_2 und die der Binanten mit V_1 und V_2 bezeichnet, so gilt für den Ausschlag der einzelnen Hälften, wenn C eine Konstante darstellt, folgende Gleichungen

$$\vartheta_1 = C \cdot (V_1 - V_2) \cdot \left(N_1 - \frac{V_1 + V_2}{2}\right)$$

und für die andere Hälfte

$$\vartheta_2 = C \cdot (V_1 - V_2) \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} - N_2\right)$$

Folglich für den Gesamtausschlag

$$\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2 = C \cdot (N_1 - N_2) \cdot (V_1 - V_2) = C \cdot 2 \cdot N \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.1)$$

Die letzte Vereinfachung ist mit der Annahme $N_1 = -N_2 = N$ möglich. Durch Änderung der Hilfsspannung kann die Empfindlichkeit des Messgerätes variiert werden.[Jaeger, 1922]

Auf den Aufbau des Binantenelektrometers wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

Nach Jaeger (1922) kann sowohl beim Quadranten- als auch beim Binantenelektrometer zwischen folgenden Schaltungsweisen unterschieden werden (vgl. Abb.2.2):

- Quadrantenschaltung: Ein Quadrantenpaar wird mit dem Gehäuse geerdet und das andere

auf das zu messende Potential gebracht. Die Nadel soll auf einem konstanten höheren Potential gehalten werden.

- Nadelschaltung: Das zu messende Potential wird auf die Nadel geladen. Beide Quadrantenpaare werden auf ein gleiches Potential mit unterschiedlichen Vorzeichen gebracht.
- Idiostatische Schaltung: Die zu messende Spannung wird an ein Quadrantenpaar gelegt. Das andere Paar und die Nadel sind währenddessen geerdet.
- Doppelschaltung: Ähnlich wie die idiostatische Schaltung, nur wird zusätzlich auch die Nadel mit der Messspannung aufgeladen.

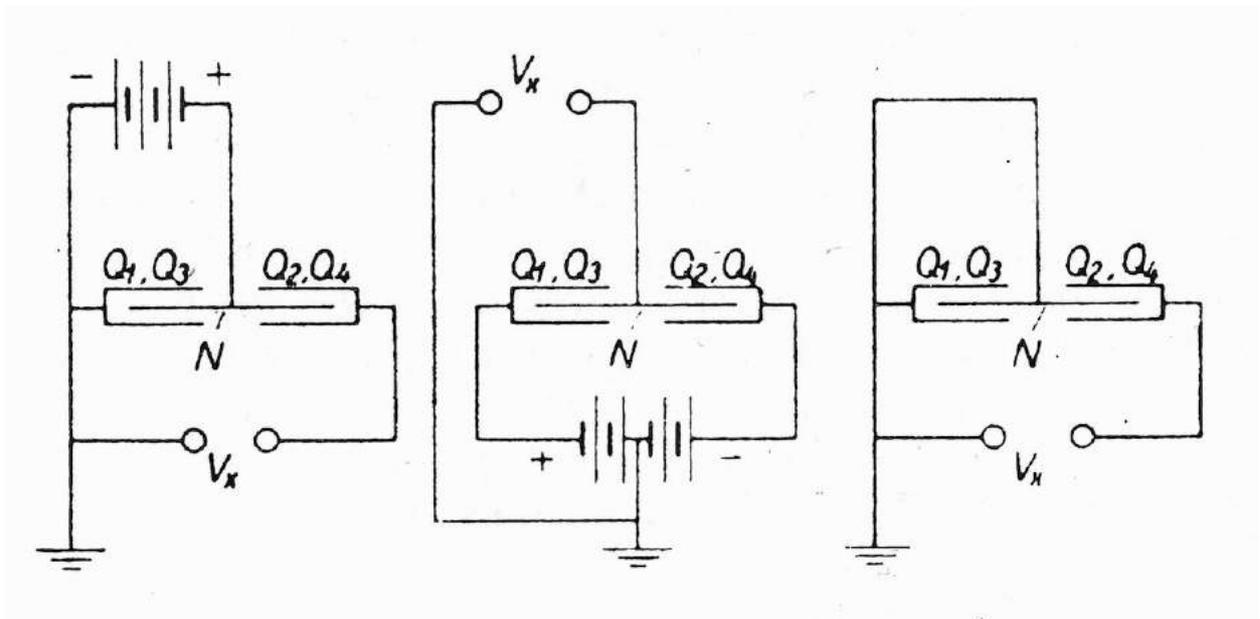


Abbildung 2.2: Schaltungen des Quadrantenelektrometers: (von links nach rechts) Quadrantenschaltung, Nadelschaltung und idiostatische Schaltung [Gobrecht, 1971, S.65]

2.1.2 Saiten- und Fadenelektrometer

Das erste Saitenelektrometer wurde im Jahre 1902 vom deutschen Physiker Max Edelman herausgebracht. [Meyer und Moerder, 1957]

Sowohl beim Einfadenelektrometer nach Wulf (siehe Kapitel 5) als auch bei einem Saitenelektrometer wird die Ausbiegung eines elektrisch geladenen dünnen Fadens (Saite) zwischen zwei Schneiden beobachtet. Das zu messende Potential kann entweder an den Schneiden angebracht werden oder zwischen Faden und Gehäuse. Im letzteren Fall müssen entgegengesetzt gleiche Hilfsspannungen an den Schneiden geladen werden, beispielsweise mit einer Batterie. Außerdem ist auch die bereits erwähnt idiostatische Schaltung ohne Hilfsspannung möglich (siehe Abb.2.3). [Meyer und Moerder, 1957]

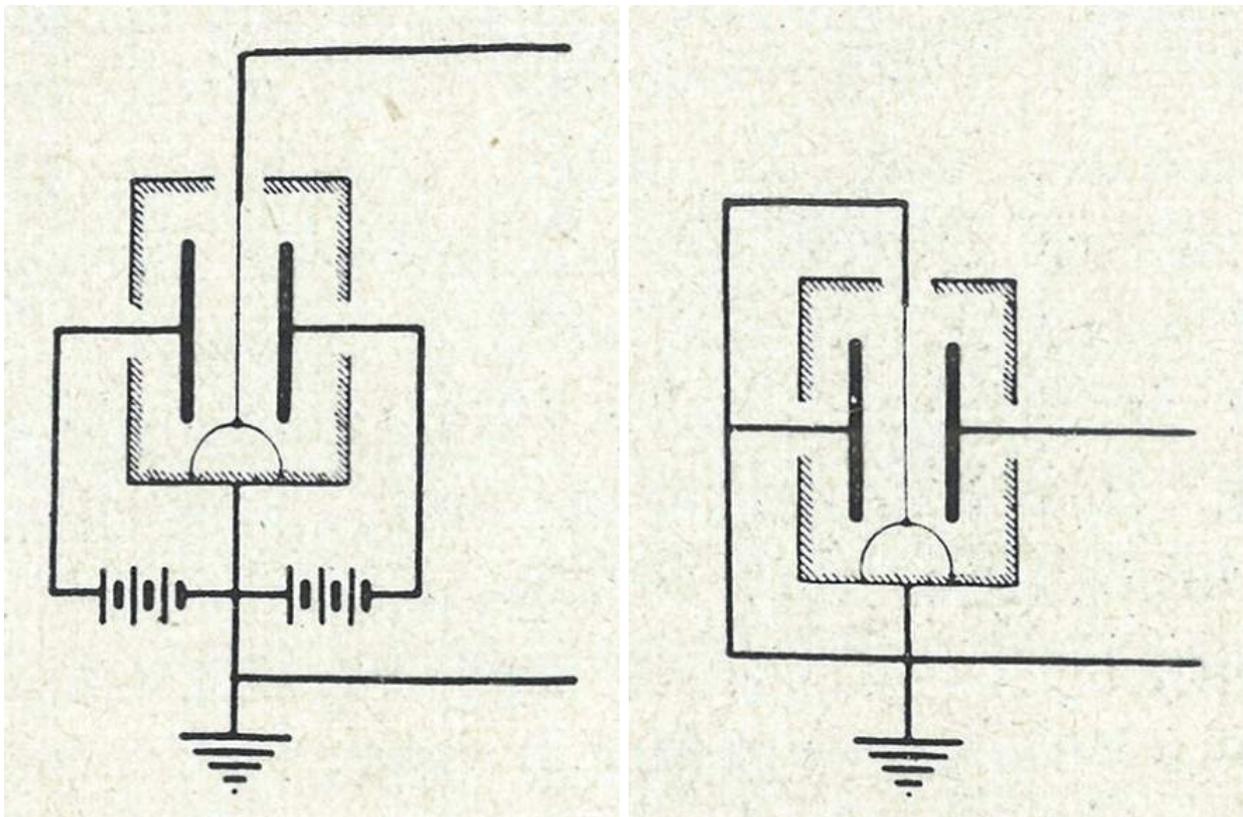


Abbildung 2.3: Schaltskizzen: (a) Einfadenelektrometer mit Hilfsspannung (b) Idiostatische Schaltung eines Saitenelektrometers [Meyer und Moerder, 1957, S.LIII]

2.2 Grundlagen zum Drehspulspiegelgalvanometer

Elektrische Ströme erzeugen Magnetfelder, die in einem weiteren Magnetfeld zu einem Drehmoment führen können. Jene Messgeräte, welche auf der Wechselwirkung einer stromdurchflossenen Spule mit einem Magnetfeld beruhen, nennt man im Allgemeinen Galvanometer. [Demtröder, 2003]

Das Spiegelgalvanometer (siehe Abb.2.4) ist ein sehr empfindliches Drehspulinstrument zur Messung geringer Ströme. Die Spule ist an einem Faden befestigt und so im Feld eines Permanentmagneten aufgehängt, dass sie einen Drehmoment erfährt, wenn sie von einem Strom durchflossen wird. Außerdem ist an dem Faden ein Spiegel befestigt, welcher es ermöglicht, dessen Verdrehung mit Hilfe eines reflektierten Lichtstrahls an einer Skala ablesen zu können (siehe Abb.2.6). Die kreisförmig gestalteten Polschuhe und der zylindrische Eisenkern erzeugen ein radialsymmetrisches Feld, sodass Magnetfeld und Spulenstrom stets senkrecht zueinander stehen (unabhängig vom Drehwinkel).

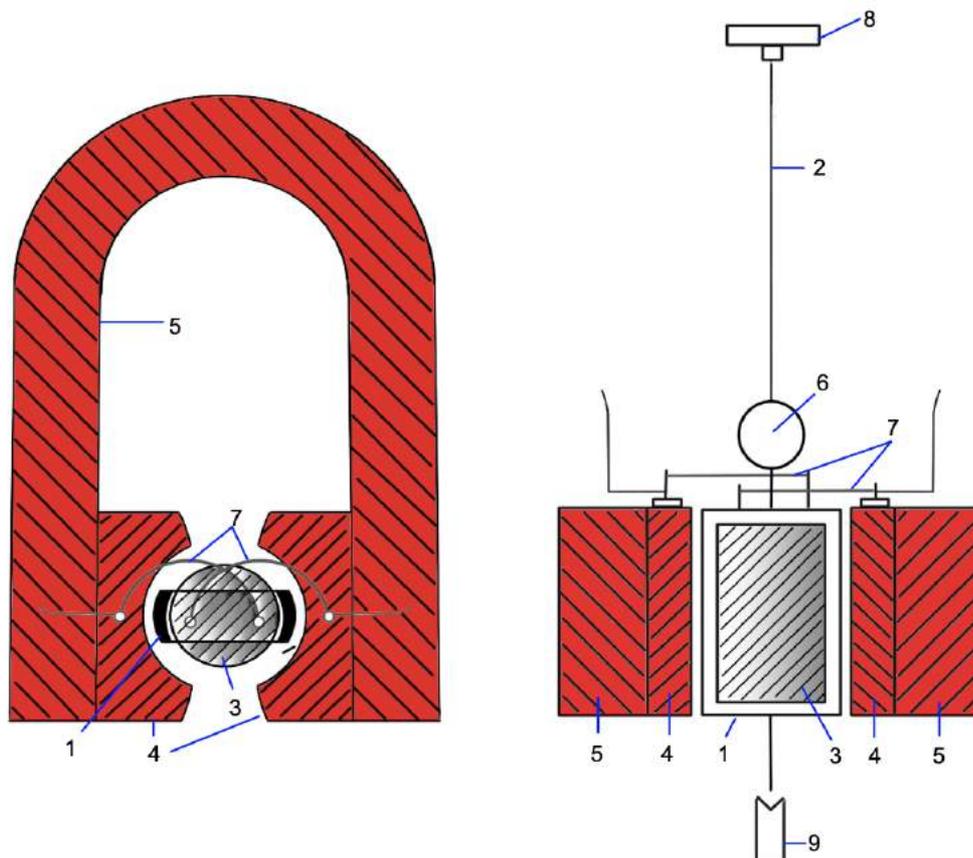


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau eines Drehspulspiegelgalvanometers mit 1) Drehspule, 2) Torsionsfaden, 3) Eisenkern, 4) Polschuhe, 5) Magnet, 6) Spiegel, 7) elektrische Kontakte, 8) Torsionskopf und 9) Arretierungsvorrichtung

Die Richtung der Kraft, welche ein stromdurchflossener Leiter im homogenen Magnetfeld erfährt, richtet sich nach dessen Feld. Dieses verursacht einerseits eine Feldstärkung, andererseits auch eine Schwächung des Erregerfeldes. Die Kraft ist demnach zur Feldschwächung gerichtet (siehe Abb.2.5).

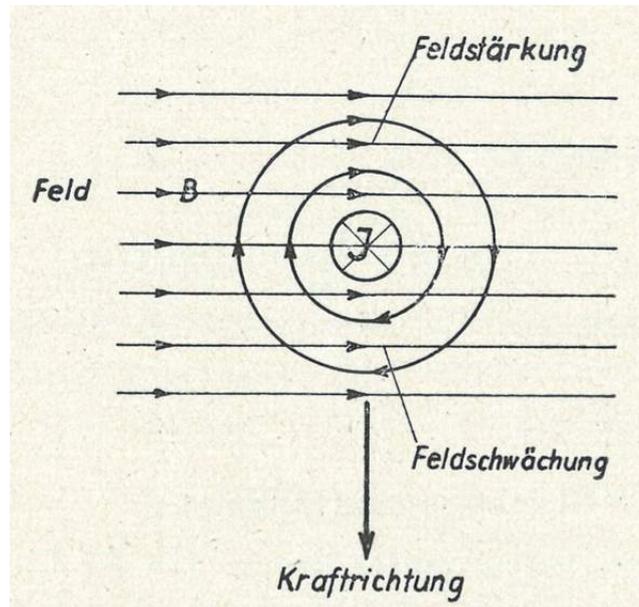


Abbildung 2.5: Kraftrichtung beim stromdurchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld. Auf die Ladungen im Leiter wirkt die Lorentzkraft. [Meyer und Moerder, 1957, S.2]

Nach dem Gesetz von Biot-Savart, lässt sich die Größe der Kraft pro Längeneinheit des Leiters als Produkt des Stromes I im Leiter und des Erregerfeldes B beschreiben, sofern die Stromrichtung normal zum Magnetfeld steht:

$$F = I \cdot B \quad (2.2)$$

Auf das Drehspulsystem übertragen führt dies zu einem Drehmoment der Drehspule (siehe Abb.2.4) mit N -Windungen

$$M = F \cdot l \cdot b \cdot N = I \cdot B \cdot A \cdot N = I \cdot q \quad (2.3)$$

wobei die Spulenfläche A sich aus dem Produkt der Spulenlänge l und -breite b bestimmen lässt. Die Größe $q (= B \cdot A \cdot N)$ wird auch als „dynamische Galvanometerkonstante“ bezeichnet.

Im Drehspulgalvanometer wirkt diesem Drehmoment ein Gegendrehmoment $D \cdot \phi$ entgegen, wobei D das Direktionsmoment ist und ϕ der Drehwinkel. Dieses Gegendrehmoment wird beispielsweise von einer Spiralfeder oder einem Aufhängefaden erzeugt. Bei einem Drehspulspiegelgalvanometer handelt es sich hierbei um den Aufhängefaden des Spiegels. Das Direktionsmoment wächst linear mit dem anwachsenden Drehwinkel (Hookesches Gesetz), bis es bei einem Drehwinkel ϕ zum Stillstand kommt. Der Stillstand ist erreicht, wenn die Federkraft der Summe der Lorentzkraft

entspricht. Es gilt der indirekt proportionale Zusammenhang:

$$\phi = \frac{M}{D} \quad (2.4)$$

Nach Gleichung (2.3) ist der Ausschlag a dem Strom I proportional und seine Richtung ist dabei von der Stromrichtung abhängig. Da sowohl M eine lineare Größe mit I ist, als auch D linear sich mit dem Drehwinkel ändert, ergibt sich insgesamt ein linearer Ausschlag. [Meyer und Moerder, 1957]

Wie aus Abb.2.6 ersichtlich ist, kann die Umrechnung des gemessenen Ausschlags a in den Drehwinkel ϕ über den Tangens verlaufen. Der Normalabstand r des Galvanometers zur Skala wird in den Versuchen der Einfachheit halber mit 1 m gewählt. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass der Strahl des Lasers L eine Drehung um 2ϕ erfährt, wenn sich der Spiegel um den Winkel ϕ dreht. Also

$$\tan(2\phi) = \frac{a}{r}$$

und somit folgt für den Winkel ϕ

$$\phi = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{a}{r}\right) \quad (2.5)$$

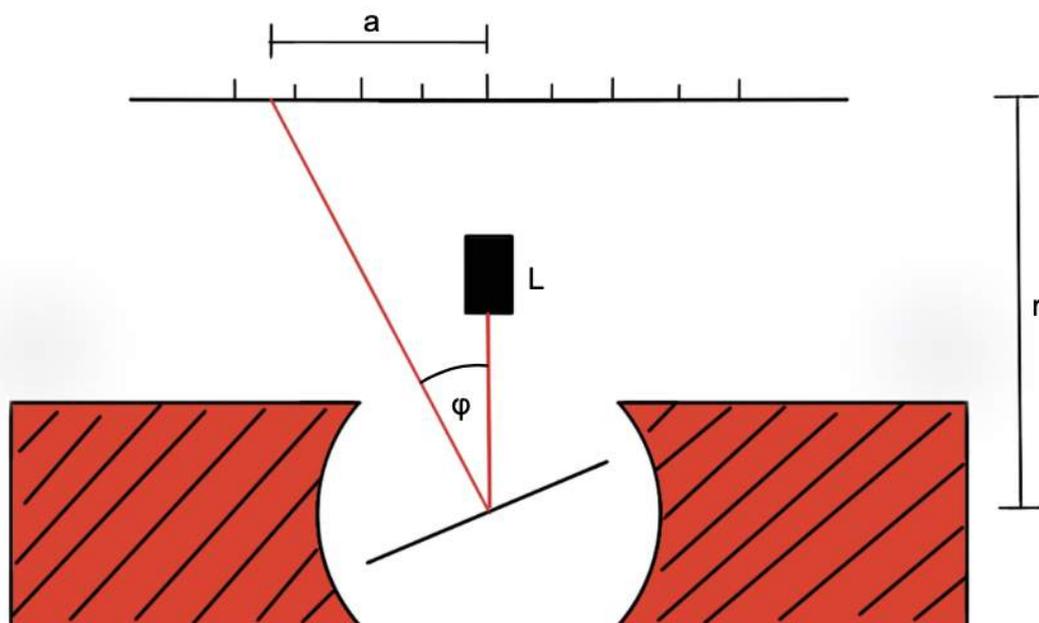


Abbildung 2.6: Ablesevorrichtung eines Spiegelgalvanometers

Der Ausschlag a ist dem Drehwinkel proportional, solange die Skala kreisbogenförmig aufliegt und linear geteilt ist. Bei der hier verwendeten geraden und gleichmäßigen Skala ist dies nur mehr näherungsweise der Fall (für kleine Ausschläge bis 100 mm). Für größere Ausschläge müssten die Ablesungen noch um einen Wert Δa , auch Tangenskorrektur genannt, korrigiert werden. Für die Tangenskorrektur gilt die Näherungsformel

$$\frac{\Delta a}{a} \approx -\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{a \cdot a_0}{r}\right)^2$$

mit a_0 als Skalenstrichabstand. [Schlosser und Winterling, 1960]

Die Korrektur mit $r = 1000$ mm und $a_0 = 10$ mm ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Es ist erkennbar, dass Δa bis zu einem Ausschlag von 100 mm vernachlässigt werden kann. Aus diesem Anlass wird bei den Experimenten mit den Spiegelgalvanometern nur bis zu dem soeben genannten Ausschlag gemessen.

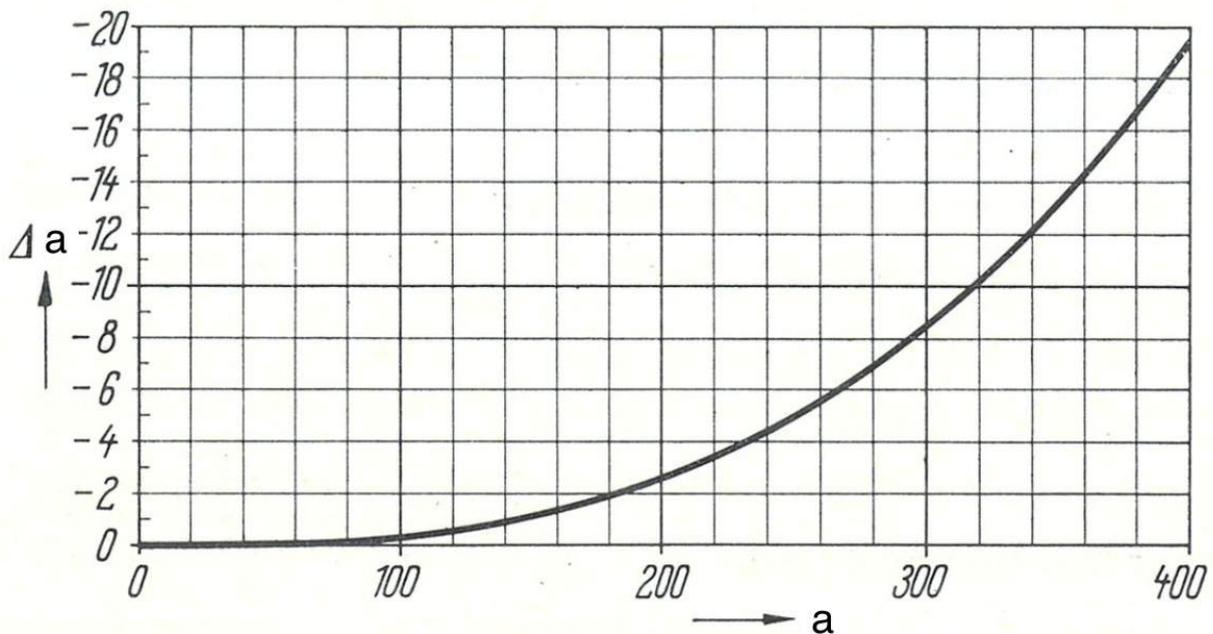


Abbildung 2.7: Tangenskorrektur Δa abhängig vom Ausschlag a in mm; $r = 1000$ mm, $a_0 = 10$ mm [Schlosser und Winterling, 1960]

2.2.1 Schwingungsgleichung und Dämpfungskräfte

Betrachtet man das schwingfähige System des Drehspulgalvanometers, bestehend aus Spule, Spiegelhalter und Spiegel, ergibt sich nach Moerder (1957) für die vollständige Schwingungsgleichung

$$\Theta \frac{d^2 \phi}{dt^2} + p \frac{d\phi}{dt} + D\phi = i_g \cdot q \quad (2.6)$$

mit dem Trägheitsmoment Θ , der Dämpfungskonstante p und dem Direktionsmoment D (vgl. Kapitel 2.2). Zudem sind der Auslenkwinkel ϕ der Spule, ihre Winkelgeschwindigkeit $\frac{d\phi}{dt}$ und ihre Winkelbeschleunigung $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ zu berücksichtigen. Die rechte Seite der Gleichung beinhaltet den Augenblickswert des Galvanometerstromes i_g und die dynamische Galvanometerkonstante $q = B \cdot A \cdot N$. Auf die Formel (2.6) blickend, lässt diese sich in einzelne Glieder aufteilen:

- Trägheits- und Beschleunigungsglied
- Dämpfungsglied
- Rückstellmoment (aufgrund der Federkraft)
- Drehmoment aufgrund der Lorentzkraft (Strommoment)

Das Trägheits- und Beschleunigungsglied $\Theta \frac{d^2\phi}{dt^2}$ stellt die Bewegungsgleichung einer Rotation dar. Dieselbe lässt sich mit dem zweiten Newton'schen Gesetz vergleichen.

Während der Spulenbewegung treten zusätzlich zur Kraftwirkung noch Dämpfungskräfte auf. Diese beeinflussen zwar den zeitlichen Verlauf der Auslenkung, aber nicht die Empfindlichkeit des Galvanometers. Diese Dämpfungskräfte können auf drei Ursachen zurückgeführt werden:

- elektromagnetische Dämpfung
- elektrische Wirbelströme
- Luftwiderstand

Beim Drehspulgalvanometer überwiegt die elektromagnetische Dämpfung. Diese kann auf das Induktionsgesetz zurückgeführt werden. Demnach induziert die Spulenbewegung mit der Drehgeschwindigkeit $\frac{d\phi}{dt}$ in ihr eine Spannung U_{Ind} . Die induzierte Spannung ruft im geschlossenen Stromkreis folglich einen Strom hervor. Nach der Lenz'schen Regel ist dieser dem Galvanometerstrom entgegengesetzt. Nach dem Induktionsgesetz und dem magnetischen Fluss $\Phi = B \cdot A$ gilt aber

$$U_{Ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot B \cdot A \cdot \frac{d\phi}{dt} = -q \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Weiters mit dem Strom I aus dem Ohm'schen Gesetz folgt der Ausdruck

$$I = \frac{U_{Ind}}{R_g + R_a} = -\frac{q}{R_g + R_a} \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Nach den Gleichungen (2.3) und (2.7) ist das von der Drehspule erzeugte Drehmoment

$$M_D = q \cdot I = -\frac{q^2}{R_g + R_a} \frac{d\phi}{dt} = -p \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

Die Dämpfungskonstante p aus dem Dämpfungsglied $p \frac{d\phi}{dt}$ erhält somit den Wert

$$p = \frac{(q)^2}{R_g + R_a} = \frac{(B \cdot A \cdot N)^2}{R_g + R_a} \quad (2.9)$$

Aus den Formel (2.9) und der dynamischen Galvanometerkonstante $q = B \cdot A \cdot N$ folgt, dass die elektromagnetische Dämpfung mit dem Quadrat der magnetischen Feldstärke B und der Spulenfläche A zunimmt und mit dem Widerstand R linear abnimmt. Bei einem sehr großen Schließungswiderstand wird die elektromagnetische Dämpfung sehr klein. Dämpfungen, welche bei sehr kleinem p auftreten, sind auf die anderen beiden Dämpfungsursachen zurückzuführen.[Werner, 1928] Nach dem Induktionsgesetz ist die Dämpfung der Drehgeschwindigkeit proportional.

Wenn die Schwingungsvorgänge zur Ruhe gekommen sind, fallen die ersten beiden Glieder der Formel (2.6) weg. Übrig bleibt das vom Strom erzeugte Drehmoment $i_g \cdot q$ und das Rückstellmoment des tordierten Fadens $D\phi$. Folglich erhalten wir die im vorherigen Kapitel bereits erwähnte Formel (2.4) in der Form

$$\phi = \frac{q}{D} \cdot i_g \quad (2.10)$$

[Meyer und Moerder, 1957]

2.2.2 Schwingungszustände und Dämpfungsanpassung

Experimentell ist festzustellen, dass bei kleinen Werten von p die Spule mehrmals um die neue Gleichgewichtslage pendelt, bevor sie die endgültige Position einnimmt. Außerdem auch, dass bei sehr großen Werten für die elektromagnetische Dämpfung die Spule ganz langsam in die finale Lage geht: Das Galvanometer „kriecht“. Wie bereits erwähnt, hat die Dämpfung keinerlei Einfluss auf die Empfindlichkeit und somit ist in beiden Fällen der Endausschlag derselbe. Die erwähnten Zustände nennt man „periodisch“ und „aperiodisch“ (siehe Abb.2.8).[Werner, 1928]

Wenn vom aperiodischen Zustand ausgehend die Dämpfung sukzessive verstärkt wird, wird ein Punkt erreicht, wo keine Überschwingung mehr stattfindet. Dieser Zustand wird „aperiodischer Grenzzustand“ genannt. Um eine Messung mit brauchbaren Einstellzeiten durchführen zu können, soll dieser Zustand angestrebt werden.

Um diesen aperiodischen Grenzfall zu erhalten, muss der zugeschaltene Außenwiderstand R_a entsprechend angepasst werden. Es soll gelten

$$R_a = R_{agr}$$

wobei R_{agr} als „äußerer Grenzwiderstand“ bezeichnet wird. Dieses Vorgehen der Anpassung des äußeren Widerstandes an R_{agr} nennt man „Dämpfungsanpassung“.[Meyer und Moerder, 1957]

ungedämpft

gedämpft

aperiodischer
Grenzfall

aperiodisch

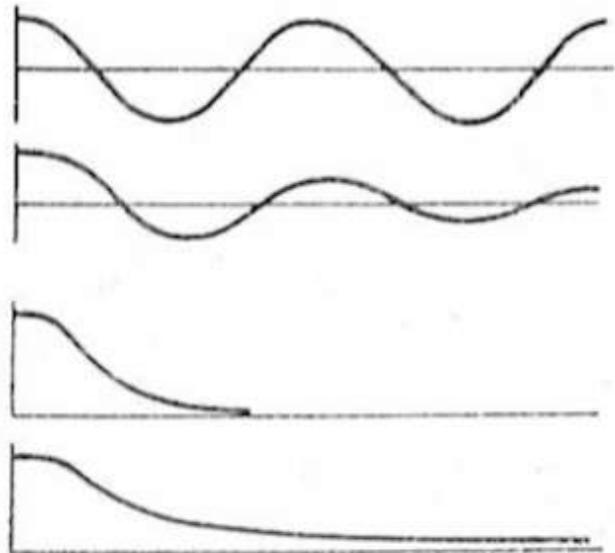


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Schwingungszustände [Kohlrausch, 1956, S.39]

2.2.3 Nullpunktunsicherheit

Um ein möglichst empfindliches Galvanometer zu haben, sollte ein großer Skalenabstand r gewählt werden. Die obere Grenze dieses Abstandes wird von der Nullpunktunsicherheit gebildet. Sie beinhaltet folgende Erscheinungen:

- Die Ableseunschärfe hängt mit der zugehörigen Optik zusammen. Minderwertige Linsen und schlechte Spiegel verursachen eine Verwaschenheit des reflektierten Lasers. Bei einer Vergrößerung des Abstandes, würden die Ausschläge nur ungenauer abgelesen werden können.
- Die Nullpunktsinkonstanz wird durch eine Ermüdung des Aufhängefadens und Remanenzerscheinungen der Spule verursacht. Die Unsicherheit des Ausschlags wächst ebenfalls mit dem Skalenabstand r . Verstärkt tritt diese Erscheinung nach einem Überausschlag auf.
- Brownsche Molekularbewegungen und spontante Stromschwankungen führen (bei sehr empfindlichen Galvanometern) zu einem unregelmäßigen Wandern des Nullpunktes, auch Brownsche Nullruhe genannt. Dieses Phänomen begrenzt zusätzlich zum Abstand r auch die höchste erreichbare Empfindlichkeit des Drehspulspiegelgalvanometers.
- Die Erschütterungsempfindlichkeit des Galvanometers ist von der Bauart des Gerätes abhängig.

[Meyer und Moerder, 1957]

2.2.4 Empfindlichkeit des Galvanometers

Die Empfindlichkeit des Galvanometers beschreibt im Allgemeinen die Stärke des Galvanometerausschlages in Abhängigkeit der zu messenden Größe. Es ist zwischen Stromempfindlichkeit und Spannungsempfindlichkeit zu unterscheiden.

Stromempfindlichkeit

Der gemessene Ausschlag an einem Galvanometer ist ein Maß für die Stärke und Richtung des Stromes, welcher durch die Spule des Messgerätes fließt. Die abzulesende Auslenkung a ist bei guten Galvanometern dem Messstrom I proportional (siehe Gleichung (2.3)) und es gilt:

$$a = S_I \cdot I \quad (2.11)$$

Der Proportionalitätsfaktor S_I wird Stromempfindlichkeit des Messinstrumentes genannt. Diese Größe hängt sowohl von den elektrischen Eigenschaften des Galvanometers ab als auch von seiner Zeigerlänge und Skaleneinteilung ab. Sie hat bei Spiegelgalvanometern die Dimension $\frac{mm/m}{A}$. Die Stromempfindlichkeit gibt somit an, welcher Ausschlag (in mm/m) zu erwarten ist, wenn das Galvanometer von einem Strom I mit der Einheit A durchflossen wird. [Schlosser und Winterling, 1960]

Zur Kennzeichnung wird oftmals auch der Kehrwert der Stromempfindlichkeit angegeben, die sogenannte Stromkonstante C_I (Gleichung (2.12)).

$$C_I = \frac{1}{S_I} \quad (2.12)$$

Die Dimension ist entsprechend dem Kehrwert der Dimension der Stromempfindlichkeit $\frac{A}{mm/m}$. C_I gibt somit an, welchen Strom das Galvanometer benötigt, um eine Auslenkung der entsprechenden Skaleneinheit (bei den Experimenten dieser Arbeit 1 mm) hervorzurufen. [Schlosser und Winterling, 1960]

Spannungsempfindlichkeit

Wird eine Spannung U an das Galvanometer angelegt, so kann analog zur Stromempfindlichkeit eine Spannungsempfindlichkeit S_U definiert werden. Falls zusätzlich von einem vorgeschalteten Widerstand ausgegangen wird, gilt

$$S_U = \frac{a}{U} = \frac{a}{R \cdot I} = \frac{1}{R} \cdot S_I \quad (2.13)$$

mit dem Gesamtwiderstand des Schaltkreises R und der Dimension $\frac{mm/m}{V}$. Analog zur Stromkonstanten (vgl. Gleichung (2.12)) gilt:

$$C_U = \frac{1}{S_U} \quad (2.14)$$

mit der Dimension $\frac{V}{mm/m}$. Die Größen S_U und C_U gehören nicht zu den Kennzahlen eines Galvanometers, da sie vom Gesamtwiderstand des Messkreises abhängen.[Schlosser und Winterling, 1960]

Analog zur Stromkonstanten C_I gibt C_U somit an, welche Spannung das Galvanometer benötigt, um eine Auslenkung der entsprechenden Skaleneinheit (bei den Experimenten dieser Arbeit 1 mm) hervorzurufen.[Schlosser und Winterling, 1960]

Mit den Gleichungen (2.12) bis (2.14) lässt sich folgende Beziehung zwischen Stromkonstante und Spannungskonstante herstellen:

$$C_U = C_I \cdot R \quad (2.15)$$

wobei der Gesamtwiderstand des Schaltkreises R die Summe des Galvanometerwiderstands R_G und des Außenwiderstands R_a ist.

2.3 Grundlagen zu den Versuchsaufbauten

2.3.1 Spannungsteiler

Da die verwendeten Galvanometer sehr empfindlich sind und nur sehr geringe Spannungen angelegt werden dürfen, wird eine Potentiometerschaltung, auch Spannungsteiler genannt, benötigt. Diese Schaltung gestattet es beliebig kleine Spannungen zu erzeugen und so das Messgerät mit einem passenden Spannungsbereich zu versorgen. Es handelt sich hier um eine Reihenschaltung von zwei Widerständen R_1 und R_2 , durch die eine elektrische Spannung U aufgeteilt wird (siehe Abb.2.9).

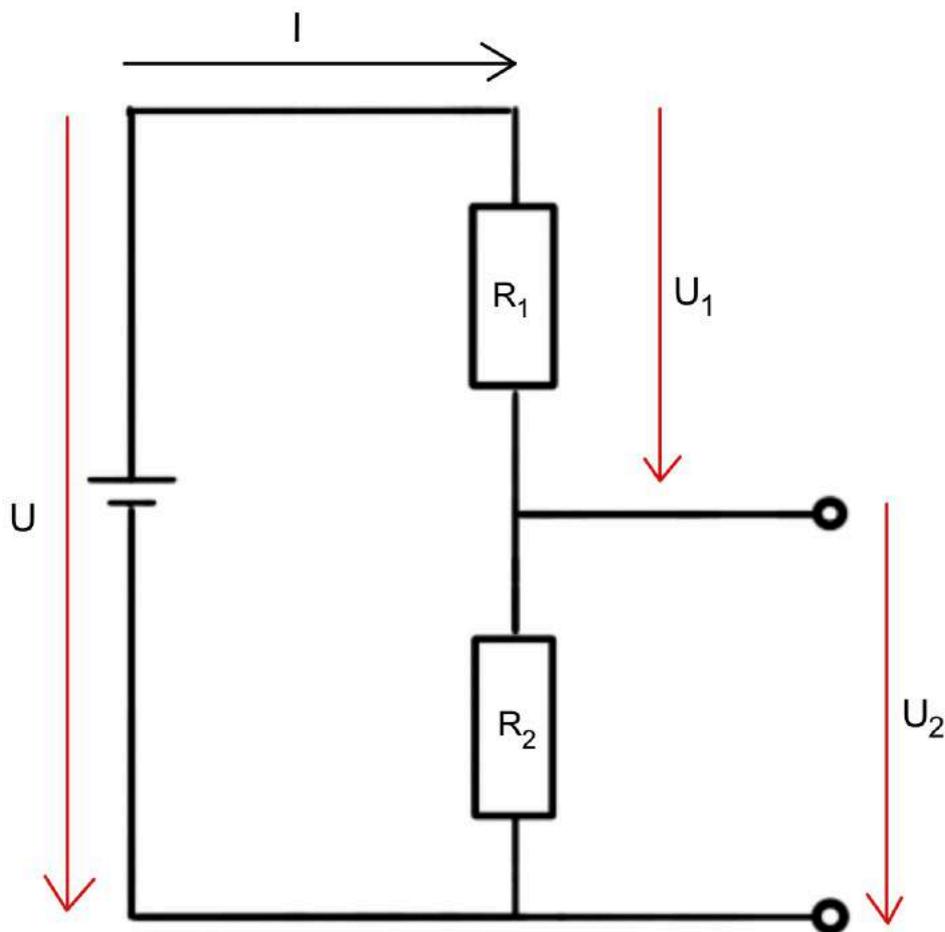


Abbildung 2.9: Schaltplan eines Spannungsteilers

Aus dem Ohm'schen Gesetz $U = R \cdot I$ ergibt sich folgende Formel zur Bestimmung der Stromstärke

$$I = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (2.16)$$

Da der Strom für alle Bauteile ident ist, lässt sich die gesuchte Spannung U_2 mit einer bekannten Gesamtspannung und bekannten Widerständen ermitteln mit

$$U_2 = I \cdot R_2 = \frac{U}{R_{ges}} \cdot R_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.17)$$

Durch eine weitere Äquivalenzumformung ergibt sich außerdem folgende Beziehung

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_{ges}} \quad (2.18)$$

wo zu erkennen ist, dass der Spannungsabfall im selben Verhältnis zur Spannung U steht, wie der Widerstand R_2 zum Gesamtwiderstand.

2.3.2 Polwender und der Seebeck-Effekt

Werden Kontakte in einem Stromkreis, der aus mindestens zwei verschiedenen Leitern besteht, auf unterschiedliche Temperaturen gebracht, so entsteht eine messbare Spannung U_{Sb} . Dieses Phänomen nennt man „Seebeck-Effekt“ (siehe Abb.2.10). Die Spannung U_{Sb} lässt sich folgen-

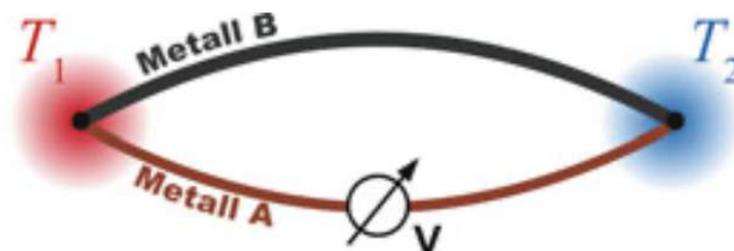


Abbildung 2.10: Veranschaulichung des Seebeck-Effektes [Roth und Stahl, 2018, S.240]

dermaßen bestimmen

$$U_{Sb} = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (2.19)$$

wobei die Seebeck-Koeffizienten S_A und S_B Materialkonstanten zweier Materialien A und B darstellen. Diese Koeffizienten sind temperaturabhängig. Bei kleinen Temperaturdifferenzen kann diese Abhängigkeit vernachlässigt werden und Gleichung (2.19) kann in die vereinfachte Form

$$U_{Sb} = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.20)$$

umgeschrieben werden.[Roth und Stahl, 2018]

In empfindlichen Messkreisen sind thermoelektrische Spannungen unerwünschte Störungen, die aber in einfacher Weise durch Umpolen des Stromes beseitigt werden können.

Als Polwender in den Versuchsdurchführungen der Drehspulspiegelgalvanometer wird ein Kreuzschalter (siehe Abb.2.11) verwendet. Dieser besitzt vier Anschlüsse und ändert bei Betätigung die Stromrichtung des Versuchsaufbaus.

Sind U_1 und U_2 die gemessenen Spannungen bei entgegengerichteten vorhandenen Strömen, so gilt

$$U_1 = U + U_{Sb}$$

$$U_2 = -U + U_{Sb}$$

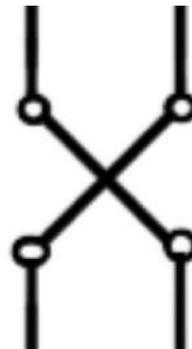
Wobei U die eigentlich gesuchte Spannung ist und U_{Sb} die so eben erwähnte unerwünschte Thermospannung. Es ergibt sich der Mittelwert

$$\bar{U} = \frac{U_1 - U_2}{2} = \frac{U + U_{Sb} + U - U_{Sb}}{2} = \frac{2 \cdot U}{2} = U \quad (2.21)$$

Durch Einsetzen eines Polwenders wird also die Thermospannung U_{Sb} eliminiert.



(a)



(b)

Abbildung 2.11: (a) Kreuzschalter und (b) Schaltzeichen

Kapitel 3

Voltmeter nach Thomson Nr.24632 - Siemens und Halske

3.1 Aufbau des Gerätes

Die Abbildung 3.1 zeigt ein elektrostatisches Voltmeter nach Thomson mit der Inventarnummer VII/90. Es handelt sich um eine Variante eines Quadrant-Elektrometers von der Firma Siemens & Halske mit der Seriennummer 24632. Das quaderförmige Blechgehäuse ist $(43,5 \pm 0,5)$ cm hoch und besitzt eine rechteckige Grundfläche mit einer Länge von $(33,5 \pm 0,5)$ cm und der Breite $(15,0 \pm 0,5)$ cm. Zusätzlich besitzt es elektrisch gut isolierende Stellfüße mit auffallend großem Durchmesser, welche mittels Schrauben verstellbar und leicht abschraubbar sind. An der Vorderseite befindet sich eine abnehmbare Glasplatte, welche an seitlichen Schienen befestigt werden kann. Diese dient der Isolierung der Messvorrichtung. An der Rückseite befinden sich die Anschlüsse des Voltmeters. Das Gerät dient der Hochspannungsmessung und besitzt je nach Einstellung einen Messbereich von 5000 V oder 10000 V.

Im inneren des Gehäuses befinden sich wie in Abbildung 3.2 zu sehen, die beiden Elektroden: zwei feststehende Quadrantenpaare aus Messing und ein beweglicher Flügel aus Aluminium. Der Flügel befindet sich zwischen den Quadrantenpaaren und ist an einer Drehachse montiert.

Direkt am Flügel befindet sich der Zeiger, welcher vor einer empirisch festgelegten Skala (siehe Abb.3.2) schwingt. Der Ausschlag erfolgt aufgrund der elektrostatischen Anziehung der beiden entgegengesetzt geladenen Elektroden. Die Linearität des Ausschlags wird durch die besondere Form der Elektroden erreicht. Der Aluminiumstab über der Skala kann mit Hilfe eines Hebels, der sich seitlich beim Gehäuse befindet (siehe Abb.3.1), auf Skalenhöhe hinuntergesetzt werden und somit die Zeigerschwingung dämpfen.



Abbildung 3.1: Elektrostatisches Voltmeter nach Thomson - Nr.24632



Abbildung 3.2: Nr.24632 - Messvorrichtung des Voltmeters



(a)



(b)

Abbildung 3.3: Nr.24632 - (a) Holzschachtel mit Massenstücken (b) Beschreibung zu den Gewichten m_1 , m_2 und m_3 (links nach rechts)

Außerdem befindet sich im Gehäuse eine kleine Holzschachtel zur Aufbewahrung dreier Massenstücke unterschiedlicher Form und verschiedenen Gewichtes, sowie eine kurze Beschreibung (siehe Abb.3.3). Die Massenstücke sind ebenfalls aus Aluminium und dienen der Voreinstellung des Messbereiches, indem sie am unteren Ende des beweglichen Flügels an einem Haken befestigt werden. Das Aufhängen eines solchen Zusatzgewichtes beeinflusst die Nullstellung des Gerätes nicht, da die Gewichte ein stabiles Gleichgewicht bewirken. Der Schwerpunkt des Flügels liegt genau senkrecht (in Richtung der Gewichtskraft) unter der Drehachse.

An der beiliegenden Beschreibung ist ersichtlich, dass die ersten beiden Massenstücke beschriftet mit 40,8 mg und 41 mg eine direkte Skalenablesung bis zu 5000 V erlauben und eine Kombination mit dem dritten Massenstück zu einer Verdopplung der Skala auf 10000 V führt.

Das Gewicht der Massenstücke wurde mittels Feinwaage nochmals überprüft und in der folgenden Tabelle 3.1 vermerkt. Es gilt eine Messunsicherheit von $\Delta m = 0.3$ mg. Es sind kleine Abweichungen zur Beschreibung erkennbar, wobei diese größtenteils im Rahmen des Messfehlers stehen.

Massenstück	Masse [mg]
m_1	40,7
m_2	41,2
m_3	120,5

Tabelle 3.1: Nr.24632 - Massenbestimmung der Massenstücke mittels Feinwaage

3.2 Experiment

3.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

In Abbildung 3.4 ist der Versuchsaufbau des Experimentes zu sehen. Dieser dient zur Überprüfung der Messgenauigkeit des Gerätes. Mittels zwei Hochspannungskabeln wird eine Gleichspannungsquelle an das Elektrometer geschlossen. Um die Spannung direkt am Elektrometer zu messen wird zusätzlich ein PHYWE - Spannungsmessgerät parallelgeschlossen (siehe Abb.3.5).

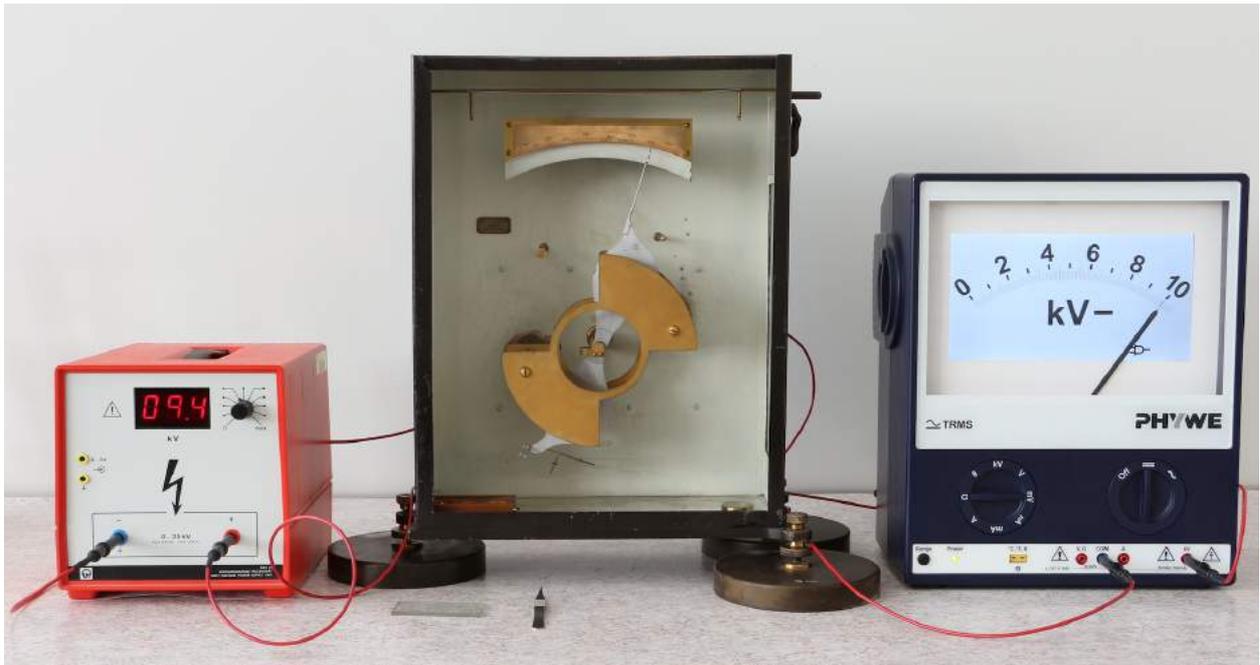


Abbildung 3.4: Nr.24632 - Versuchsaufbau

Für den ersten Messdurchgang wird zur direkten Skalenablesung nur das Massenstück m_2 an den Flügel gehängt. Außerdem wird der Aluminiumstab zur Dämpfung der Zeigerschwingung anhand des Hebels herabgelassen. Nun wird am Hochspannungsgerät die Spannung sukzessive erhöht und der Ausschlag an der Elektrometerskala und dem Messgerät abgelesen.

Für den zweiten Messdurchgang wird zur Verdopplung des Wertes der Skalenablesung zusätzlich das Massenstück m_3 an die bewegliche Elektrode gehängt, bevor der Messvorgang wiederholt wird.

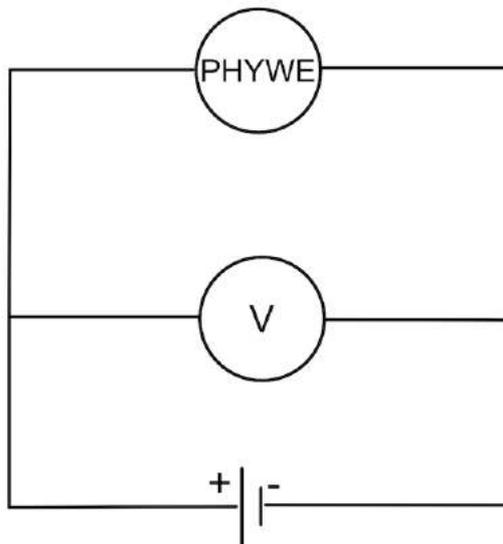


Abbildung 3.5: Nr.24632 - Schaltplan des Versuchsaufbaus

3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der beiden Durchgänge vermerkt. Das PHYWE - Spannungsmessgerät besitzt eine Messunsicherheit von $\Delta U = \pm 1,5\%$. Beim Voltmeter von Thomson ist bei der 5kV-Skala von einer Unsicherheit von 1 Skalenteil (± 100 V) auszugehen. Wird die verdoppelte Skala benutzt, beträgt die Unsicherheit ca. 2 Skalenteile (siehe Tab.3.3).

Netzgerät [kV]	PHYWE-Voltmeter [kV]	Thomson-Voltmeter [kV]
1,0	1,0	$1 \pm 0,1$
1,4	1,4	$1,4 \pm 0,1$
1,8	1,8	$1,9 \pm 0,1$
2,2	2,2	$2,3 \pm 0,1$
2,6	2,6	$2,8 \pm 0,1$
3,2	3,2	$3,4 \pm 0,1$
3,6	3,5	$3,7 \pm 0,1$
4,0	3,9	$4,1 \pm 0,1$
4,4	4,3	$4,5 \pm 0,1$
4,8	4,8	$5 \pm 0,1$

Tabelle 3.2: Voltmeter Nr.24632 - Messdurchgang mit m_2

Netzgerät [kV]	PHYWE-Voltmeter [kV]	Thomson-Voltmeter [kV]
2,0	2,0	$2,0 \pm 0,2$
2,9	3,0	$3,0 \pm 0,2$
3,8	4,0	$4,0 \pm 0,2$
4,8	5,0	$5,0 \pm 0,2$
5,8	6,0	$6,0 \pm 0,2$
6,7	7,0	$7,0 \pm 0,2$
7,6	8,0	$7,8 \pm 0,2$
8,6	9,0	$8,6 \pm 0,2$
9,4	10,0	$9,4 \pm 0,2$

Tabelle 3.3: Voltmeter Nr.24632 - Messdurchgang mit $m_2 + m_3$

An den Messergebnissen ist zu sehen, dass die Messwerte des Elektrometers von 2,0 - 7,0 kV mit dem PHYWE - Voltmeter übereinstimmen, aber am oberen Teil der Skala verstärkt vom Vergleichswert abweichen.

Außerdem ist anzumerken, dass der dämpfende Aluminiumstab nur beim größeren Messbereich notwendig war. Sobald die Kombination von m_2 und m_3 an dem Flügel angebracht wurde, steigt die Schwingung um den Messwert. Auch nach einiger Zeit nahm die Schwingung nicht zur Gänze ab, wodurch eine genaue Messung nicht möglich war. Beim kleineren Messbereich mit m_2 nahm die Schwingung ab, weshalb auch ohne zusätzlicher Dämpfung die Durchführung einer genauen Messreihe möglich war. Aufgrund der Zeitersparnis wurde bei beiden Durchgängen trotzdem die zusätzliche Dämpfung angewendet.

Abschließend ist festzustellen, dass das elektrostatische Voltmeter nach Thomson eine relativ genaue Spannungsmessung ermöglicht.

Die physikhistorische Sammlung der Fakultät für Physik beherbergt noch ein zweites elektrostatisches Voltmeter ähnlicher Bauart. Es ist im Katalog <https://phaidra.univie.ac.at/o:63123> als Objekt 010 zu finden.

Kapitel 4

Binantenelektrometer Nr.288067 - Bartels

4.1 Aufbau des Gerätes

Das Messgerät (siehe Abb.4.1) in diesem Kapitel, ist das Binantenelektrometer der Firma Bartels mit der Fabrikationsnummer 288067. Dieses Nadelelektrometer ist $(36,0 \pm 0,5)$ cm hoch und besitzt auf der Grundplatte eine Plakette mit dem Firmennamen „Georg Bartels Göttingen“. Es besteht zum größten Teil aus Messing. Indem beide Schrauben auf dem Deckel gelöst werden, lässt sich dieser mitsamt dem äußeren Messingzylinders entfernen.

Bei Abnahme des Gehäuses ist die spezielle Messvorrichtung gut erkennbar (siehe Abb.4.2 und Abb.4.3a). Die kreisförmige, aus zwei voneinander isolierten Hälften (N_1, N_2) bestehende „Aluminiumnadel“ bewegt sich in einer zweigeteilten Schale. Diese Segmente (D_1, D_2), des ebenfalls kreisförmigen Behälters, nennt man Binanten. Die Nadelhälften sind durch zwei kleine Bernsteinstege voneinander isoliert (siehe Abb.4.4b). Damit die Nadel bei gelegentlichem Pendeln nicht an die Binanten stößt, werden die Nadelflächen und Binanten als Kugelschale ausgebildet. Im Mittelpunkt dieser konzentrischen Kugelschalen befindet sich zur Isolation der beiden voneinander zu isolierenden Nadelhälften ein zylindrisches Bernsteinstück mit rechteckiger Grundplatte (siehe Abb.4.4a). Mittels Gewinde ist dieses Bernsteinstück an das Metallstäbchen geschraubt, an dem auch der Spiegel befestigt ist. Erst oberhalb der beiden Haltewinkel für die Transportsicherung schließt der feine Torsionsdraht B an (siehe Abb.4.2 und 4.3), der dann bis zum Oberteil des Turmes verläuft. Dieser Platindraht sorgt für die Zufuhr der Hilfsspannung einer Nadelhälfte. Der anderen Nadelhälfte wird im Idealfall die entgegengesetzte Hilfsspannung über einen nach unten spiralig herabhängenden Wollastonfaden C zugeführt. Ein Wollastonfaden ist ein sehr feiner Platinfaden (bis zu $5 \mu\text{m}$ Durchmesser).

In der Nullstellung bilden die Trennungslinien der Binanten und Nadelhälften einen rechten Win-



Abbildung 4.1: Binantenelektrometer Nr.288067

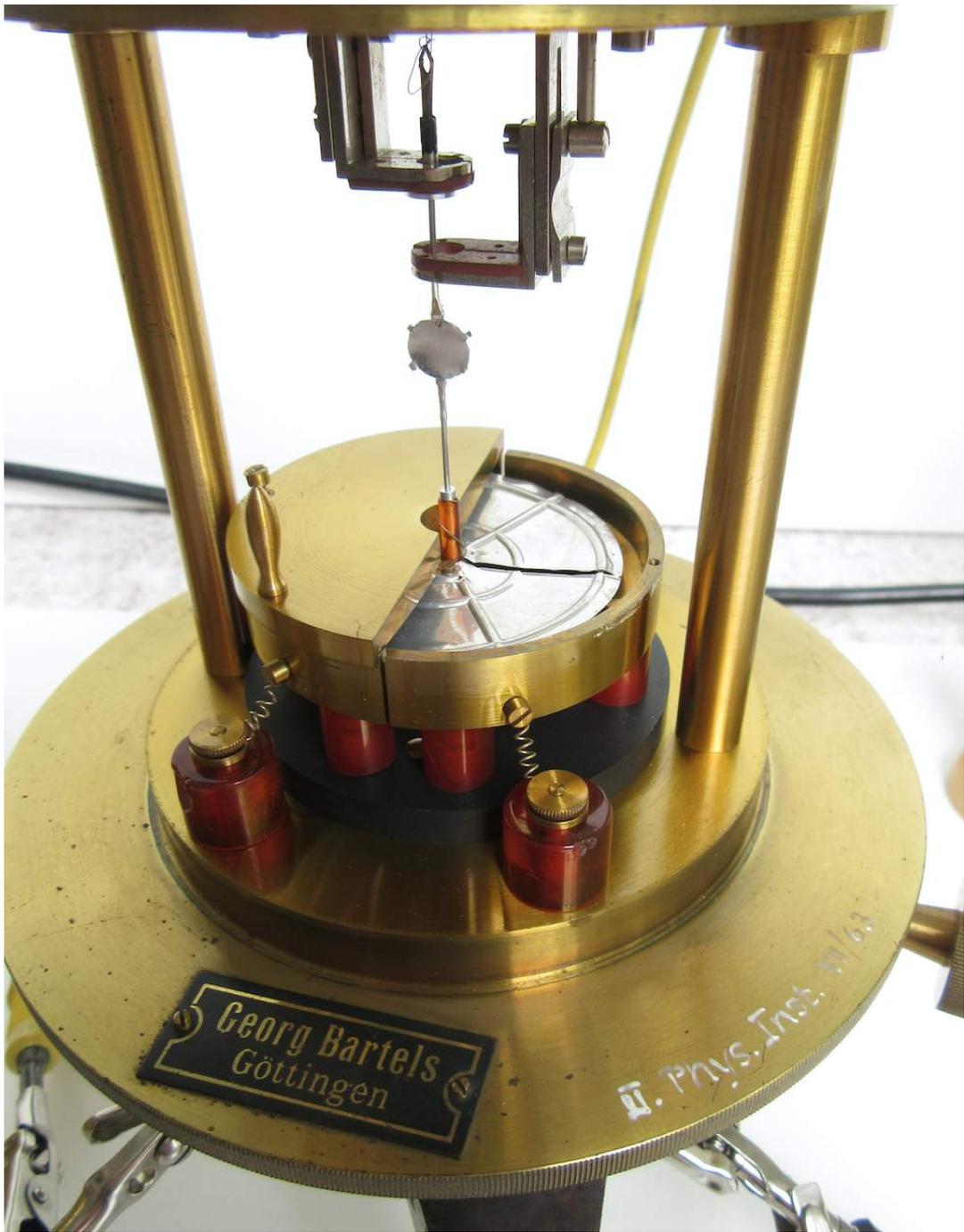


Abbildung 4.2: Binantenelektrometer Nr.288067 - Messvorrichtung

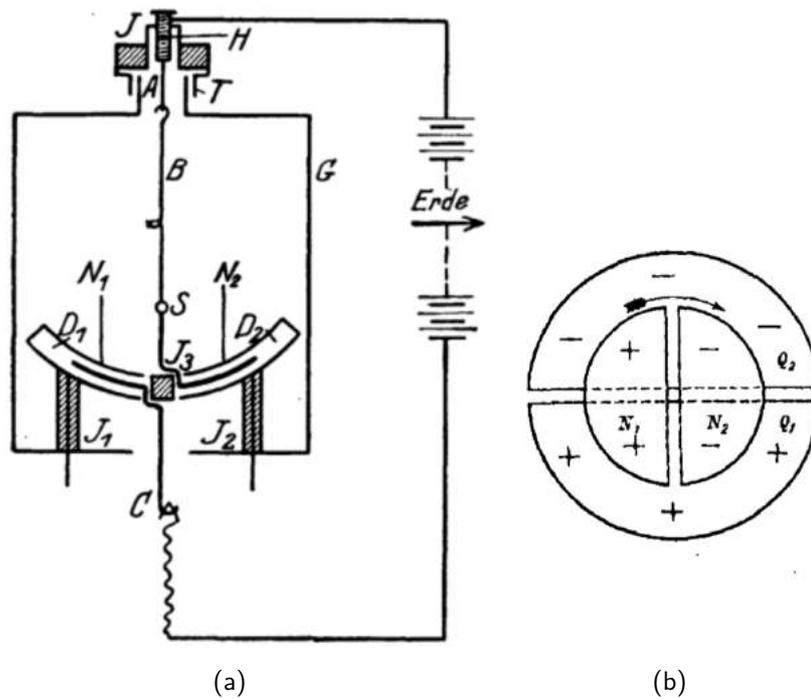
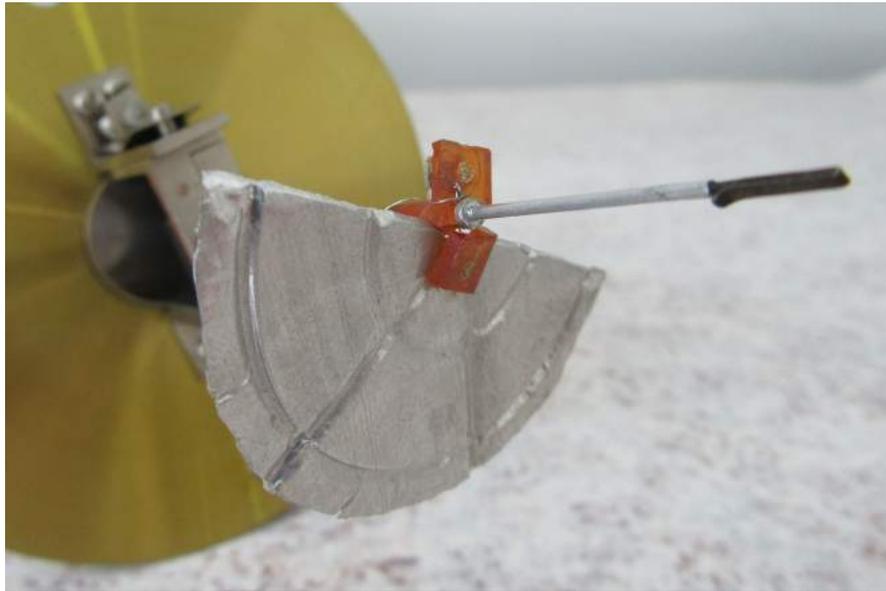


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Binantenelektrometers (a) Längsschnitt (b) Querschnitt [Alberti et al., 2013]

kel. Um den Ausschlag messen zu können, befindet sich auf dem Metallstäbchen zwischen Nadel und Aufhängefaden ein Spiegel S . [Dolezalek, 1908][Kohlrausch, 1956]

Um eine Neigung der Nadel zu verhindern, besitzt das Messgerät außerdem auch drei Fußschrauben, welche so justiert werden, dass der Aufhängefaden der Nadel senkrecht zur Binantenschachtel steht. Die Transportsicherung lässt sich mit Hilfe einer Schraube an der Deckfläche des Schutz-Zylinders lösen. Die Arretierungsvorrichtung ist ein kreisrunde Platte am zentralen Metallstäbchen oberhalb des Spiegels, welche bei der Aktivierung gegen einen Messinggriff gepresst wird. Dabei hebt sich die Nadel und kann nicht mehr frei in den Binanten schwingen. Eine Schraube am Ober- teil des Turmes erlaubt bei freiem System eine Drehung der Nadel, um die bereits besprochene Nullstellung zu erhalten.

Bei der empfindlichsten Schaltung des Binantenelektrometers werden die Nadelhälften mit ent- gegengerichteten gleichgroßen Hilfsspannungen geladen (vgl. Abb.4.3b). Die zu messende Span- nung wird mit den beiden Binanten verbunden. Wie aus Abbildung 4.3b zu erkennen ist, folgt eine gleichsinnige Drehung der beiden Nadelhälften in Pfeilrichtung. Wie bereits erwähnt, ist dieser Ausschlag folglich über den Spiegel und einer zusätzlichen Skala messbar.



(a)



(b)

Abbildung 4.4: Binantenelektrometer: (a) Bernsteinsteg zur Isolation (b) Aluminiumnadelhälften

4.2 Restaurierungsversuch, Experiment und Diskussion

Das Binantenelektrometer Nr.288067 war nicht betriebsbereit. Es fehlte sowohl der obere Torsionsdraht als auch der untere Kontaktdraht. Auch die Kreisscheibe war in schlechtem Zustand und etwas verformt. Jedenfalls gelang es, das Gerät elektrisch zu kontaktieren. Oben wurde ein Platindraht mit $120\ \mu\text{m}$, unten ein Kupferdraht mit $50\ \mu\text{m}$ verwendet. In einer einfachen Schaltung, welche in Abbildung 4.6 zu sehen ist (Binanten Plus-Minus; Kreisscheibe Plus-Minus auf ca. $200\ \text{V}$ geladen), gelang es eine geringfügige Verdrehung der Kreisscheibe zu erzeugen. Dabei dezentrierte sich die Kreisscheibe, weil der untere (nicht gespannte) Draht zu dick war ($50\ \mu\text{m}$). Im Idealfall sollte der obere Aufhängedraht $10\ \mu\text{m}$ und der untere $5\ \mu\text{m}$ haben. Allerdings hielt die filigrane Konstruktion der Kreisscheibe weiteren Optimierungsversuchen mit dünneren Kontaktdrähten nicht stand. Beim Versuch vor allem den unteren Draht zu kontaktieren brachen bereits die aufgeklebten Bernsteinstege als auch das mittlere Bernsteinstück (siehe Abb.4.4a). So wurde versucht, die übrigen drei Binantenelektrometer (siehe Abb.4.5) in die Restaurierungsversuche mit ein zu beziehen.



Abbildung 4.5: Die vier Binantenelektrometer der historischen Sammlung der Fakultät für Physik

Leider war keines der drei weiteren Binantenelektrometer funktionsfähig. Bei einer zunächst intakten Nadel (ebenfalls ohne untere Kontaktierung) brach das Gewinde des zentralen Bernsteinstücks aus. Ein weiteres Problem war, das vor allem beim ersten Gerät die Höheneinstellung der Kreisscheibe nicht optimal war, nicht mehr justiert werden konnte und die etwas verbogene Kreisscheibe

an der Unterseite zum Streifen in den Binanten neigte.



Abbildung 4.6: Binantenelektrometer - Versuchsaufbau

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die Binantenelektrometer waren um die Wende 1900 interessante und relativ genaue elektrostatische Messgeräte. Der Messbereich befindet sich bei $5 \cdot 10^{-4}$ bis $10^3 \frac{V}{mm}$ mit einer Genauigkeit von etwa $10 \frac{mm}{mV}$. [Meyer und Moerder, 1957]

Im Rahmen dieser Arbeit wäre eine Restauration zu aufwendig gewesen, da in einfacher Weise weder die dazu nötigen Materialien noch das handwerkliche Knowhow verfügbar waren.

Kapitel 5

Einfadenelektrometer nach Wulf Nr.3246 - Günther und Tegetmeyer

5.1 Aufbau des Gerätes

Das Einfadenelektrometer nach Wulf wurde nach dem deutschen Physiker Theodor Wulf benannt. Auf der Vorderseite des Messgerätes befindet sich eine Einprägung des Firmennamens „Günther & Tegetmeyer, Braunschweig“. Die Inventarnummer VII/106 ist unter der Gravur zu sehen. Das Elektrometer mit der Fabrikationsnummer 3246 sitzt über einer Drehachse auf drei verstellbaren Fußschrauben und ist insgesamt $(27 \pm 0,5)$ cm hoch (siehe Abb.5.1).

Das Innere des Gehäuses ist zugänglich, indem die Rückwand abmontiert wird. Diese ist lediglich mittels einiger Schrauben am Messgerät befestigt (siehe Abb.5.2).

Eine schematische Darstellung der Messvorrichtung zeigt die Abbildung 5.3. Im Gehäuse ist ein vertikaler Wollastofaden F zwischen zwei parallelen Schneiden S_1 und S_2 aufgespannt. Er ist oben an der isolierten Spannungszuführung und unten an einer Quarzschlinge Q befestigt. Dadurch bleibt der Faden elastisch gespannt. Die Schneiden sind durch Bernstein isoliert. Die Fadenspannung lässt sich, anders als bei der schematischen Darstellung, durch Anheben und Absenken der oberen Elektrode regulieren. Der Schneidenabstand ist über zwei Mikrometerschrauben T_1 und T_2 regulierbar. Um das Durchbrennen des Fadens bei Berührung zu verhindern, sind beide Schneiden mit einem hohen Widerstand R versehen.[Kohlrausch, 1956]

Bei der empfindlichsten Schaltung des Gerätes werden an die Schneiden, ähnlich wie beim Biantenelektrometer, entgegengerichtete gleichgroße Hilfsspannungen angelegt. Dies kann über die Zuleitungen bei den Widerständen R erfolgen. Der Faden stellt sich dann entsprechend seines Potentials in dem elektrischen Feld zwischen den parallelen Schneiden ein. Die untere Spannungszufuhr erfolgt über den Anschluss C . Durch den regulierbaren Schneidenabstand und die



Abbildung 5.1: Einfadenelektrometer Nr.3246

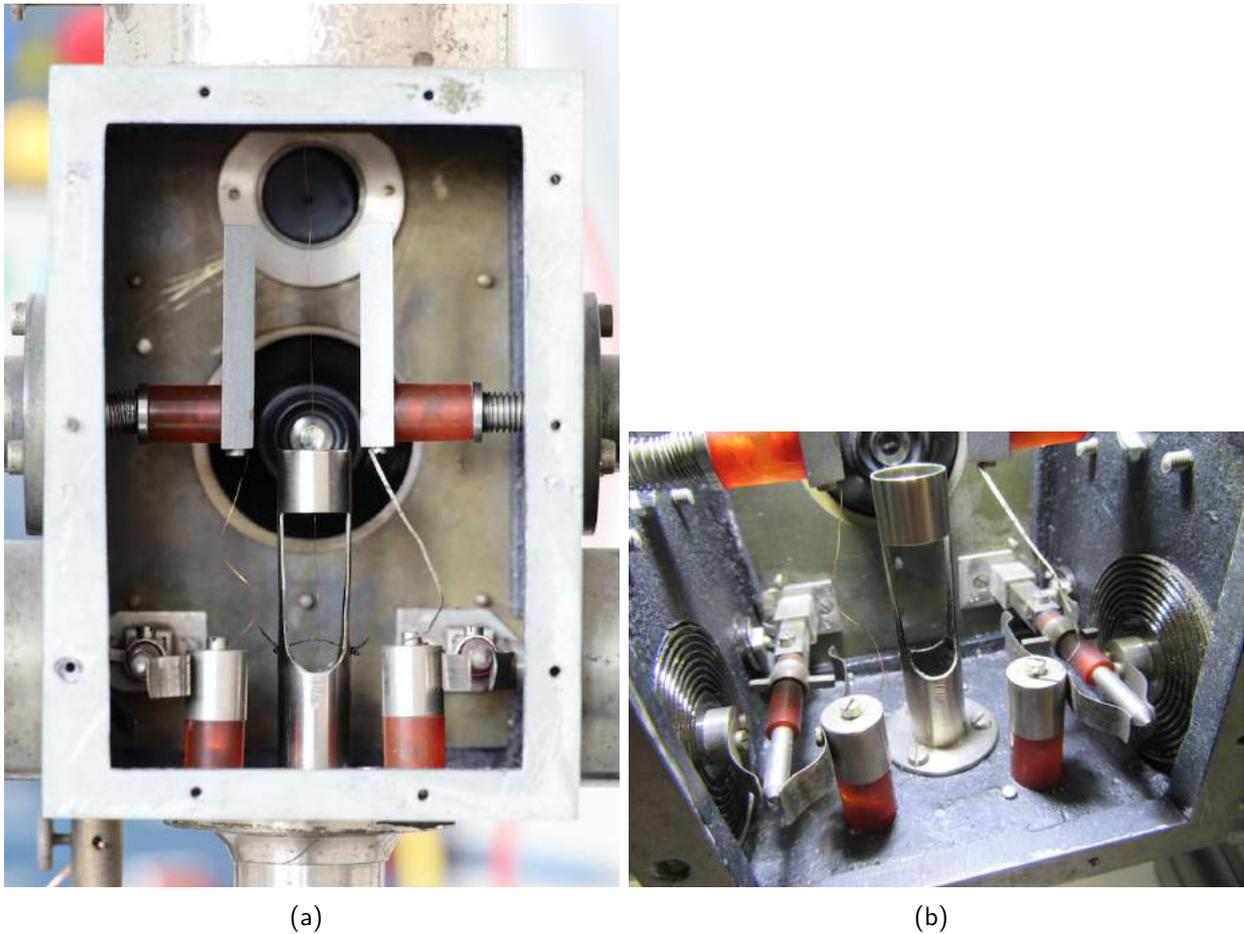


Abbildung 5.2: Einfadenelektrometer Nr.3246 - Innen

veränderliche Fadenspannung lassen sich nach Kohlrausch (1956) Spannungsempfindlichkeiten von 0,3 bis 1000 Skt/V einstellen.

Die Ablesung der Fadeneinstellung erfolgt über ein Mikroskop, welches an der Vorderseite des Elektrometers befestigt ist (siehe Abb.5.1). Die Skala ist bereits im Okular integriert, wobei sich der Nullpunkt in der Mitte des Sichtfeldes befindet. Mittels Innenfokussierung lässt sich das Mikroskop scharf stellen. Durch das Lösen einer Schraube am Mikroskopschlitten, lässt sich dieser auch seitlich verschieben. Dies ermöglicht es den Faden auf den Skalennullpunkt einzustellen. Um die erforderliche Beleuchtung zu erhalten, befindet sich auf der Rückseite des Gehäuses ein verstellbarer Spiegel, welcher das Licht durch eine kleine Öffnung in der Rückwand wirft.

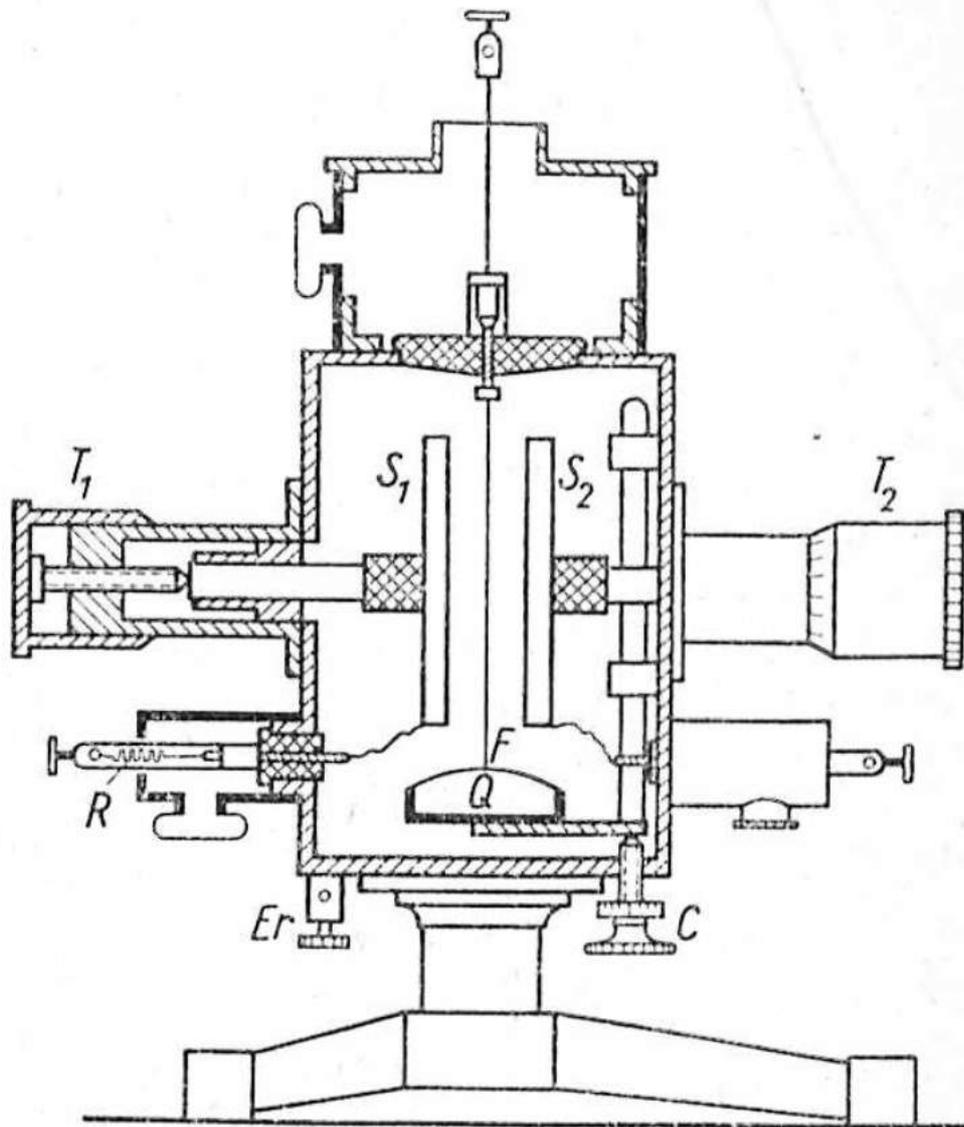


Abbildung 5.3: Einfadenelektrometer nach Wulf - Schematische Darstellung [Kohlrausch, 1956]

5.2 Restaurierungsversuch, Experiment und Diskussion

Das Einfadenelektrometer nach Wulf Nr.3246 war wie das Binantenelektrometer nicht betriebsbereit. Es fehlte der Wollastonfaden. Zusätzlich war die Quarzschlinge defekt. Diese konnte durch einen Kunststofffaden sehr einfach ersetzt werden, da in der Fassung der Quarzschlinge (vgl. Abb.5.2a) zwei kleine Öffnungen vorhanden waren, wodurch der neue Faden eingefädelt werden konnte. Zwei Knoten an den Außenseiten befestigten diesen genügend. Ein Kupferdraht mit $50\mu\text{m}$ wurde als Ersatz für den Wollastonfaden montiert.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Der Messbereich des Saitenelektrometers bewegt sich zwischen 10^{-3} bis $2 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{Skt}}$ [Meyer und Moerder, 1957]. An den Schneiden wurde eine Hilfsspannung bis zu 300 V angelegt. Eine Aufladung des Drahtes im kV-Bereich (bis zu 5 kV) führte zu keinerlei Reaktion. Eine Durchgangsmessung zeigte, dass die Verbindung zwischen den Schneiden und ihren dazugehörigen Widerständen unterbrochen war. Trotz Überbrückung der Widerstände gab es keine Reaktion.

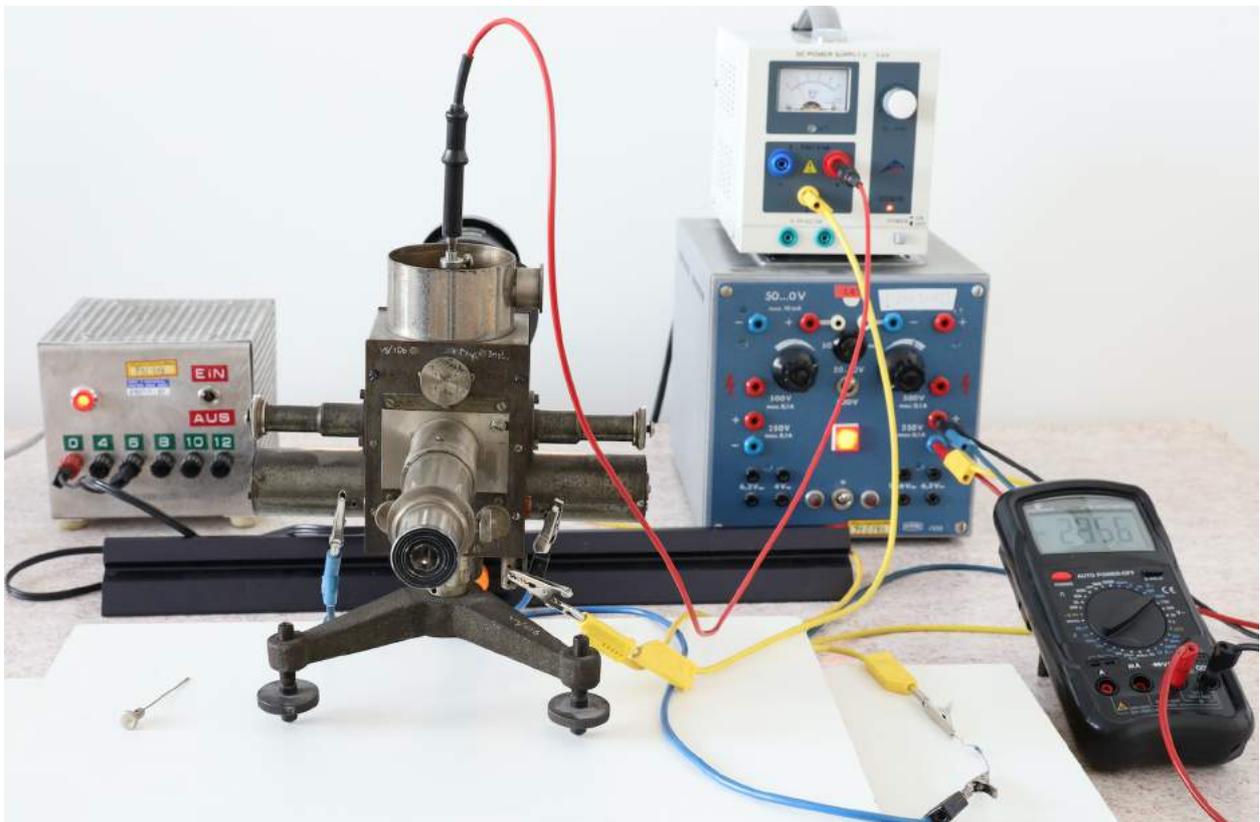


Abbildung 5.4: Einfadenelektrometer nach Wulf - Versuchsaufbau

Das Messgerät hat möglicherweise Kontakt- bzw. Isolationsprobleme. Eine aufwendigere Restauration würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Ähnlich wie bei dem Binantenelektrometer (vgl. Kapitel 4) fehlten die notwendigen Materialien und das notwendige handwerkliche Knowhow.

Kapitel 6

Torsions-Elektrodynamometer Nr.1638 - Siemens und Halske

6.1 Aufbau des Gerätes

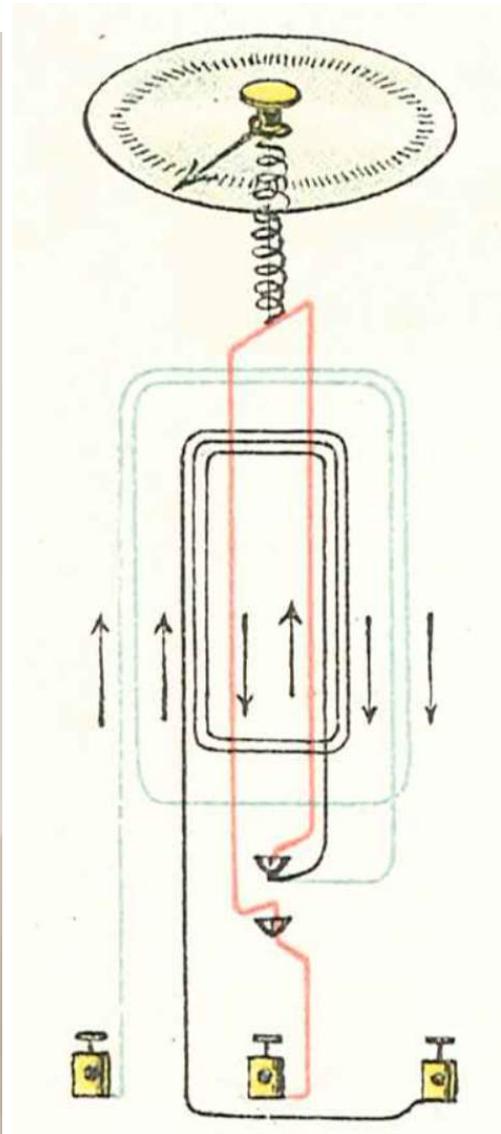
Dieses Kapitel befasst sich mit dem Elektrodynamometer der Firma Siemens und Halske mit der Fabrikationsnummer 1638. Das Messinstrument mit der Inventarnummer VII/147 ist in Abbildung 6.1a zu sehen. Der Messapparat sitzt auf einem Holzsockel und ist $(34 \pm 0,5)$ cm hoch. Der Holzsockel ist $(21 \pm 0,5)$ cm lang und $(18 \pm 0,5)$ cm breit. Auf der Vorderseite des Holzsockels ist die Inventarnummer vermerkt. Das Gerät besteht aus zwei inneren festen Spulen und einer äußeren beweglichen Rechteckschleife. Die größere innere Spule aus dickem Draht besitzt nur vier Windungen für Messungen von 15 - 50 A. Die kleine innere Spule hat ca. 10 Windungen pro Lage und 5 Lagen und besteht aus einem dünneren Draht für Messungen von 5 - 15 A.

Die beiden ovalen Spulen werden für die Berechnung des Magnetfeldes bzw. des magnetischen Momentes in Kapitel 6.2 durch eine mittlere rechteckige Kreisschleife angenähert. Die verwendeten Näherungsmaße sind in Tabelle 6.1 gelistet. Die Rechteckschleife ist an einem Faden und einer Torsionsfeder aufgehängt und trägt auch den Zeiger, welcher auf der oberen weißen Kreisscheibe die Torsion anzeigt (siehe Abb.6.2). Das Gerät arbeitet in Kompensation: das auf die Rechteckschleife wirkende Drehmoment wird durch das Gegendrehmoment der tordierten Spiralfeder kompensiert. Der Torsionswert der Feder, der an der oberen Skala abzulesen ist, entspricht dem Messwert für den fließenden Strom (siehe Abb.6.4 bzw. Gleichung (6.1) und (6.2)).

Frontal betrachtet ist rechtsseitig der Spulen ein Pendel angebracht (siehe Abb.6.1a). Mit den drei Stellschrauben an den Füßen, lässt sich das Gerät somit in Waage bringen. Unter den inneren Spulen ist eine Plakette mit dem Firmennamen „Siemens & Halske“ und der Fabrikationsnummer Nr.1638 angebracht (siehe Abb.6.3). Mittels einer Schraube am oberen Teil des Messgerätes kann sowohl der Aufhängefaden der beweglichen Spule gespannt, als auch dessen Höhe verän-



(a)



(b)

Abbildung 6.1: (a) Elektrodynamometer von Siemens und Halske, (b) Schaltskizze des Elektrodynamometers [Weiler, 1905, S.194]



Abbildung 6.2: Kreisskala des Elektrodynamometers

dert werden. Eine weiterer Torsionskopf sorgt für die Justierung desselben und des angebrachten Zeigers an den Nullpunkt. Die Transportsicherung befindet sich auf der Rückseite des Holzsockels.

Das Messgerät besitzt drei Anschlüsse (siehe Abb.6.1). Frontal betrachtet bringt der linke Anschluss die dicke Innenspule in den Schaltkreis und der rechte die dünne Innenspule. Die bewegliche Spule wird mit der mittleren Klemme über zwei Quecksilberkontakte mit dem Stromkreis verbunden. Die mit Quecksilber zu füllenden Sacklöcher haben mehrere Funktionen: außer der elektrischen Kontaktierung sichern sie neben dem Aufhängefaden (der nicht mehr intakt ist) die leichte Drehbarkeit und Ausrichtung der näherungsweise rechteckigen Kupferschleife.

Dem Dynamometer beiliegend gibt es eine Beschreibung der Konstanten (siehe Abb.6.4) aus dem Jahre 1883. Der Kalibrierschein war ursprünglich mit vier kleinen Schrauben auf der Rückseite des Gerätes befestigt. Zur besseren Konservierung wurde er abgenommen. Es ist ersichtlich, dass die Ablesung an der Skala mit einer einfachen Umrechnung in die Einheit Ampere überführt werden kann:

$$I = 0,8\sqrt{A} \quad (6.1)$$

bei Benutzung der dünnen inneren Spule mit einem Messbereich von 5 - 15 A. Oder

$$I = 2,6\sqrt{a} \quad (6.2)$$



Abbildung 6.3: Plakette des Elektrodynamometers

bei Benutzung der dicken inneren Spule mit einem Messbereich von 15 - 50 A. Wobei A und a die Ablesung an der Skala im entsprechenden Messbereich darstellen.

6.2 Berechnung des Drehmoments

Im Folgenden wird das Torsionsdynamometer nur theoretisch behandelt, um die Sinnhaftigkeit der Konstruktion zu zeigen. Für eine Inbetriebnahme fehlt einerseits der Aufhängefaden der Kupferschleife (Fasern des Originalfadens sind noch in der Mitte der Abb.6.2 zu sehen), andererseits soll der Umgang mit Quecksilber vermieden werden. Die beiden Quecksilberreservoirs wären zwar leicht zu füllen, sind aber umständlich zu entleeren.

Mit einer Abwandlung des Biot-Savart-Gesetzes können das Magnetfeld und Drehmoment näherungsweise bestimmt werden. Zur Berechnung werden die Maße und die Windungszahl der Spulen benötigt. Wenn die bewegliche Spule näherungsweise als rechteckige Leiterschleife betrachtet wird (siehe Abb.6.5), kann das Magnetfeld B wie folgt bestimmt werden:

$$B = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \sqrt{l^2 + b^2}}{\pi \cdot l \cdot b} \quad (6.3)$$

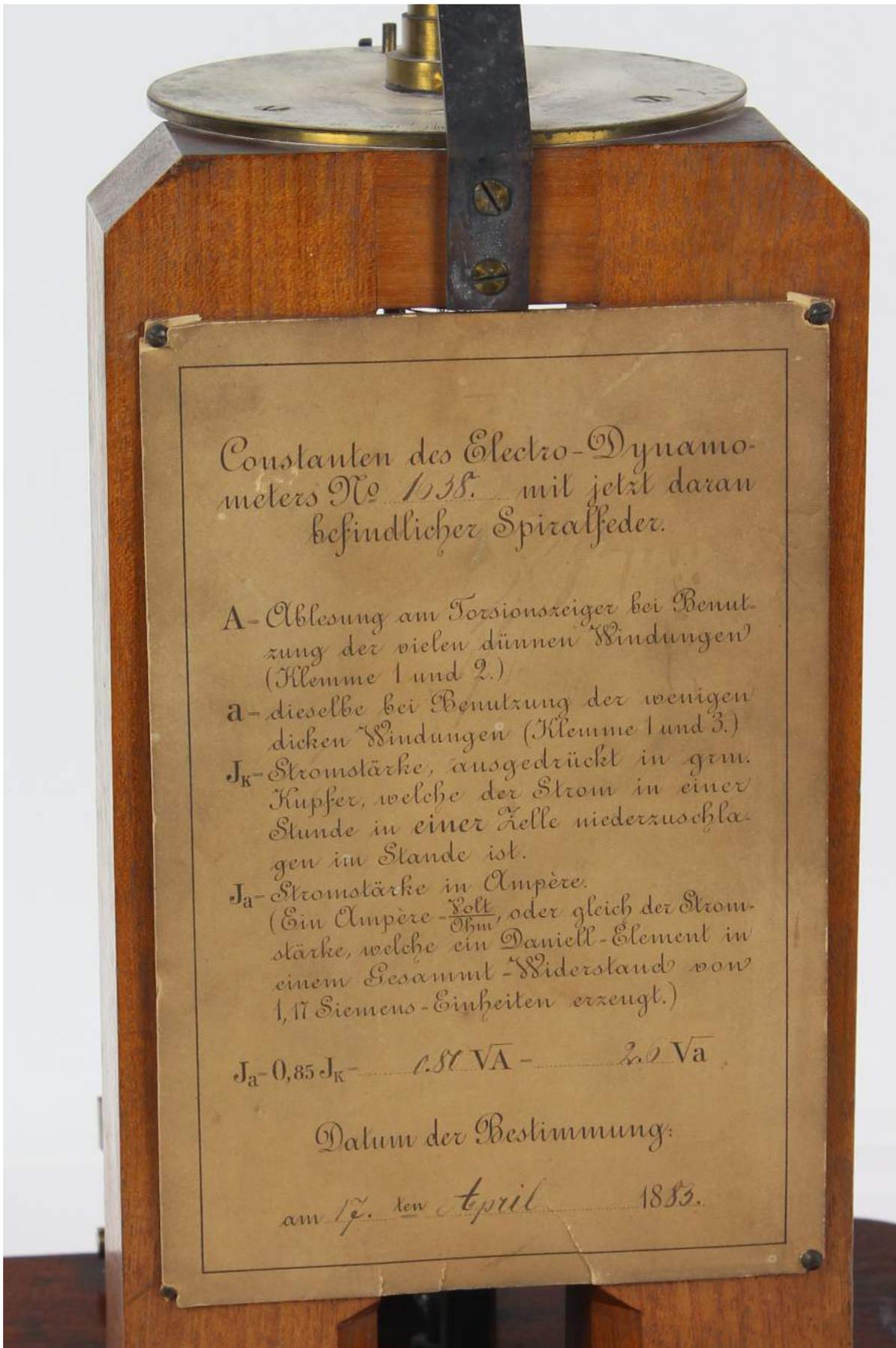


Abbildung 6.4: Konstantenbeschreibung mit dem Kalibrierdatum 17.April.1883.

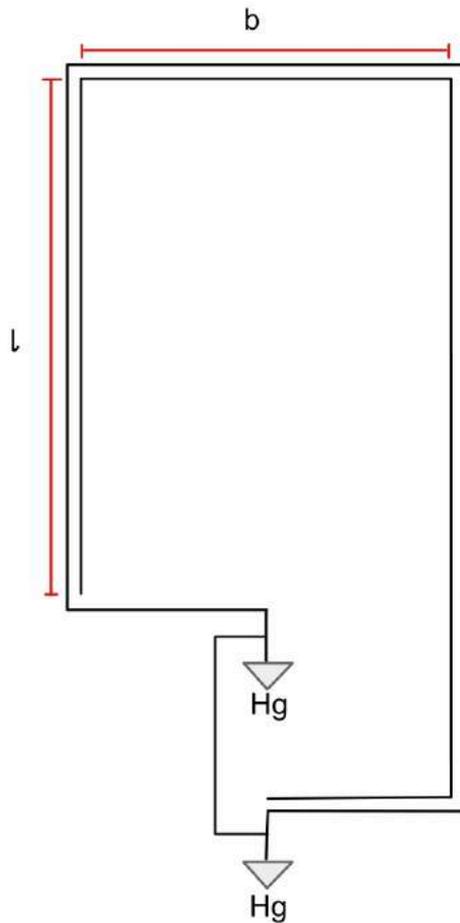


Abbildung 6.5: Skizze der beweglichen Rechteckschleife mit Abmessungen b und l

mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$ [Halliday et al., 2017]. Das Drehmoment M , welches von der Torsionsfeder zu kompensieren ist, kann dann infolgedessen mit

$$M = \mu \cdot B \quad (6.4)$$

berechnet werden [Bergmann et al., 2015], wobei für das magnetische Moment μ gilt

$$\mu = N \cdot I \cdot A \quad (6.5)$$

und A die mittlere rechteckig angenäherte Windungsfläche der betrachteten inneren Spule bezeichnet. Eine Abschätzung des magnetischen Moments der inneren Spule mit einer mittleren kreisförmigen Leiterschleife würde für μ um 13% niedrigere Werte ergeben. Formel (6.5) sagt das Gleiche aus wie Gleichung (2.3), wobei (2.3) auf die „Galvanometerkonstante“ abzielt.

6.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Maße, Windungszahlen sowie der blanke und isolierte Drahtdurchmesser d bzw. d_i der Spulen sind in Tabelle 6.1 zu sehen. Es gilt eine Messunsicherheit von $\pm 0,5$ mm bei den unterschiedlichen Längenmessungen bzw. von $\pm 0,1$ mm für die Messungen der Durchmesser.

Spule	Länge l [m]	Breite b [m]	Windungszahl N	d (blank) [mm]	d_i (isoliert)
1	0,1055	0,0455	1	4,5	-
2	0,072	0,039	50	2,7	3,4
3	0,085	0,063	4	4,4	5,6

Tabelle 6.1: Nr.1638 - Maße und Windungszahl der Spulen. Die Werte l und b für die Spulen 2 und 3 sind nur mittlere Schätzwerte.

6.3.1 Anschluss 2 - Messbereich 5 - 15 A

Berechnung mit $I = 10$ A:

Für das Magnetfeld bei einer Stromstärke von 10 A ergibt sich mit (6.3):

$$B = \frac{2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \cdot 10 \text{ A} \cdot \sqrt{(0,1055 \text{ m})^2 + (0,0455 \text{ m})^2}}{\pi \cdot 0,1055 \text{ m} \cdot 0,0455 \text{ m}} = 0,0001915 \text{ T} = 0,1915 \text{ mT}$$

und

$$\mu = 50 \cdot 10 \text{ A} \cdot 0,072 \text{ m} \cdot 0,039 \text{ m} \approx 1,4 \text{ Am}^2$$

Folglich für das Drehmoment

$$M = 1,4 \text{ Am}^2 \cdot 0,1915 \cdot 10^{-3} \text{ T} \approx 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Nm} = 0,027 \text{ Ncm}$$

Das entspricht bei einem Radius von $r = 1$ cm einer angreifenden Kraft von $F = 27$ mN, die einer Gewichtskraft auf 2,7 g äquivalent ist (siehe Abb.6.6).

6.3.2 Anschluss 3 - Messbereich 15 - 50 A

Berechnung mit $I = 50$ A:

Für das Magnetfeld bei einer Stromstärke von 50 A ergibt sich mit (6.3):

$$B = \frac{2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \cdot 50 \text{ A} \cdot \sqrt{(0,1055 \text{ m})^2 + (0,0455 \text{ m})^2}}{\pi \cdot 0,1055 \text{ m} \cdot 0,0455 \text{ m}} = 0,0009577 \text{ T} = 0,9577 \text{ mT}$$

und

$$\mu = 4 \cdot 50 \text{ A} \cdot 0,085 \text{ m} \cdot 0,063 \text{ m} \approx 1,071 \text{ Am}^2$$

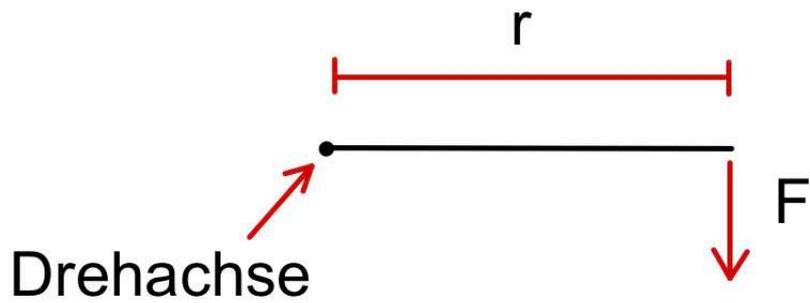


Abbildung 6.6: Veranschaulichung des Drehmomentes

Folglich für das Drehmoment

$$M = 1,071 \text{ Am}^2 \cdot 0,9577 \cdot 10^{-3} \text{ T} \approx 1,026 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \approx 0,1 \text{ Ncm}$$

Das entspricht bei einem Radius von 1 cm einer angreifenden Kraft von 0,1 N, die einer Gewichtskraft auf 10 g äquivalent ist (siehe Abb.6.6).

Damit erweist sich das Torsions-Elektrodynamometer als eine durchaus brauchbare Konstruktion für die damalige Zeit, wo der Umgang mit Quecksilber gang und gäbe war.

Kapitel 7

Experimente mit Spiegelgalvanometern

Da in den kommenden Versuchen immer wieder der gleiche Versuchsaufbau verwendet wird, wird dieser vorweg im Folgenden Kapitel beschrieben. Kleinere Unterschiede werden in den Kapiteln der jeweiligen Spiegelgalvanometer ergänzt.

7.1 Versuchsaufbau

Der Schaltplan des Experimentes ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Es wurde wie in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 beschrieben ein Spannungsteiler und Kreuzschalter angewendet.

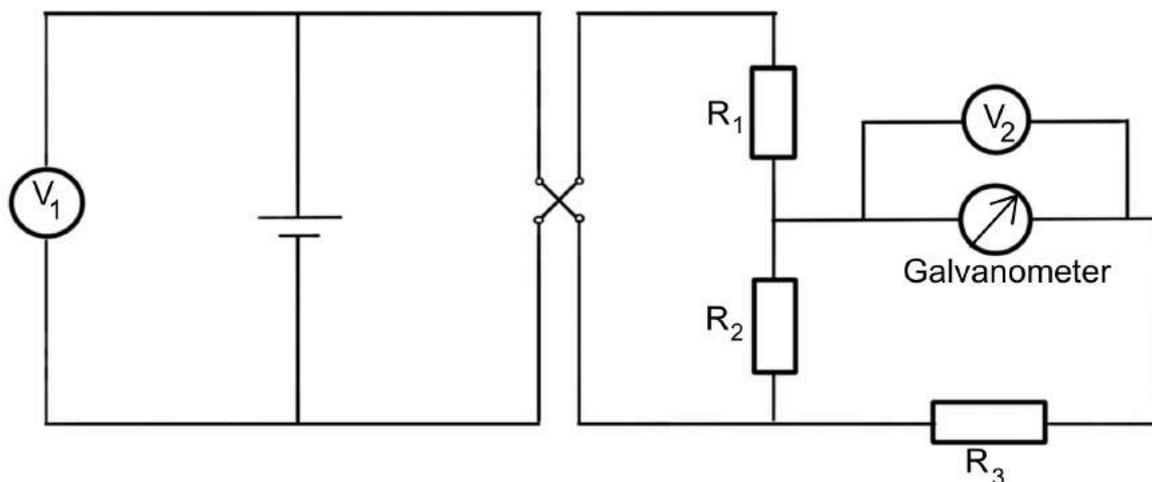


Abbildung 7.1: Schaltskizze - Versuchsaufbau für Spiegelgalvanometer

Als Stromquelle wird ein Gleichstromnetzgerät (RS PRO IPS303DD) im Konstantstrombetrieb genutzt. Es besitzt einen Voltauangang von 0 - 30 V. Die Ausgangsspannung wird zusätzlich über ein UT56 Multimeter V_1 der Firma Pierron gemessen. Für den Spannungsteiler werden die



Abbildung 7.2: a) Präzisionswiderstand, b) Plakette

Normalwiderstände $R_1 = 1000 \Omega$ und $R_2 = 0,1 \Omega$ angeschlossen. Dadurch ergibt sich bei dem Galvanometer mit Formel (2.17) eine Spannungsumsetzung von

$$U_2 = U \cdot \frac{0,1}{1000 + 0,1} = U \cdot 0,0001 \quad (7.1)$$

V_2 dient zur Eichung und ist ein Keithley 2181 Nanovoltmeter, welches das Potenzial direkt am Drehspulgalvanometer abgreift. Der Galvanometerwiderstand wird in den folgenden Experimenten mit R_G bezeichnet und im Vorfeld über eine Durchgangsmessung mit einem Digitalmultimeter Escort-97 bestimmt, das im Ω - bzw. $k\Omega$ -Bereich eine ausreichend kleine Messspannung liefert. Die Messunsicherheit beträgt bei dem verwendeten Multimeter $\Delta R = \pm(0,2 \% + 3 \text{ digits})$. Der variable Widerstand R_3 wird so gewählt, dass der in Kapitel 2.2.2 erwähnte aperiodische Grenzzustand eintritt mit

$$R_a = R_3 + R_2$$

Hierfür wird in einigen Experimenten ein Manganin Präzisionswiderstand (siehe Abb.7.2) der Firma Siemens und Halske mit einer nominellen Einstellgenauigkeit von $0,1 \Omega$ genutzt.

Der Galvanometerspiegel reflektiert den Strahl eines gegenüber liegenden Lasers, auf eine in $(100,0 \pm 0,5) \text{ cm}$ Entfernung liegenden Skala (siehe Abb.7.3). Als Skala wird Millimeterpapier verwendet, auf dem mittig ein Nullpunkt markiert wird. Zur Vereinfachung des Ablesevorgangs ist vom Nullpunkt nach links und rechts gehend jeder weitere Zentimeter bis 10 cm deutlich markiert worden.

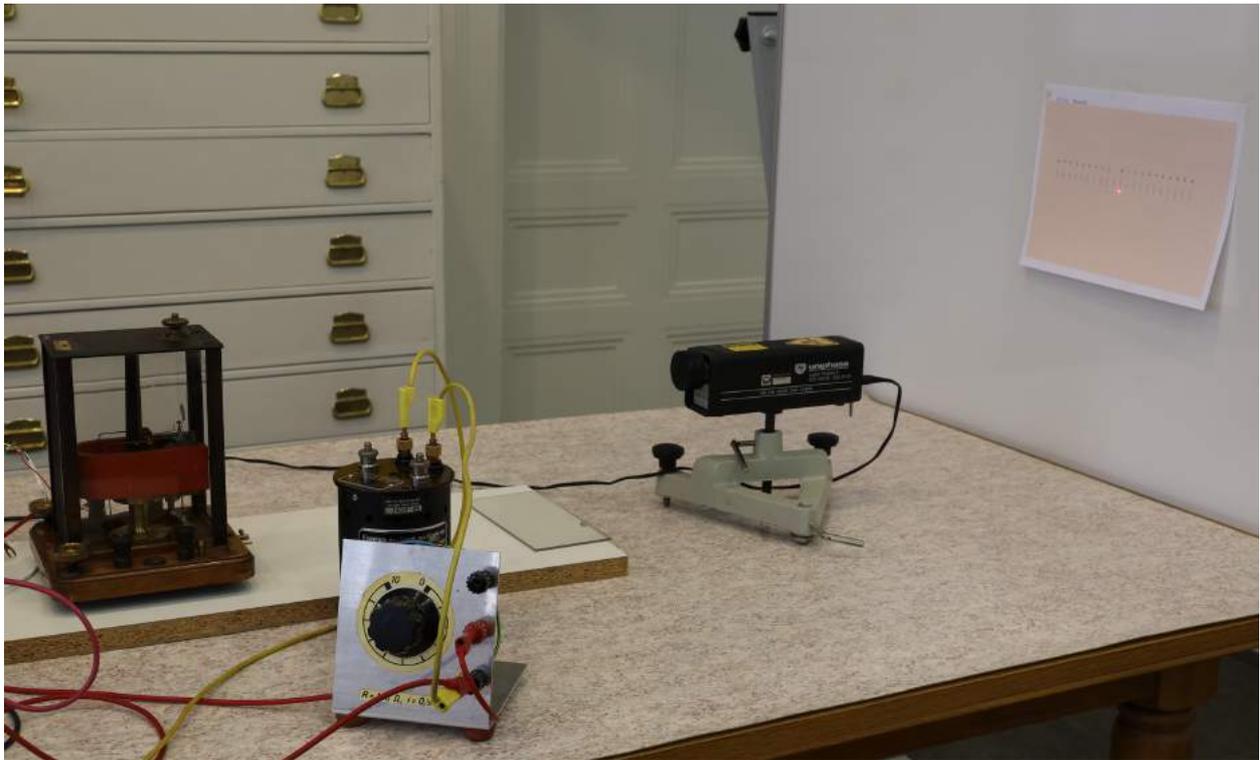


Abbildung 7.3: Skalenvorrichtung des Spiegelgalvanometers

7.2 Durchführung

Nachdem die Arretierung am Galvanometer gelöst wird, wird gewartet, bis die Schwingung des Spiegels aufhört. Sobald dies geschehen ist, muss der reflektierte Punktstrahl auf der Skala auf den Nullpunkt justiert werden. Dies ist durch die Torsionsschraube an der Oberseite des Galvanometergehäuses möglich.

Der Strom wird über den Stromwender und Spannungsteiler mittels Netzgerät dem Schaltkreis (siehe Abb.7.1) zugeführt. Sobald durch die Spule Strom fließt, erfährt sie ein Drehmoment, welches den Aufhängefaden tordiert und damit den darauf befestigten Spiegel verdreht. Die Drehrichtung ist abhängig von der Stromrichtung. Diese Rotation ist als Ausschlag auf der Skala des Millimeterpapiers ersichtlich. Sobald die Bewegung des Punktstrahls stagniert, kann die Auslenkung gemessen werden. Bei der Messung der Auslenkung wird von einer Unsicherheit von $\Delta a = \pm 0,1$ cm ausgegangen. Dann wird mittels Polwender die Stromrichtung verändert. Dadurch dreht sich der Spiegel in die entgegengesetzte Richtung und der Laserpunkt gleitet auf die andere Seite der Skala. Aus beiden Werten wird zuletzt der Mittelwert bestimmt. Somit können Thermospannungen (siehe Kapitel 2.3.2) eliminiert werden.

Nach jeder Messung wird die Spannung sukzessive erhöht, am Nanovoltmeter abgelesen und der Messvorgang wiederholt. Dies wird so oft repetiert bis der Punktlaser bei der Skala einen Wert von maximal 10 cm erreicht. Der Drehwinkel ϕ wird mittels Formel (2.5) berechnet.

Anzumerken ist, dass am Nanovoltmeter die Digitalanzeige nur bis zur $1\mu\text{V}$ -Stelle eingeschaltet wurde, da sich für die ausgewählten Spiegelgalvanometer eine höhere Auflösung nicht als sinnvoll erwies.

Kapitel 8

Spiegelgalvanometer Nr.187 - Hartmann und Braun

8.1 Aufbau des Gerätes

In der folgenden Abbildung 8.1 ist ein Spiegelgalvanometer der Firma Hartmann und Braun mit der Fabrikationsnummer 187 zu sehen. Die Inventarnummer ist VII/672. Der Messapparat steht auf einem Holzsockel in einem Gehäuse mit drei Glasfronten und kann aus diesem Grund von drei Richtungen betrachtet werden. Dies diente womöglich Demonstrationszwecken. Die komplette Vorrichtung hat eine Höhe von $(23 \pm 0,5)$ cm und besitzt eine quadratische Grundfläche mit der Seitenlänge $(16,5 \pm 0,5)$ cm. Der Holzsockel wird von drei Standfüßen aus Messing getragen, wobei nur die hinteren mit Stellschrauben versehen und justierbar sind. An der Vorderseite befindet sich außerdem ein Hebel zur Transportsicherung.

Die Messvorrichtung (siehe Abb.8.2) besteht, wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt, aus einem Faden an dem ein Spiegel und eine Spule, welche einen festen Eisenkern umgibt, befestigt sind. Der Spiegel dient der Reflexion eines einfallenden Lichtstrahls und letztendlich der Skalenablesung. In der Verlängerung des Fadens ist eine Justierungsschraube am oberen Teil des Gehäuses angebracht, mit welcher der Faden auf eine Nullpunktlage gebracht werden kann. Am unteren Ende befindet sich ein flügelartiges Aluminiumstück, welches zur Straffung und Ausrichtung von Faden und Spule dient. Bei Arretierung rastet dieses Stück ein und entspannt den Faden. Die Spule wird von einem feststehenden Hufeisenmagneten umgeben.

Auf dem Holzsockel befinden sich an beiden Seiten des Gehäuses noch Anschlüsse mit unterschiedlich anwendbaren Eingangswiderständen. Frontal betrachtet ist der Anschluss der rechten Seite mit einem Eigenwiderstand von 100Ω beschriftet und der auf der linken Seite mit 6Ω .



Abbildung 8.1: Spiegelgalvanometer im Glasgehäuse - Nr.187

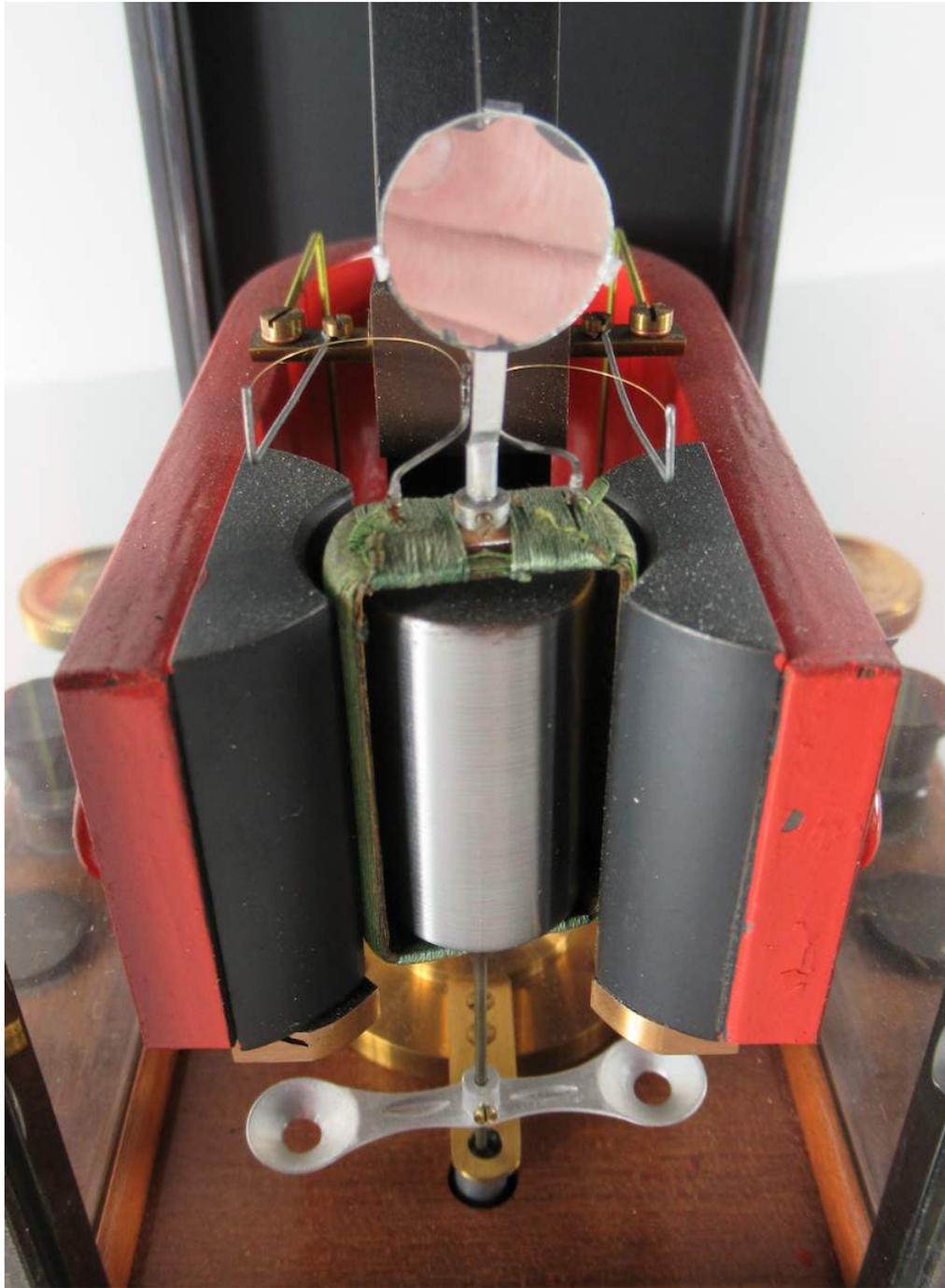


Abbildung 8.2: Spiegelgalvanometer Nr.187 - Messvorrichtung

8.2 Experiment

8.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Es wird der Schaltplan aus Abbildung 7.1 verwendet.

In folgender Abbildung 8.3 ist der Versuchsaufbau mit dem Spiegelgalvanometer Nr.187 nochmals dargestellt. Es werden die Eingangsklemmen mit dem Galvanometerwiderstand $R_G = (100$



Abbildung 8.3: Spiegelgalvanometer Nr.187 - Versuchsaufbau

$\pm 0,2) \Omega$ verwendet. Der Widerstand wird im Vorfeld mittels Durchgangsmessung des Escort-97 bestätigt. Für den variablen Widerstand wird für den aperiodischen Grenzfall $R_3 = (99,9 \pm 2,0) \Omega$ gewählt.

8.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die folgende Tabelle beinhaltet die Messergebnisse des Versuches, wobei die Stromstärke I mit dem Ohm'schen Gesetz unter Verwendung von $R_G = (100 \pm 0,2) \Omega$ berechnet wurde. Die Messunsicherheit des Nanovoltmeters beträgt im gewählten Messbereich $\Delta U = \pm 0,0001$ mV.

U (Nanovoltmeter) [mV]	I (berechnet) [μA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [$^\circ$]
0,0263	$0,263 \pm 0,001$	1,75	0,501
0,0448	$0,448 \pm 0,001$	2,85	0,816
0,0506	$0,506 \pm 0,001$	3,45	0,988
0,0613	$0,613 \pm 0,002$	3,9	1,117
0,0719	$0,719 \pm 0,002$	4,75	1,36
0,0805	$0,805 \pm 0,002$	5,25	1,503
0,0884	$0,884 \pm 0,002$	5,7	1,631
0,0939	$0,939 \pm 0,002$	6,1	1,745
0,1034	$1,039 \pm 0,002$	6,65	1,902
0,1148	$1,148 \pm 0,003$	7,43	2,125
0,1222	$1,223 \pm 0,003$	7,95	2,273
0,1311	$1,311 \pm 0,003$	8,55	2,443
0,1402	$1,402 \pm 0,003$	9,2	2,628

Tabelle 8.1: Spiegelgalvanometer Nr.187 - Messergebnisse

Für den Drehwinkel ϕ ergibt sich eine Messunsicherheit von $\Delta\phi = \pm 0,005^\circ$. Mit den Messergebnissen wurde ein Plot erstellt (siehe Abb.8.4). Der Korrelationskoeffizient der Regressionsanalyse ist mit 0,999 sehr hoch. Es besteht also ein sehr deutlich linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke I und dem Ausschlag a . Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt $k = 6,45 \frac{cm}{\mu A}$.

Nach Kapitel 2.2.4 ergibt sich für die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers Nr.187 (Skalenabstand $r = 1$ m) der Wert $S_I = 64,5 \frac{mm}{\mu A}$ und folglich die Stromkonstante $C_I = 0,0155 \frac{\mu A}{mm}$. Nach Gleichung 2.15 für die Spannungskonstante $C_U = 3,1 \frac{\mu V}{mm}$.

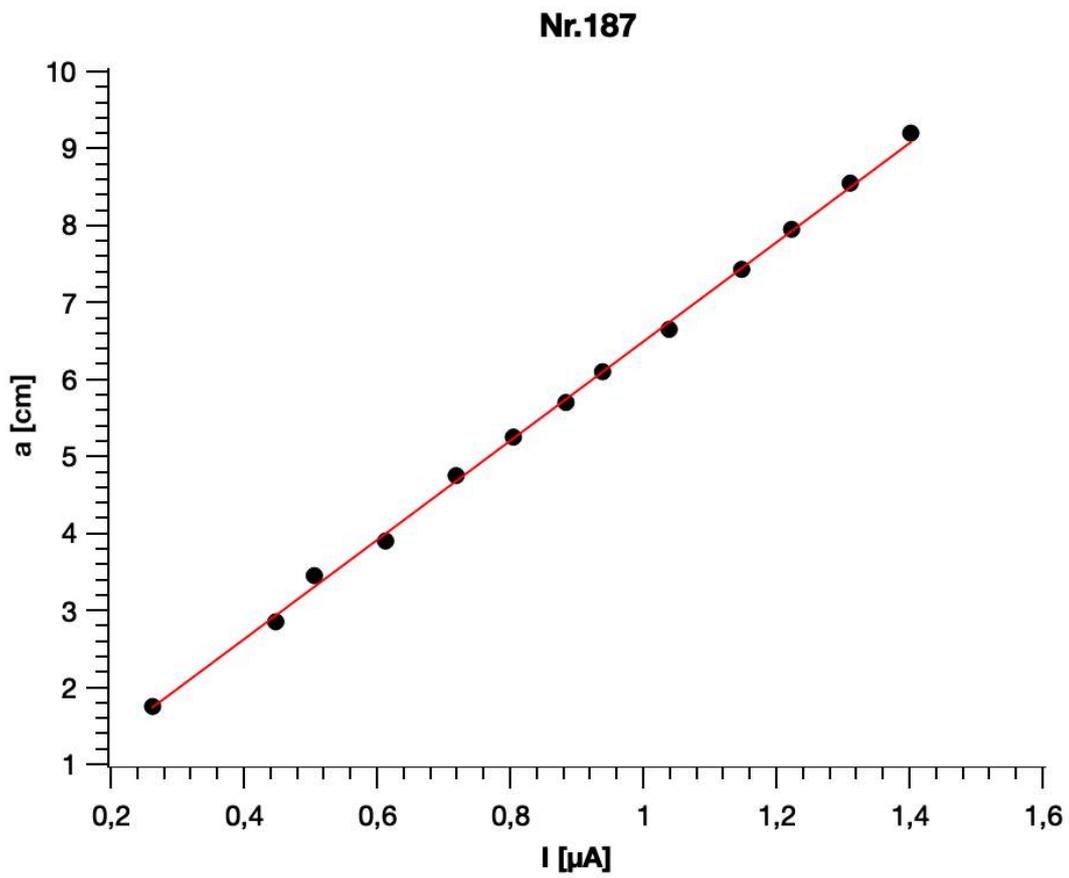


Abbildung 8.4: Spiegelgalvanometer Nr.187 - Skalierung des Spiegelgalvanometers

Kapitel 9

Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Siemens und Halske

9.1 Aufbau des Gerätes

In diesem Kapitel wird das Spiegelgalvanometer nach Deprez D'Arsonval mit der Inventarnummer VII/989 untersucht (siehe Abb.9.1). An der Vorderseite des Sockels ist die Seriennummer 300117 und am Gehäuse der Firmenname „Siemens & Halske“ eingraviert. Auffällig an diesem Gerät ist, dass es ein abnehmbares Oberteil, bestehend aus Kupferspule, Eisenkern und Torsionsfaden besitzt. Dieses Oberteil ist mittels zweier Schrauben am Gehäuse über dem Permanentmagnetenpaar befestigt.

Außerdem sticht auch der lange Hals heraus. Er verbindet den Torsionskopf mit dem abnehmbaren Teil des Messgerätes. Um den Hals befindet sich ein Ring, auf dem der Systemwiderstand (ca.350 Ω) und Gesamtinnenwiderstand (10000 Ω) des Galvanometers vermerkt sind.

Das aus größtenteils Messing bestehende Gerät sitzt auf einer Hartgummischeibe mit einem Durchmesser von $(14,0 \pm 0,1)$ cm und besitzt eine Höhe von $(37,0 \pm 0,5)$ cm. Es wiegt nach Herstellerangaben lediglich 3,33 kg. Eine an der Rückseite befindliche Libelle (siehe Abb.9.2) ermöglicht ein genaues Ausrichten des Spiegelgalvanometers. Dies erfolgt durch die verstellbaren Fußschrauben, derart, dass sich die Blase direkt im Zentrum eines markierten Kreises befindet.[Sack, 1896]

Die Arretierungsvorrichtung ist folgendermaßen zu betätigen: Der abgerundete Knopf unter dem Spiegel wird nach unten verschoben, während der daneben befindliche Querriegel nach rechts gedrückt wird.



Abbildung 9.1: Spiegelgalvanometer - Nr.300117



Abbildung 9.2: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Libelle auf der Hartgummischeibe an der Rückseite des Gerätes

Die Schaltung des Spiegelgalvanometers ist aus der Abbildung 9.3 ersichtlich und einer Gerätebeschreibung aus dem Jahre 1909 entnommen. Der mit 1 bezeichnete Kontakt ist mittels Kontaktfeder mit dem unteren Ende der Drehspule verbunden. Der in diese Klemme eintretende Strom verläuft über die Spule zum Torsionskopf und über desselbigen zum Körper des Instruments. Dieser ist leitend mit dem Kontakt 2 verbunden. Der eingebaute Vorschaltwiderstand ist über Klemme 3 in das System zu bringen.

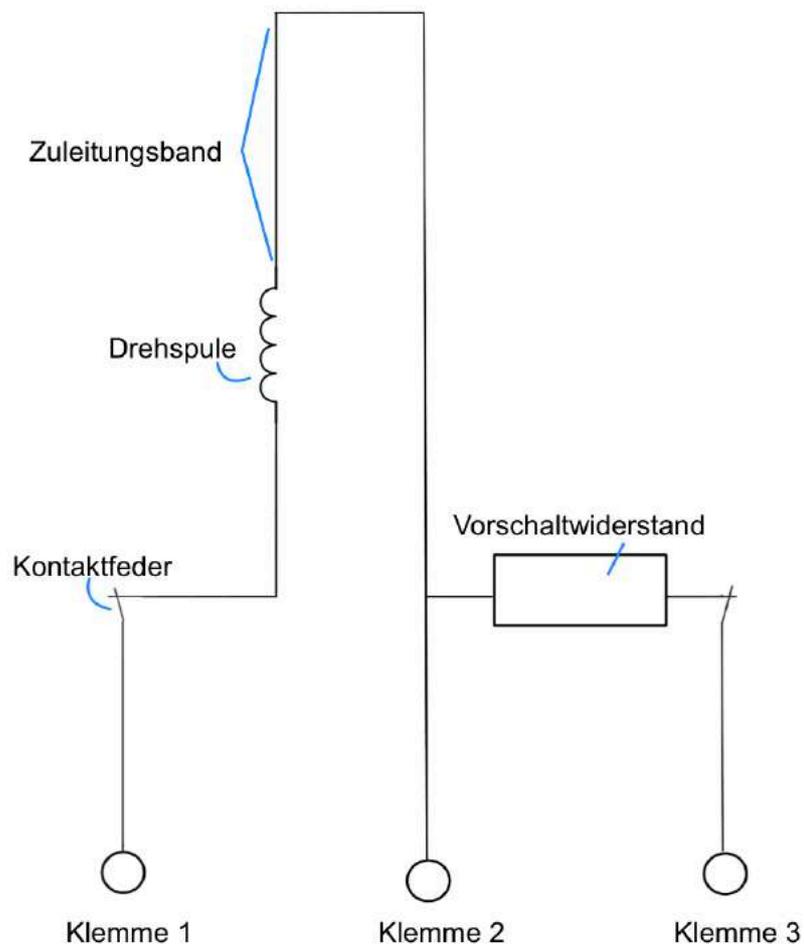


Abbildung 9.3: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Schaltplan des Messgerätes

9.2 Experiment

9.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Es wird der Schaltplan aus Abbildung 7.1 verwendet.

Es gibt zwei Versuchsdurchgänge: mit ($R_3 = (10000 \pm 20) \Omega$) und ohne Vorschaltwiderstand ($R_3 = (350 \pm 0,7) \Omega$). Zu Beginn der Messung werden der Systemwiderstand und Gesamtwiderstand des Galvanometers mittels Digitalmultimeter gemessen (siehe Tabelle 9.1). Bei Anschluss

	$R_G [\Omega]$
Systemwiderstand	$350 \pm 0,7$
Gesamtwiderstand	10000 ± 20

Tabelle 9.1: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Galvanometerwiderstände

an Klemme 1 und 2 wird nur das bewegliche System verwendet, während mit 1 und 3 zusätzlich der Vorschaltwiderstand in Reihe geschaltet wird. Die erste Messreihe findet ohne Vorschaltwiderstand statt. Nach Beendigung derselbigen wird die Messreihe mit Vorschaltwiderstand wiederholt.

9.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des ersten Messdurchgangs sind in folgender Tabelle 9.2 ersichtlich, wobei die Stromstärke I mit dem Ohm'schen Gesetz unter Verwendung von $R_G = (350 \pm 0,7) \Omega$ berechnet wurde. Die Messunsicherheit des Nanovoltmeters beträgt $\Delta U = \pm 0,0001 \text{ mV}$.

U (Nanovoltmeter) [mV]	I (berechnet) [μA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [$^\circ$]
0,881	$2,52 \pm 0,01$	1,15	0,329
1,31	$3,75 \pm 0,01$	1,85	0,53
1,68	$4,79 \pm 0,01$	2,55	0,73
1,89	$5,41 \pm 0,01$	2,9	0,831
2,35	$6,71 \pm 0,01$	3,75	1,074
2,72	$7,78 \pm 0,02$	5	1,431
3,06	$8,74 \pm 0,02$	5,8	1,66
3,33	$9,53 \pm 0,02$	6,5	1,859
3,76	$10,7 \pm 0,02$	7,75	2,216

Tabelle 9.2: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Messergebnisse mit dem Systemwiderstand 350Ω

Die Ergebnisse des zweiten Durchgangs in Tabelle 9.3, wobei die Stromstärke I unter Verwendung von $R_G = (10000 \pm 20) \Omega$ berechnet wurde.

U (Nanonvoltmeter) [mV]	I (berechnet) [mA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [°]
0,98	$0,098 \pm 0,0002$	1,25	0,358
1,75	$0,175 \pm 0,0004$	2,45	0,702
2,23	$0,223 \pm 0,0004$	3,4	0,974
2,73	$0,273 \pm 0,001$	4,5	1,288
3,17	$0,317 \pm 0,001$	5,4	1,545
3,52	$0,352 \pm 0,001$	6,5	1,859
3,90	$0,390 \pm 0,001$	7,25	2,073
4,38	$0,438 \pm 0,001$	8,75	2,5

Tabelle 9.3: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Messergebnisse mit dem Gesamtwiderstand 10000Ω

Für den Drehwinkel ϕ ergibt sich bei beiden Messreihen eine Unsicherheit von $\Delta\phi = \pm 0,005^\circ$. Mit den Messergebnissen wurden zwei Regressionsanalysen durchgeführt und Diagramme erstellt (siehe Abb.9.4 und 9.5). Die Korrelationskoeffizienten beider Analysen sind mit 0,994 und 0,996 sehr hoch. Es besteht in beiden Fällen also ein sehr hoher linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke I und dem Ausschlag a . Die Steigungen beider Regressionsgeraden betragen $k_1 = 0,811 \frac{cm}{\mu A}$ und $k_2 = 20,998 \frac{cm}{mA}$.

Nach Kapitel 2.2.4 ergibt sich für die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers Nr.300117 (Skalenabstand $r = 1$ m) im ersten Versuchsdurchgang der Wert $S_{I_1} = 8,11 \frac{mm}{\mu A}$, die Stromkonstante $C_{I_1} = 0,123 \frac{\mu A}{mm}$ und für den zweiten Messdurchgang eine Empfindlichkeit von $S_{I_2} = 209,98 \frac{mm}{mA}$ mit $C_{I_2} = 0,00476 \frac{mA}{mm}$. Nach Gleichung 2.15 für die Spannungskonstanten $C_{U_1} = 86,3 \frac{\mu V}{mm}$ und $C_{U_2} = 95,2 \frac{mV}{mm}$.

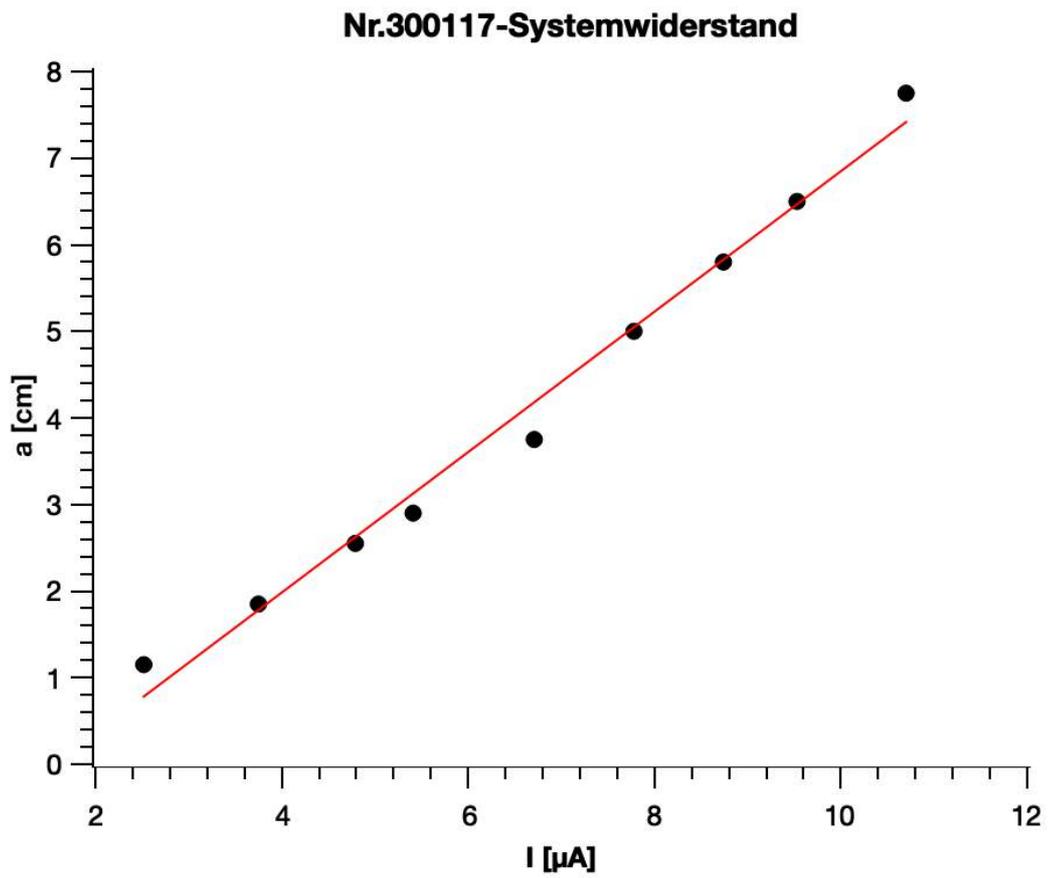


Abbildung 9.4: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Skalierung mit Systemwiderstand

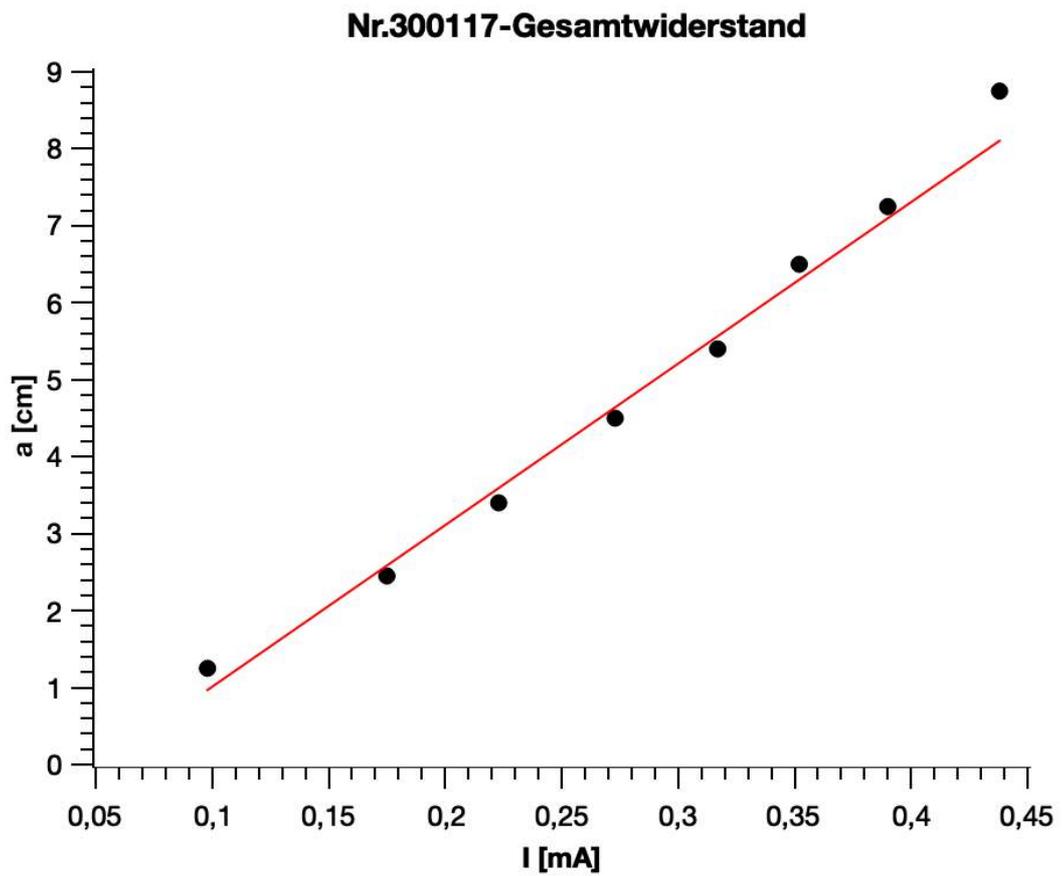


Abbildung 9.5: Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Skalierung mit Gesamtwiderstand

Kapitel 10

Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Hartmann und Braun

10.1 Aufbau des Gerätes

Das Spiegelgalvanometer von der Firma Hartmann und Braun besitzt die Fabrikationsnummer 1028. Auffällig ist das, für Demonstrationszwecke geeignete, vollkommen durchsichtige Gehäuse aus Glas (siehe Abb.10.1). Dadurch sind der rot ummantelte Feldmagnet, welcher aus sechs angeordneten Hufeisenmagneten besteht, und der Eisenkern deutlich sichtbar.

Der Torsionskopf und Spiegel des Messgerätes befinden sich in einer abnehmbaren Glaskuppel. Um mögliche Brechungsphänomene der Kuppel zu eliminieren, befindet sich an der Vorderseite derselbigen auf spiegelhöhe ein kreisrundes abgeflachtes Glasstück. Das Glasgehäuse des Spiegelgalvanometers ist an zwei Seiten mittels Federn an einem Holzsockel befestigt. Der Messapparat im Inneren besteht größtenteils aus Messing und wird durch drei Schrauben am Sockel befestigt. Wie in Abbildung 10.2 zu sehen ist, befindet sich am oberen Ende der Hufeisenmagnete, an einer Messingplatte befestigt, eine Wasserlibelle und Plakette. Auf derselbigen sind sowohl der Firmenname, als auch ein Firmenlogo und die Seriennummer vermerkt. Die Abkürzung „D.R.PATENT“ steht für „Deutsches Reichspatent“, die Bezeichnung des Patentamtes in Deutschland zur Zeit von 1919 bis 1945.

Das Messgerät mit einer Höhe von $(26 \pm 0,5)$ cm besitzt drei Füße, welche mittels Stellschrauben justiert werden können, bis die Blase in der Libelle im Zentrum steht. An der Vorderseite des Holzsockels befinden sich zwei Anschlüsse. Der Gesamtwiderstand des Drehspulgalvanometers wurde mit einer Durchgangsmessung bestimmt und beträgt $(1712 \pm 3,4) \Omega$.



Abbildung 10.1: Spiegelgalvanometer - Nr.1028



Abbildung 10.2: Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Libelle und Plakette

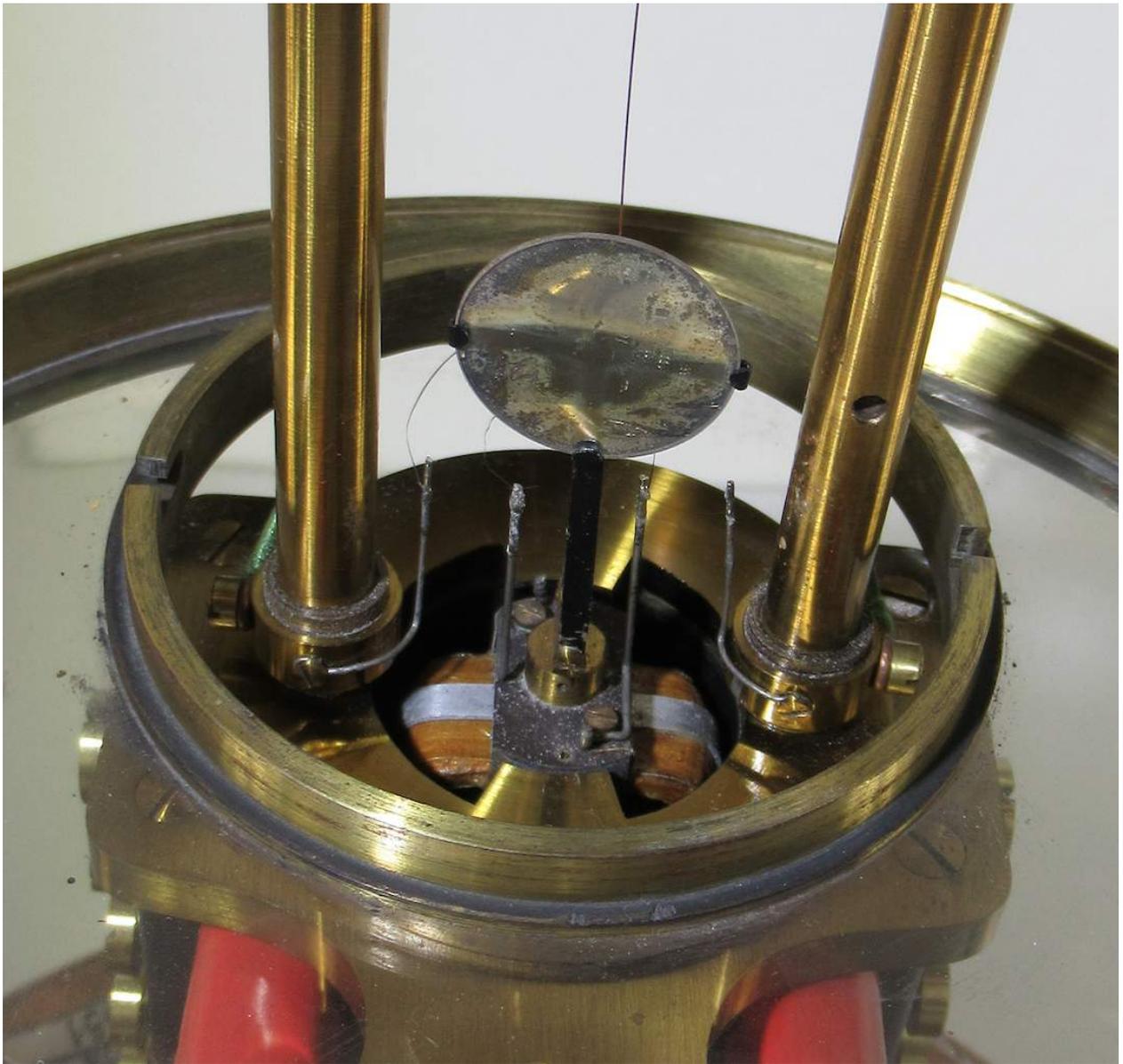


Abbildung 10.3: Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Drehspule

Dank der offenen Bauweise ist ein genauer Einblick in das Innere des Messapparates möglich (siehe Abb.10.3). Gut sichtbar sind die Kupferspule und die elektrischen Kontakte, mit welcher dieselbige, über feine Zuleitungsdrähtchen, mit dem Stromkreis verbunden wird. In dieser Abbildung sind auch die Abnutzungserscheinungen des Spiegels zu sehen.

10.2 Experiment

10.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Es wird der Schaltplan aus Abbildung 7.1 verwendet.

Vor der Versuchsdurchführung wird die Glaskuppel entfernt und der Gesamtwiderstand des Messgerätes gemessen. Es lässt sich ein Widerstand von $R_G = (1712 \pm 3,4) \Omega$ mittels Digitalmultimeter messen. Passend wird für den aperiodischen Grenzfall ein variabler Widerstand von $R_3 = (1711,9 \pm 3,4) \Omega$ gewählt.

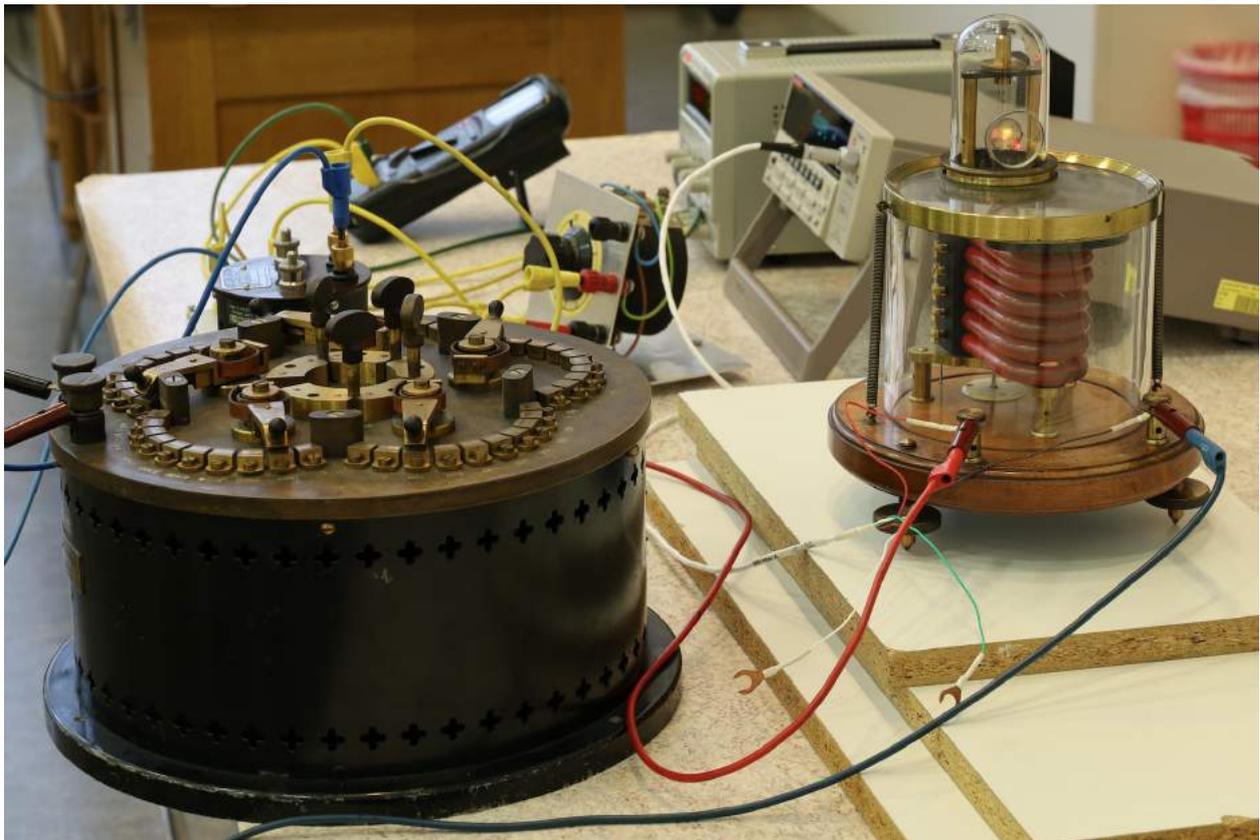


Abbildung 10.4: Nr.1028 - Versuchsaufbau

10.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10.1 zu sehen, wobei auch hier die Stromstärke I mit dem Ohm'schen Gesetz berechnet wurde. Für die Berechnung wird der Widerstandswert $R_G = (1712 \pm 3,4) \Omega$ verwendet. Die Messunsicherheit des Nanovoltmeters beträgt $\Delta U = \pm 0,0001 \text{ mV}$.

U (Nanovoltmeter) [mV]	I (berechnet) [μA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [$^\circ$]
0,0299	$0,0175 \pm 0,0001$	0,5	0,143
0,0816	$0,0476 \pm 0,0001$	1,3	0,372
0,141	$0,0825 \pm 0,0002$	2,25	0,644
0,222	$0,130 \pm 0,0003$	3,5	1,002
0,331	$0,193 \pm 0,0004$	5,3	1,517
0,435	$0,254 \pm 0,0005$	6,9	1,973
0,497	$0,290 \pm 0,0006$	7,9	2,258
0,56	$0,327 \pm 0,0007$	8,9	2,543
0,613	$0,358 \pm 0,0007$	9,7	2,77

Tabelle 10.1: Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Messergebnisse

Für den Drehwinkel ϕ ergibt sich eine Messunsicherheit von $\Delta\phi = \pm 0,005^\circ$. Mit den Messergebnissen wurde ein Plot erstellt (siehe Abb.8.4). Der Korrelationskoeffizient der Regressionsanalyse ist wie bei dem Drehspulspiegelgalvanometer Nr.187 mit 0,999 sehr hoch. Auch hier besteht also ein sehr hoher linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke I und dem Ausschlag a . Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt $k = 27,14 \frac{\text{cm}}{\mu\text{A}}$.

Nach Kapitel 2.2.4 ergibt sich für die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers Nr.1028 (Skalenabstand $r = 1 \text{ m}$) der Wert $S_I = 271,4 \frac{\text{mm}}{\mu\text{A}}$ und folglich die Stromkonstante $C_I = 0,00368 \frac{\mu\text{A}}{\text{mm}}$. Nach Gleichung 2.15 für die Spannungskonstante $C_U = 12,62 \frac{\mu\text{V}}{\text{mm}}$.

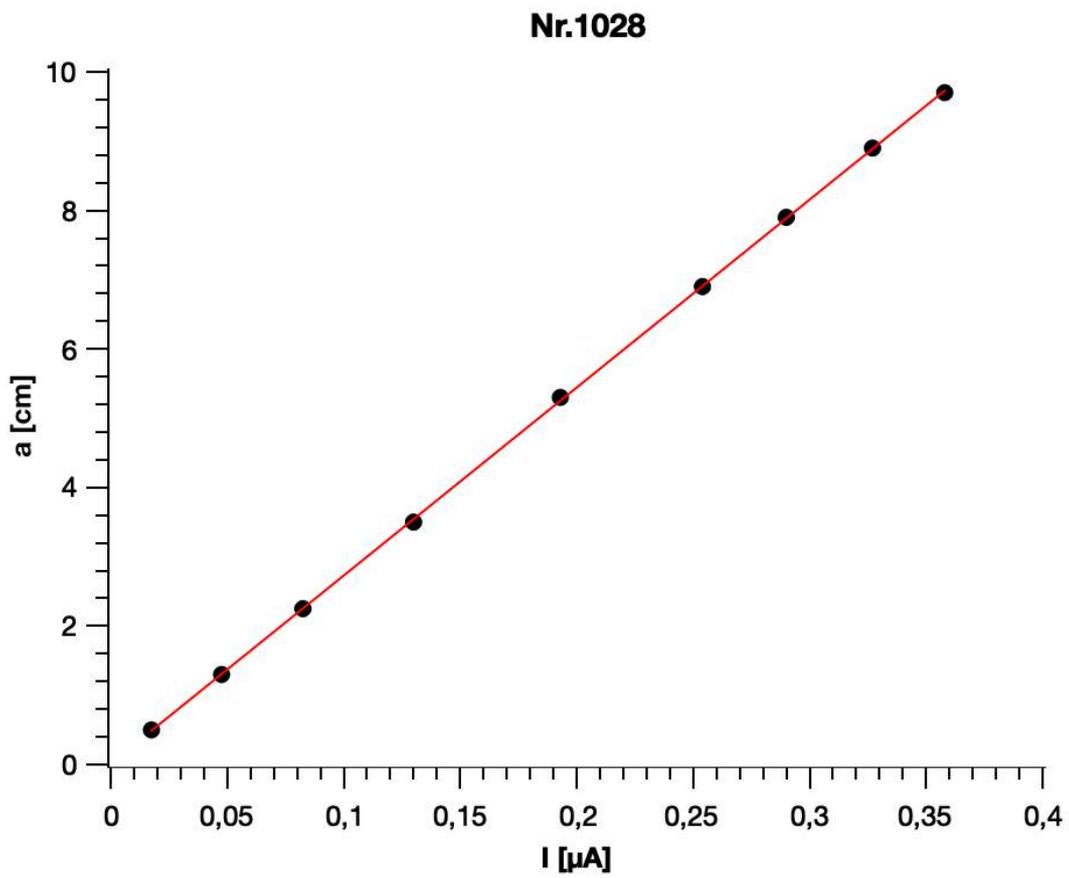


Abbildung 10.5: Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Skalierung des Spiegelgalvanometers

Kapitel 11

Zernikegalvanometer Nr.14177 - Kipp und Zonen

11.1 Aufbau des Gerätes

Das Zernikegalvanometer der Firma Kipp und Zonen ist in Abbildung 11.1a zu sehen. Benannt wurde es nach dem Erfinder: dem niederländischen Physiker und Nobelpreisträger Frits Zernike. Auf der Rückseite der Einsatzröhre ist die Fabrikationsnummer 14177 eingraviert und die Bestellnummer A14. Das Firmenlogo „KIPP-Delft-Holland“ ist auf der Vorderseite der Grundplatte, zwischen den beiden bläulichen Anschlüssen vermerkt. Die Grundplatte hat einen Durchmesser von $(15,0 \pm 0,1)$ cm. Das Instrument ist $(20,0 \pm 0,5)$ cm hoch und besitzt ein Aluminiumgehäuse.

Mit einem magnetischen Nebenschluss an der Oberseite des Geräts, kann die Stärke des Magnetfeldes reguliert werden. Dies soll mit der Einstellung des äußeren Widerstands helfen, den aperiodischen Grenzfall zu erhalten. Je höher der äußere Widerstand ist, desto stärker soll das Magnetfeld sein. Dies geschieht dadurch, dass der Nebenschluss durch Drehung einer Schraube nach oben geschraubt wird. Dadurch lässt sich die Luftinduktion im Luftspalt verändern. Beispielsweise wird bei doppelter Luftinduktion auch der entsprechende Bremsstrom doppelt so groß. Folglich wird das Bremsmoment (siehe Gleichung (2.9)), welches maßgebend für die Dämpfung ist, viermal so groß [Bubert, 1948].

Interessant an diesem Galvanometer ist außerdem die abnehmbare Einsatzröhre (siehe Abb.11.1b). Diese wird mit den Schrauben F am Magneten befestigt. Durch Drehung des Torsionskopfes K gegen den Uhrzeigersinn, kann die Transportsicherung aufgehoben werden. In Abbildung 11.1b ist eine Gabel V zu erkennen. Diese wird bei Arretierung von einem Hacken ergriffen. Das Drehen von C erlaubt die Nullpunkteinstellung des Galvanometers auf eine gegenüberliegende Skala zu kalibrieren. Falls eine größere Verstellung notwendig ist, kann zusätzlich die Gegenschraube S mittig von C verwendet werden.

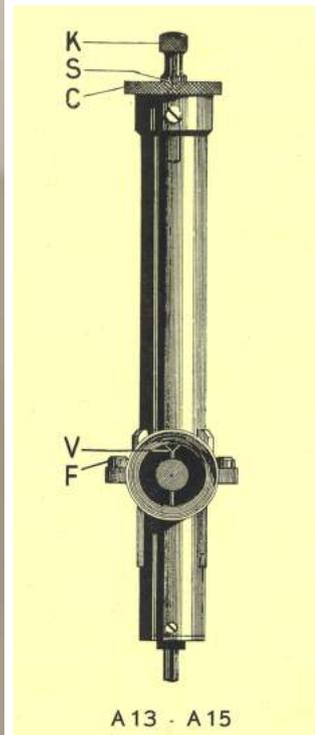


Abbildung 11.1: Zernikegalvanometer HVII/14 a) Vorderseite, b) Einsatzröhre [Betriebsanleitung]

Auf der Rückseite der Einsatzröhre ist weiters noch eine Libelle verbaut. Die drei Stellschrauben unterhalb des Messgerätes sollen so justiert werden, dass die Luftblase sich mittig befindet. Laut Gebrauchsanleitung besitzt das Galvanometer einen Innenwiderstand von 35Ω . Eine Durchgangsmessung bestätigt diesen Wert mit einer Messunsicherheit von $\Delta R_G = \pm 0,1 \Omega$.



Abbildung 11.2: Zernikegalvanometer HVII/14 - Rückseite

11.2 Experiment

11.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Es wird der Aufbau aus Abbildung 7.1 verwendet.

Der Versuchsaufbau mit dem Zernikegalvanometer 14177 ist in Abbildung 11.3 nochmals dargestellt. Aufgrund des Höhenunterschiedes zum Laser, wird das Galvanometer auf eine Holzbox gestellt. Für den aperiodischen Grenzfall wird ein variabler Widerstand von $R_3 = (34,9 \pm 0,2) \Omega$ verwendet.



Abbildung 11.3: Zernikegalvanometer HVII/14

11.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind in Tabelle 11.1 zu sehen, wobei auch hier die Stromstärke I mit dem Ohm'schen Gesetz berechnet wurde. Für die Berechnung wird der Widerstandswert $R_G = (35 \pm 0,1) \Omega$ verwendet. Die Messunsicherheit des Nanovoltmeters beträgt $\Delta U = \pm 0,0001 \text{ mV}$.

U (Nanovoltmeter) [mV]	I (berechnet) [μA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [$^\circ$]
0,0261	$0,7443 \pm 0,0036$	1	0,286
0,0478	$1,3657 \pm 0,0048$	1,9	0,544
0,0587	$1,6757 \pm 0,0056$	2,2	0,63
0,0752	$2,1486 \pm 0,0068$	2,9	0,831
0,0847	$2,4186 \pm 0,0075$	3,3	0,945
0,0975	$2,7843 \pm 0,0085$	3,8	1,088
0,1121	$3,2029 \pm 0,0096$	4,45	1,274
0,1378	$3,9371 \pm 0,0116$	5,3	1,517
0,156	$4,4571 \pm 0,0131$	6,1	1,745
0,1733	$4,98 \pm 0,0144$	6,85	1,959
0,1879	$5,3671 \pm 0,0156$	7,45	2,13
0,2073	$5,9214 \pm 0,0172$	8,15	2,33
0,2236	$6,3871 \pm 0,0185$	8,85	2,529

Tabelle 11.1: Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Messergebnisse

Für den Drehwinkel ϕ ergibt sich wiederum eine Messunsicherheit von $\Delta\phi = \pm 0,005^\circ$. Mit den Messergebnissen wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt und ein Diagramm erstellt (siehe Abb.11.4). Der Korrelationskoeffizient der Regressionsanalyse liegt bei 0,998. Auch hier besteht also ein sehr deutlicher linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke I und dem Ausschlag a . Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt $k = 1,39 \frac{\text{cm}}{\mu\text{A}}$.

Nach Kapitel 2.2.4 ergibt sich für die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers Nr.14177 (Skalenabstand $r = 1 \text{ m}$) der Wert $S_I = 13,9 \frac{\text{mm}}{\mu\text{A}}$ und folglich die Stromkonstante $C_I = 0,0719 \frac{\mu\text{A}}{\text{mm}}$. Nach Gleichung 2.15 für die Spannungskonstante $C_U = 5,04 \frac{\mu\text{V}}{\text{mm}}$.

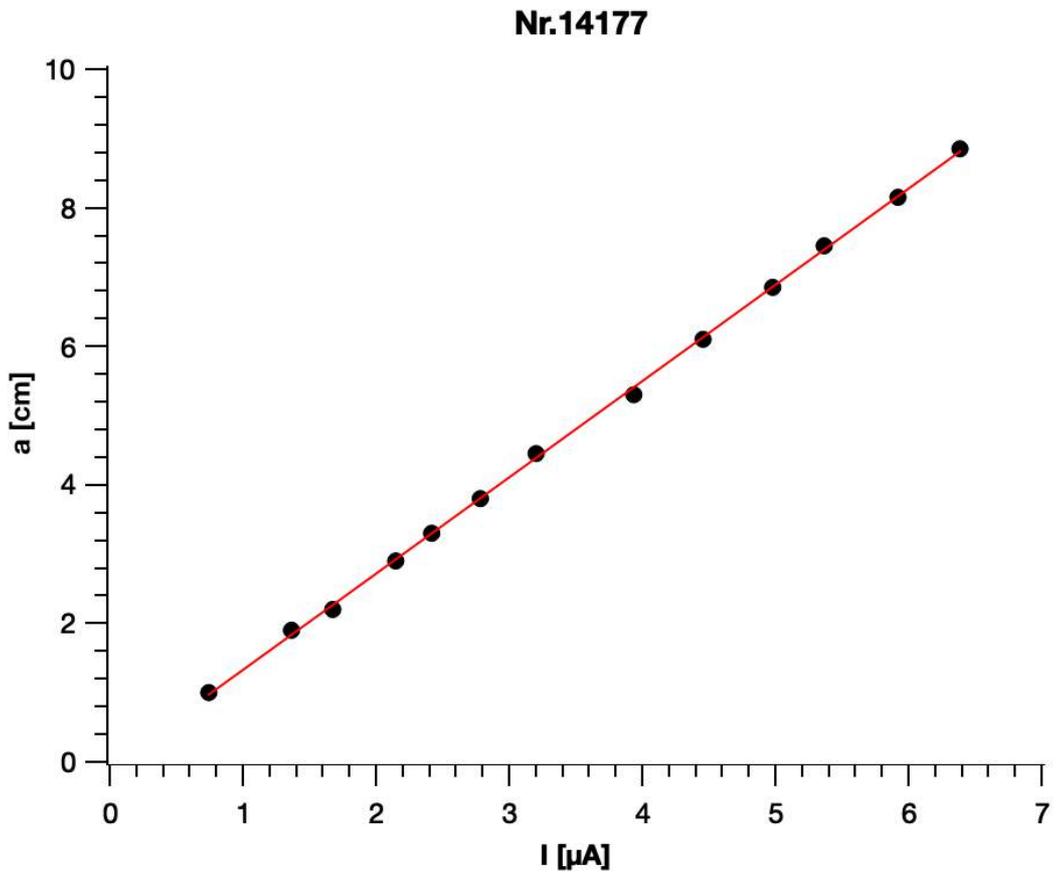


Abbildung 11.4: Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Skalierung des Spiegelgalvanometers

Kapitel 12

Spiegelgalvanometer mit Doppelspule Nr.865 - Hartmann und Braun

12.1 Aufbau des Gerätes

In diesem Kapitel wird das Spiegelgalvanometer der Firma Hartmann und Braun mit der Identifikationsnummer 865 beschrieben. Die Inventarnummer ist VII/90. Das Messgerät besitzt zwei Spulen: die Spule 1 mit $4,7 \Omega$ und Spule 2 mit 720Ω . Die Nummerierung ist den Anschlüssen des Geräts entnommen, welche sich seitlich davon befinden (siehe Abb.12.1). Von vorne betrachtet befindet sich auf der rechten Seite eine Arretierungsvorrichtung in Form eines Messinghebels mit der Inschrift „Arret.“ und „frei“ (siehe Abb.12.2). Ein weiterer Hebel lässt das Galvanometer zwischen einer aperiodischen und einer ballistischen Messfunktion wechseln.

Das Galvanometer besitzt eine runde Grundfläche mit einem Durchmesser von $(19,0 \pm 0,5)$ cm und ist $(24,5 \pm 0,5)$ cm hoch. Es besitzt drei Standfüße, wobei nur die hinteren beiden mit Stellschrauben versehen und justierbar sind (siehe Abb.12.1b). Zusätzlich befindet sich auf dem Deckel zur Justierung eine Libelle, ähnlich wie bei dem Spiegelgalvanometer Nr.300117.

Der Messapparat besteht primär aus Messing und besitzt eine abschraubbare Krone. Das Entfernen der Messingkrone und anschließend des Blechhalses erlaubt einen besseren Blick auf die bewegliche Spule. Dieselbige ist mit dem Spiegel in Abbildung 12.3 zu sehen.



Abbildung 12.1: Doppelspulengalvanometer Nr.865 a) Vorderseite b) Rückseite



Abbildung 12.2: Nr.865 Arretierungsvorrichtung

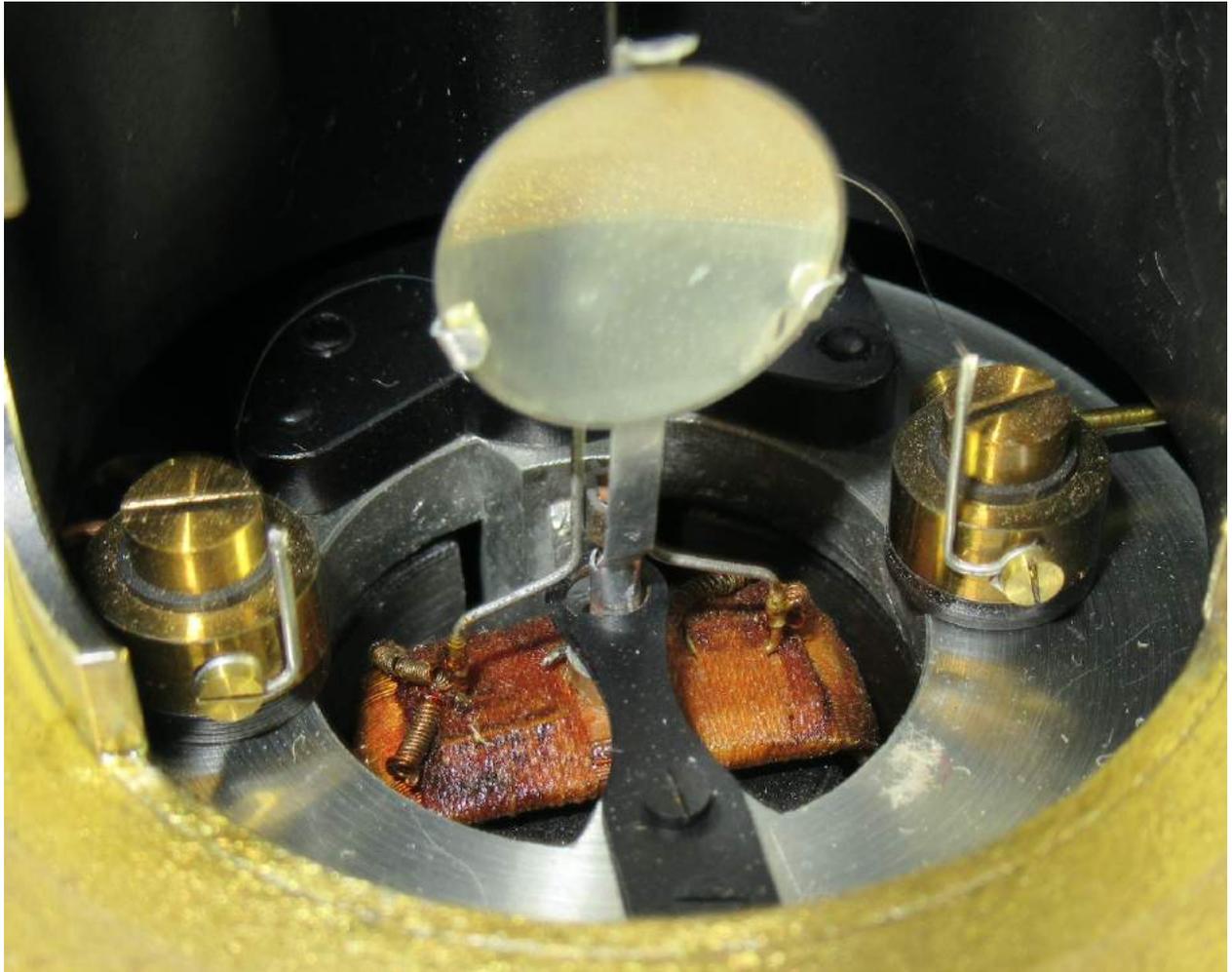


Abbildung 12.3: Nr.865 Spiegel und bewegliche Spule

12.2 Experiment

12.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Auch hier wird der Versuchsaufbau aus Abbildung 7.1 verwendet.

In folgender Abbildung ist der Messaufbau für das Spiegelgalvanometer Nr.865 dargestellt. Es wird der Anschluss der Spule 1 mit einem Gesamtwiderstand von $720\ \Omega$ verwendet. Dieser wird mittels Durchgangsmessung mit Messunsicherheit von $\Delta R_G = \pm 1,4\ \Omega$ bestätigt. Für den aperiodischen Grenzfall wird ein variabler Widerstand (Präzisionswiderstand) $R_3 = 719,9\ \Omega$ gewählt.

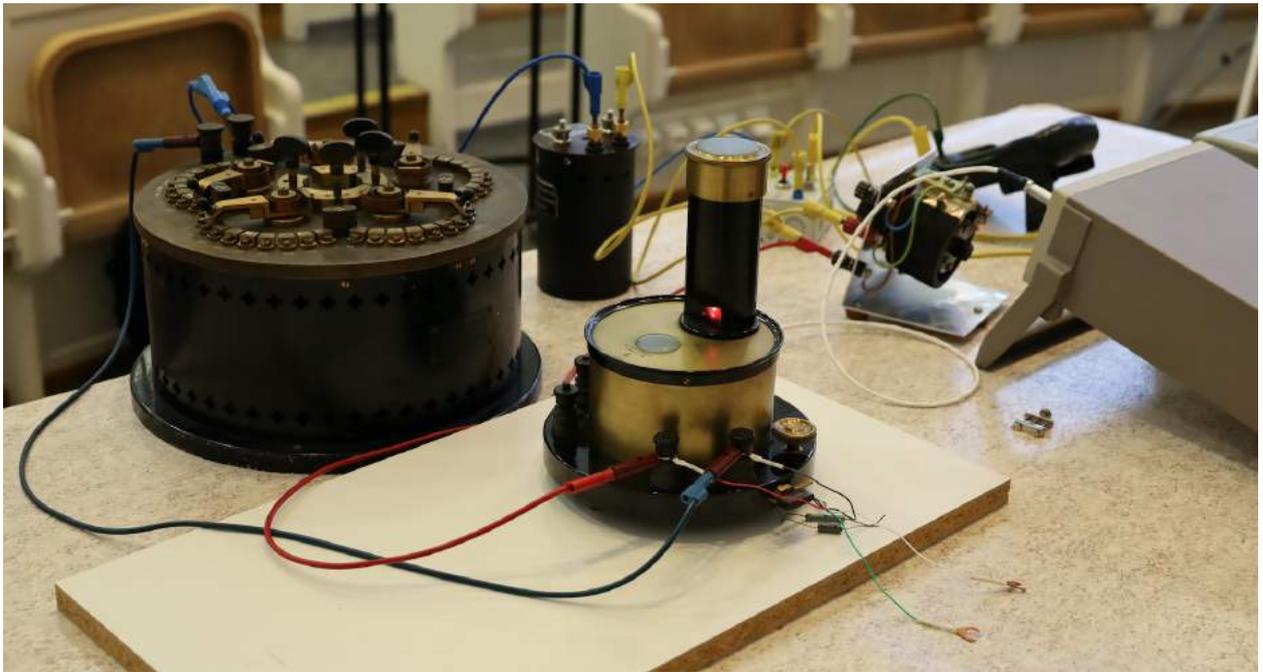


Abbildung 12.4: Spiegelgalvanometer Nr.865 - Versuchsaufbau

12.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind in Tabelle 12.1 zu sehen, wobei auch hier die Stromstärke I mit dem Ohm'schen Gesetz berechnet wurde. Für die Berechnung wird der Widerstandswert $R_G = (720 \pm 1,4) \Omega$ verwendet. Die Messunsicherheit des Nanovoltmeters beträgt $\Delta U = \pm 0,0001 \text{ mV}$.

U (Nanovoltmeter) [mV]	I (berechnet) [μA]	Ausschlag a [cm]	ϕ (berechnet) [$^\circ$]
0,00855	$0,011875 \pm 0,000141$	0,5	0,143
0,03025	$0,042014 \pm 0,000161$	2,3	0,659
0,05285	$0,073403 \pm 0,000199$	4,6	1,317
0,07285	$0,101181 \pm 0,000241$	6,5	1,859
0,09131	$0,126806 \pm 0,000283$	8,2	2,344
0,10855	$0,150764 \pm 0,000324$	9,4	2,685

Tabelle 12.1: Spiegelgalvanometer Nr.865 - Messergebnisse

Für den Drehwinkel ϕ ergibt sich wiederum eine Messunsicherheit von $\Delta\phi = \pm 0,005^\circ$. Mit den Messergebnissen wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt und ein Diagramm erstellt (siehe Abb.12.5). Der Korrelationskoeffizient der Regressionsanalyse liegt bei 0,989. Auch hier besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke I und dem Ausschlag a . Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt $k = 65,7 \frac{\text{cm}}{\mu\text{A}}$.

Nach Kapitel 2.2.4 ergibt sich für die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers Nr.865 (Skalenabstand $r = 1 \text{ m}$) der Wert $S_I = 657 \frac{\text{mm}}{\mu\text{A}}$ und folglich die Stromkonstante $C_I = 0,0015 \frac{\mu\text{A}}{\text{mm}}$. Nach Gleichung 2.15 für die Spannungskonstante $C_U = 4,14 \frac{\mu\text{V}}{\text{mm}}$.

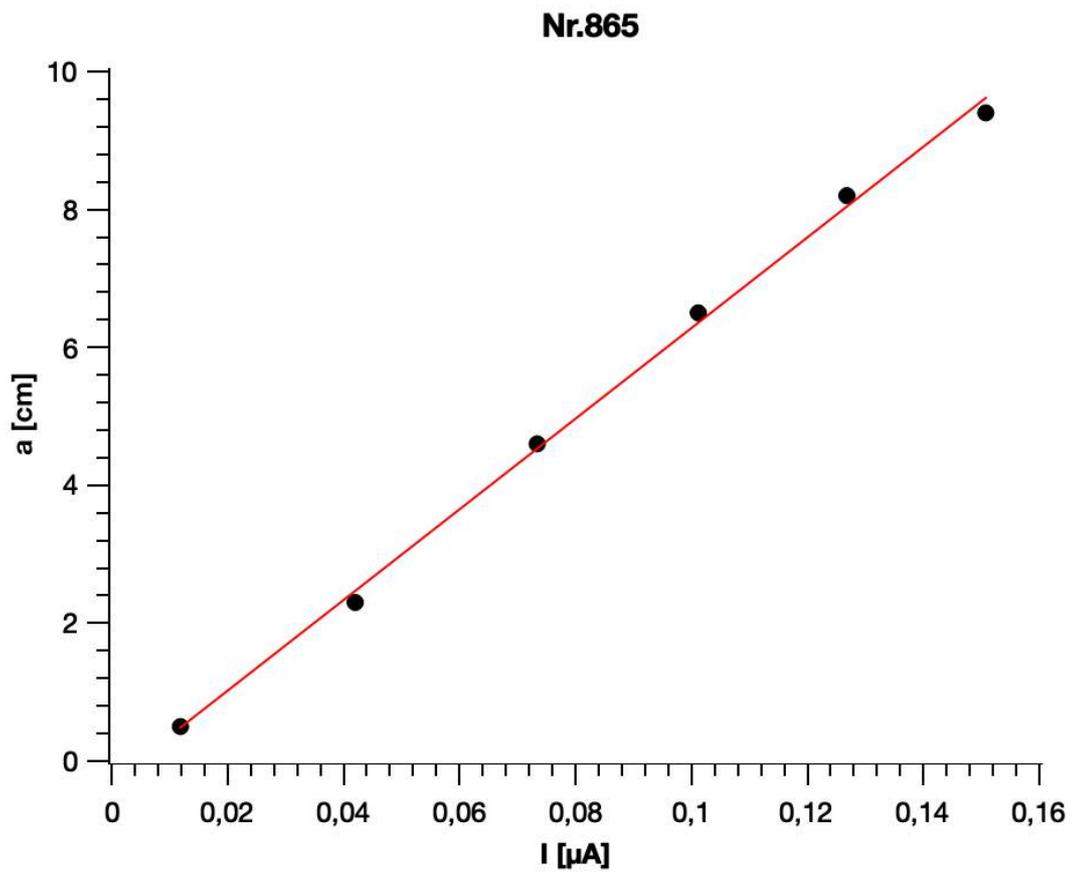


Abbildung 12.5: Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Skalierung des Spiegelgalvanometers

Kapitel 13

Fazit der Arbeit

In dieser Masterarbeit wurden unterschiedliche elektrostatische und elektrodynamische Messgeräte aus der historischen Sammlung für Physik der Universität Wien untersucht. Die theoretischen Grundlagen erlauben einen genaueren Einblick in frühere Messtechniken. Die Versuchsdurchgänge haben gezeigt, dass die verwendeten Messinstrumente, trotz deren Alter weiterhin erstaunlich präzise sind (siehe Tabellen 13.1 und 13.2).

Messgerät	Messbereich	Messgenauigkeit
Voltmeter n. Thomson Nr.24632	$0 - 10000 \text{ V}$	1 Skt.
Binantenelektrometer Nr.288067	$5 \cdot 10^{-4} - 10^3 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$	$10 \frac{\text{mm}}{\text{mV}}$
Einfadenelektrometer n. Wulf Nr.3246	$10^{-3} - 10^3 \text{ V}$	$0,001 \frac{\text{V}}{\text{Skt}}$

Tabelle 13.1: Messbereiche und (maximale) Genauigkeit der Elektrometer

Das elektrostatische Voltmeter nach Thomson Nr.24632 zeigte einen bemerkenswerten einfachen Einsatz eines Zusatzgewichtes, zur Verdopplung des Messbereiches von 0 - 5 kV auf 0 - 10 kV. Es war voll funktionsfähig und besitzt eine Auflösung von 100 V im 5kV-Bereich. Im Gegensatz dazu konnten weder das Binantenelektrometer Nr.288067 noch das Einfadenelektrometer von Wulf Nr.3246 funktionstüchtig gemacht werden. Der fehlende Torsionsdraht und Kontaktdraht beim Binantenelektrometer konnte zwar provisorisch ausgetauscht werden, aber eine verformte Kreisscheibe und ein zu wenig feiner unterer Kontaktdraht führte zu einer Dezentrierung derselbigen. Weiteren Verbesserungsversuchen hielt sie nicht stand. Ein kurzer Ausschlag konnte die Funktionsweise dennoch bestätigen. Das Einfadenelektrometer war in einem schlechteren Zustand und konnte trotz Restaurierungsversuchen nicht in Betrieb genommen werden. Die Messbereiche beider sind durch die unterschiedliche Spannung des Aufhängefadens beeinflussbar und reichen vom Millivolt-Bereich bis zum Kilovolt-Bereich.

Da für die Inbetriebnahme des Torsions-Elektrodynamometers Nr.1638 Quecksilber nötig wäre und dessen Handhabung im Rahmen dieser Masterarbeit vermieden werden sollte, wurde dieses Messinstrument nur theoretisch untersucht. Näherungsweise Berechnungen des Drehmoments im

15 A- und 50 A-Bereich weisen das Torsionsdynamometer als sinnvolle Konstruktion aus.

Die unterschiedlichen Drehspulspiegelgalvanometer (3 Geräte von Hartmann & Braun, eines von Siemens & Halske, eines von Kipp & Zonen) waren alle voll funktionsfähig. Die Untersuchungen und dazugehörigen Regressionsanalysen zeigten mit einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von über 0,99 einen sehr hohen linearen Zusammenhang zwischen Stromstärke und Ausschlag. Der Messbereich eines Galvanometer hängt indirekt proportional vom jeweiligen Galvanometerwiderstand ab. Je größer der Widerstand, desto kleiner der Messbereich. Die errechneten Strom- und Spannungskonstanten sind in Tabelle 13.2 zu finden. Die Eichung erfolgte mit einem Keithley Nanovoltmeter.

Messgerät	Stromkonstante [$\frac{\mu A}{mm}$]	Spannungskonstante [$\frac{\mu V}{mm}$] geg. Widerstand [Ω]
Nr.187	0,0155	3,1 (bei $R = 200$)
Nr.300117	0,123	86,3 (bei $R = 700$)
Nr.300117	4,76	$95,2 \cdot 10^3$ (bei $R = 20000$)
Nr.1028	0,00368	12,62 (bei $R = 3424$)
Nr.14177	0,0719	5,04 (bei $R = 70$)
Nr.865	0,0015	4,14 (bei $R = 1440$)

Tabelle 13.2: Messempfindlichkeit der Spiegelgalvanometer

Zu sehen ist, dass die Auflösung aller beschriebenen Galvanometer im Mikrovolt-Bereich liegt. Das Spiegelgalvanometer Nr.300117 kann durch seinen zusätzlichen Vorschaltwiderstand zusätzlich im Millivolt-Bereich genaue Messungen vollführen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung (a) Quadrantenelektrometer (b) Binantenelektrometer [Geiger und Scheel, 1927]	4
2.2	Schaltungen des Quadrantenelektrometers: (von links nach rechts) Quadrantenschaltung, Nadelschaltung und idiostatische Schaltung [Gobrecht, 1971, S.65] . .	5
2.3	Schaltskizzen: (a) Einfadenelektrometer mit Hilfsspannung (b) Idiostatische Schaltung eines Saitenelektrometers [Meyer und Moerder, 1957, S.LIII]	6
2.4	Schematischer Aufbau eines Drehspulgalvanometers	7
2.5	Kraftrichtung beim stromdurchflossenen Leiter im homogenen Magnetfeld. Auf die Ladungen im Leiter wirkt die Lorentzkraft. [Meyer und Moerder, 1957, S.2] .	8
2.6	Ablesevorrichtung eines Spiegelgalvanometers	9
2.7	Tangenskorrektur Δa abhängig vom Ausschlag a in mm; $r = 1000$ mm, $a_0 = 10$ mm [Schlosser und Winterling, 1960]	10
2.8	Schematische Darstellung der Schwingungszustände [Kohlrausch, 1956, S.39] . .	13
2.9	Schaltplan eines Spannungsteilers	16
2.10	Veranschaulichung des Seebeck-Effektes [Roth und Stahl, 2018, S.240]	17
2.11	(a) Kreuzschalter und (b) Schaltzeichen	18
3.1	Elektrostatistisches Voltmeter nach Thomson - Nr.24632	20
3.2	Nr.24632 - Messvorrichtung des Voltmeters	21
3.3	Nr.24632 - (a) Holzschachtel mit Massenstücken (b) Beschreibung zu den Gewichten m_1 , m_2 und m_3 (links nach rechts)	22
3.4	Nr.24632 - Versuchsaufbau	23
3.5	Nr.24632 - Schaltplan des Versuchsaufbaus	24
4.1	Binantenelektrometer Nr.288067	27
4.2	Binantenelektrometer Nr.288067 - Messvorrichtung	28
4.3	Schematische Darstellung eines Binantenelektrometers (a) Längsschnitt (b) Querschnitt [Alberti et al., 2013]	29
4.4	Binantenelektrometer: (a) Bernsteinsteg zur Isolation (b) Aluminiumnadelhälften	30
4.5	Die vier Binantenelektrometer der historischen Sammlung der Fakultät für Physik	31
4.6	Binantenelektrometer - Versuchsaufbau	32

5.1	Einfadenelektrometer Nr.3246	34
5.2	Einfadenelektrometer Nr.3246 - Innen	35
5.3	Einfadenelektrometer nach Wulf - Schematische Darstellung [Kohlrausch, 1956]	36
5.4	Einfadenelektrometer nach Wulf - Versuchsaufbau	37
6.1	(a) Elektrodynamometer von Siemens und Halske, (b) Schaltskizze des Elektrodynamometers [Weiler, 1905, S.194]	39
6.2	Kreisskala des Elektrodynamometers	40
6.3	Plakette des Elektrodynamometers	41
6.4	Konstantenbeschreibung mit dem Kalibrierdatum 17.April.1883.	42
6.5	Skizze der beweglichen Rechteckschleife mit Abmessungen b und l	43
6.6	Veranschaulichung des Drehmomentes	45
7.1	Schaltskizze - Versuchsaufbau für Spiegelgalvanometer	46
7.2	a) Präzisionswiderstand, b) Plakette	47
7.3	Skalenvorrichtung des Spiegelgalvanometers	48
8.1	Spiegelgalvanometer im Glasgehäuse - Nr.187	51
8.2	Spiegelgalvanometer Nr.187 - Messvorrichtung	52
8.3	Spiegelgalvanometer Nr.187 - Versuchsaufbau	53
8.4	Spiegelgalvanometer Nr.187 - Skalierung des Spiegelgalvanometers	55
9.1	Spiegelgalvanometer - Nr.300117	57
9.2	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Libelle auf der Hartgummischeibe an der Rückseite des Gerätes	58
9.3	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Schaltplan des Messgerätes	59
9.4	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Skalierung mit Systemwiderstand	62
9.5	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Skalierung mit Gesamtwiderstand	63
10.1	Spiegelgalvanometer - Nr.1028	65
10.2	Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Libelle und Plakette	66
10.3	Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Drehspule	67
10.4	Nr.1028 - Versuchsaufbau	68
10.5	Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Skalierung des Spiegelgalvanometers	70
11.1	Zernikegalvanometer HVII/14 a) Vorderseite, b) Einsatzröhre [Betriebsanleitung]	72
11.2	Zernikegalvanometer HVII/14 - Rückseite	73
11.3	Zernikegalvanometer HVII/14	74
11.4	Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Skalierung des Spiegelgalvanometers	76
12.1	Doppelspulengalvanometer Nr.865 a) Vorderseite b) Rückseite	78
12.2	Nr.865 Arretierungsvorrichtung	78

12.3 Nr.865 Spiegel und bewegliche Spule	79
12.4 Spiegelgalvanometer Nr.865 - Versuchsaufbau	80
12.5 Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Skalierung des Spiegelgalvanometers	82

Hinweis: Wenn nicht anders angegeben, wurden die Fotos von Franz Sachslehner aufgenommen.

Tabellenverzeichnis

3.1	Nr.24632 - Massenbestimmung der Massenstücke mittels Feinwaage	22
3.2	Voltmeter Nr.24632 - Messdurchgang mit m_2	24
3.3	Voltmeter Nr.24632 - Messdurchgang mit $m_2 + m_3$	25
6.1	Nr.1638 - Maße und Windungszahl der Spulen. Die Werte l und b für die Spulen 2 und 3 sind nur mittlere Schätzwerte.	44
8.1	Spiegelgalvanometer Nr.187 - Messergebnisse	54
9.1	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Galvanometerwiderstände	60
9.2	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Messergebnisse mit dem Systemwiderstand $350\ \Omega$	60
9.3	Spiegelgalvanometer Nr.300117 - Messergebnisse mit dem Gesamtwiderstand $10000\ \Omega$	61
10.1	Spiegelgalvanometer Nr.1028 - Messergebnisse	69
11.1	Spiegelgalvanometer Nr.14177 - Messergebnisse	75
12.1	Spiegelgalvanometer Nr.865 - Messergebnisse	81
13.1	Messbereiche und (maximale) Genauigkeit der Elektrometer	83
13.2	Messempfindlichkeit der Spiegelgalvanometer	84

Literaturverzeichnis

- [Alberti et al., 2013] Alberti, E., Angenheister, G., Baars, E., Giebe, E., Güntherschulze, A., Gumlich, E., Jaeger, W., Kottler, F., Meissner, W., Michel, G., u a. (2013). *Apparate und Messmethoden für Elektrizität und Magnetismus. Handbuch der Physik*, Band 16. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Bergmann et al., 2015] Bergmann, L., Lüders, K., und Oppen, G. (2015). *Bergmann-Schäfer kompakt - Lehrbuch der Experimentalphysik: Band 2, Relativistische Physik-von der Elektrizität zur Optik*. Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- [Bubert, 1948] Bubert, J. (1948). Ballistische Galvanometer mit magnetischem Nebenschluss. Eichung nach Bubert. *Technisches Messen*, 156-167:403–404.
- [Demtröder, 2003] Demtröder, W. (2003). *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*, Band 2. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Dolezalek, 1908] Dolezalek, F. (1908). Über Binantenelektrometer für Zeiger- und Spiegelablesung. *Annalen der Physik*, 331(7):312–328.
- [Geiger und Scheel, 1927] Geiger, H. und Scheel, K. (1927). *Handbuch der Physik: Theorien der Elektrizität und Elektrostatik*, Band 12. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth.
- [Gobrecht, 1971] Gobrecht, H. (1971). *Bergmann-Schäfer - Lehrbuch der Experimentalphysik.: Band 2, Elektrizität und Magnetismus*. Berlin, New York: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- [Halliday et al., 2017] Halliday, D., Resnick, R., und Walker, J. (2017). *Halliday Physik (Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage)*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [Jaeger, 1922] Jaeger, W. (1922). *Elektrische Messtechnik: Theorie und Praxis der elektrischen und magnetischen Messungen*, Band 2. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Kohlrausch, 1956] Kohlrausch, F. (1956). *Praktische Physik. Zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik*, Band 2. Stuttgart: B.G. Teubner.
- [Meyer und Moerder, 1957] Meyer, E. und Moerder, C. (1957). *Spiegelgalvanometer und Lichtzeigerinstrumente, 2.Auflage*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.

- [Palm, 1942] Palm, A. (1942). *Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen*, Band 2. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Roth und Stahl, 2018] Roth, S. und Stahl, A. (2018). Ströme. In *Elektrizität und Magnetismus*, Seiten 167–248. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Sack, 1896] Sack, H. (1896). Über Spiegelgalvanometer mit feststehendem Magnetsystem und beweglicher Spule und eine diesbezügliche Konstruktion von Siemens & Halske. *Elektrotechnische Zeitschrift*.
- [Schlosser und Winterling, 1960] Schlosser, E.-G. und Winterling, K. H. (1960). *Galvanometer*. Karlsruhe: Braun.
- [Simonyi, 2001] Simonyi, K. (2001). *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*, 3.Auflage. Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- [Weiler, 1905] Weiler, W. (1905). *Physikbuch. Ein Lehrbuch der Physik für den Schulunterricht und zur Selbstbelehrung. Elektrizität und Magnetismus*, Band 2. München: Schreiber.
- [Werner, 1928] Werner, O. (1928). *Empfindliche Galvanometer für Gleich- und Wechselstrom*. Berlin, Leipzig: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.