

Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 2
Gruppe 2 - Elektrik

2.8 Fieldplotter

Stichwörter: Maxwell-Gleichung, elektrisches Feld, elektrisches Potential, Äquipotentiallinien, graphische Ableitung, Kompensationsmethode zur Spannungsmessung, Kondensator, Zylinderkondensator, Leiter, Isolator

1 Einleitung

Dieser Versuch befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen einer gegebenen Ladungsdichte ρ und dem daraus resultierenden elektrischen Feld \vec{E} , wie er aus der ersten Maxwell-Gleichung

$$\operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

hervorgeht. Der Operator *div* steht in diesem Fall für die Divergenz von \vec{E} , ϵ_0 ist die elektrische Feldkonstante. Diese Differentialgleichung lässt sich allerdings nur für relativ einfache Ladungsverteilungen geschlossen und in Spezialfällen näherungsweise lösen. Kompliziertere Anordnungen können daher oft nur noch numerisch berechnet werden. Einfacher können die elektrischen Felder solcher Ladungsverteilungen experimentell bestimmt werden. Dabei werden sie nicht im Vakuum, sondern in Medien untersucht. Dies werden Sie in diesem Versuch nachvollziehen.

Lesen Sie die am Ende angegebene Literatur und bearbeiten Sie folgende Aufgaben zur Vorbereitung:

1. Erklären Sie, welcher Zusammenhang zwischen einem elektrischen Feld und dem zugehörigen Potential besteht.
2. Wie verhalten sich elektrisches Feld und Potential an Oberflächen von Isolator- und Metallflächen?
3. Bestimmen Sie das elektrische Feld und die Potentialverteilung eines geladenen Plattenkondensators analytisch.

2 Messapparatur

Der Messaufbau besteht aus drei wesentlichen Elementen. Das erste ist ein mit Kohlenstoff imprägniertes Papier, das im weiteren als Widerstandspapier bezeichnet wird. Das Papier stellt das leitende Medium zwischen den Elektroden dar. Das zweite Element ist eine leitfähige Tinte, die aus einem Stift aufgetragen wird. Die Tinte enthält je nach Stift in Lösungsmittel gelöste Silber- oder Nickelpartikel. Beim Trocknen der Tinte verflüchtigt sich das Lösungsmittel, die Metallpartikel setzen sich aufeinander ab und formen eine leitende Linie (Elektrode). Das dritte Element ist eine (Poggendorfsche-) Kompensationsschaltung (Gerthsen Physik Kap. 7.3). Durch das Anzeigeelement fließt genau dann kein Strom, wenn an den Punkten 1 und 2 gleiches Potenzial herrscht (siehe Abb. 2). Der Abgleich wird durch Verstellen des Potenziometers hergestellt. Da die Potenzialmessung stromlos erfolgt, ergibt sich im Gegensatz zur Messung mit einem üblichen Voltmeter kein Messfehler durch Belastung mit dem endlichen Innenwiderstand.

Weil das Widerstandspapier nur einen endlichen Widerstand hat, muss ein Strom fließen, damit die Potentialdifferenzen erzeugt werden können. Dieser Strom wird von den Elektroden geliefert, wodurch ein Potentialabfall entlang der Elektroden entsteht. Durch den großen Widerstandsunterschied zwischen der leitfähigen

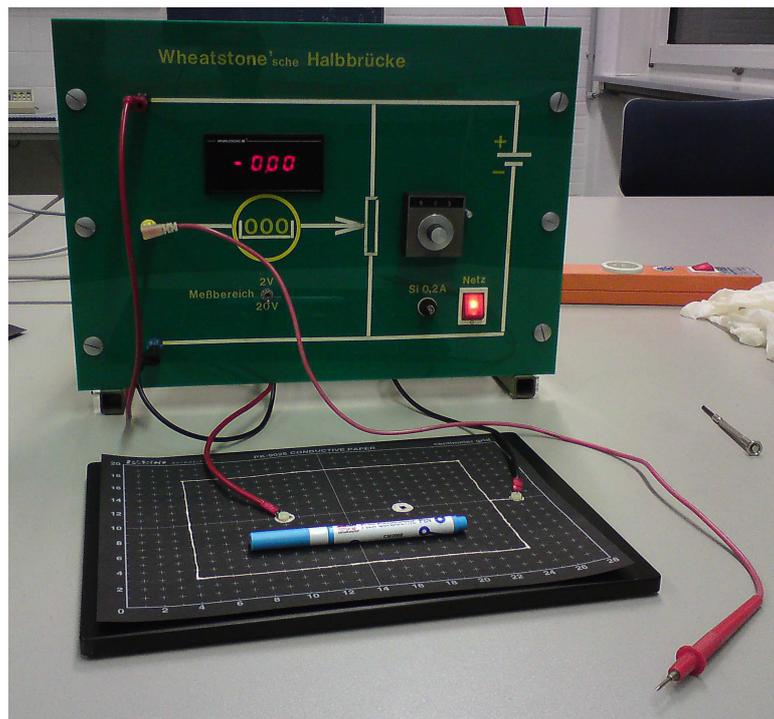


Abbildung 1: Der Versuchsaufbau

Tinte und dem Widerstandspapier ist der Potentialabfall geringer als 1%. Daher wird dieser an den Elektroden für den weiteren Verlauf des Versuches vernachlässigt.

2.1 Elektroden aufzeichnen

Wichtig! Ziehen Sie vor dem Zeichnen Einmalhandschuhe an, da die Lösungsmittel bei Kontakt mit der Haut und den Augen reizend und austrocknend wirken. Beachten Sie auch die folgenden hygienischen Maßnahmen: Waschen Sie nach dem Umgang mit chemischen Produkten und am Ende des Praktikumsversuchs ebenso wie vor dem Essen, Rauchen und einem Toilettenbesuch gründlich Hände, Unterarme und Gesicht.

Dies ist der schwierigste und wichtigste Teil des Experiments, die folgenden Schritte sollten deshalb so gut wie möglich durchgeführt werden:

- Platzieren Sie das leitfähige Papier mit der bedruckten Seite nach oben auf einer harten, ebenen Oberfläche. Das Korkbrett eignet sich nicht als Zeichenunterlage!
- Damit sich die Partikel in der Tinte wieder gleichmäßig im Lösungsmittel verteilen, muss der Stift (mit geschlossener Kappe) etwa 10-12 Sekunden gut durchgeschüttelt werden.
- Die Kappe des Stifts entfernen. Beim Zeichnen die Spitze hineindrücken und währenddessen den Füllkörper zusammendrücken, damit die Metalltinte auf das Widerstandspapier aufgetragen werden kann. Zieht man den Stift langsam über das Papier entsteht eine dünne, durchgängige Linie. Die Zeichengeschwindigkeit und (Un-)Gleichmäßigkeit des Drucks bestimmen die Linienbreite.
- Ist die Linie zu dünn, undurchgängig oder anderweitig ungenügend, kann über die Linie nachgezeichnet werden. Eine durchgängige, gleichmäßig gezogene Linie ist wichtig für gute Messergebnisse!

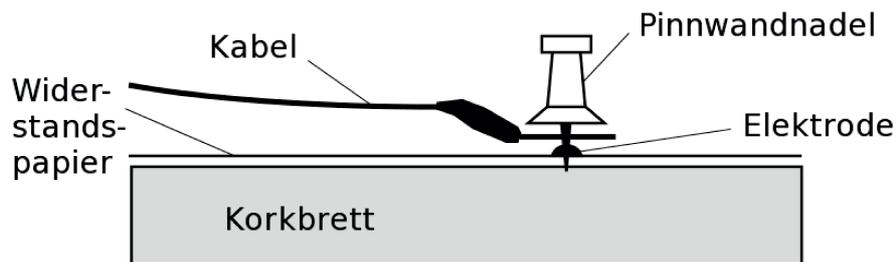


Abbildung 2

- Zum Zeichnen von Kreisen kann die vorhandene Plastikschablone verwendet werden. Entweder wird die Kreislinie direkt mit dem Stift gezogen oder aber mit einem Bleistift vorgezeichnet und mit dem Stift nachgezogen. Größere Kreise können mit einem Zirkel vorgezeichnet werden.

Die Linie trocknet bei Raumtemperatur innerhalb von 3-5 Minuten an. Allerdings wird die maximale Leitfähigkeit erst nach 20 Minuten Trockenzeit erreicht. Für ideale Ergebnisse sollte dies bei der Durchführung des Versuchs eingeplant werden.

Es hat sich als nützlich herausgestellt, dass die Anschlusskabel zur Kompensationschaltung (Abb. 2) nur die Elektroden, nicht aber das leitfähige Widerstandspapier berühren. Berücksichtigen Sie dies beim Zeichnen der Elektroden.

2.2 Anschließen der Elektroden

Um die Elektroden mit der Spannungsquelle zu verbinden, wird das Widerstandspapier zunächst mit Pinnwandnadeln auf dem Korkbrett fixiert. Mit weiteren Pinnwandnadeln wird an jede Elektrode ein Kabel angebracht (vgl. Abb. 2). Das andere Ende des Kabels wird mit der Spannungsversorgung verbunden. Vergewissern Sie sich im nächsten Schritt, dass an den Elektroden durchgängig das gleiche Potential anliegt. Falls dies nicht der Fall ist, zeichnen Sie die Elektrode nach, da Sie andernfalls Potentialverteilungen ausmessen werden, die nichts mit den von Ihnen aufgezeichneten Elektroden zu tun haben.

2.3 Messung

Die Messung der Äquipotentiallinien wird mit einer Kompensationsschaltung durchgeführt. Um eine Äquipotentiallinie aufzunehmen, wird ein Potential über das Potentiometer eingestellt und mit einer Sonde (der Prüfspitze eines Multimeters) auf dem Papier gesucht. Die Äquipotentiallinie ist genau dann gefunden, wenn durch das Messgerät kein Strom mehr fließt. Dieser Punkt wird auf dem Widerstandspapier markiert. Ermitteln und zeichnen Sie die Äquipotentiallinien und Feldlinien stets bis zur Schnittkante des Widerstandspapiers.

Hinweise: Es empfiehlt sich zunächst das Potentiometer in gleichen Potentialschritten zu verstellen. Werden etwa zehn Äquipotentiallinien aufgenommen, so sollte das Potential jeweils um ein Zehntel der 5 V Versorgungsspannung mit Hilfe des Potentiometer weitergestellt werden. Um weitere Bereiche auf dem Widerstandspapier zu untersuchen, stellt man dann Zwischenwerte des Potentials ein.

3 Aufgaben

3.1 Zylinderkondensator, unterschiedliche Ladungen, gleiche Ladung

Wählen Sie **eine** der drei Anordnungen aus Abbildung 3 aus. Messen Sie die Äquipotentiallinien, bestimmen Sie aus den gemessenen Äquipotentiallinien den Betrag des Elektrisches Feldes entlang der Symmetrielinie und tragen Sie das Ergebnis auf Millimeterpapier ein. Erklären Sie die Resultate.

HINWEIS: Das Elektrische Feld ist die Ableitung des elektrischen Potentials. Da wir nur diskrete Werte haben, können wir das Elektrische Feld wie folgt definieren:

$$\left| \vec{E}_i(r_i < r < r_{i+1}) \right| = \left| \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{r_{i+1} - r_i} \right| \quad (2)$$

wo r_i der Abstand zwischen einem Referenzpunkt und dem elektrischen Potential ϕ_i ist und \vec{E}_i ist das durchschnittliche elektrische Feld zwischen $r_i < r < r_{i+1}$.

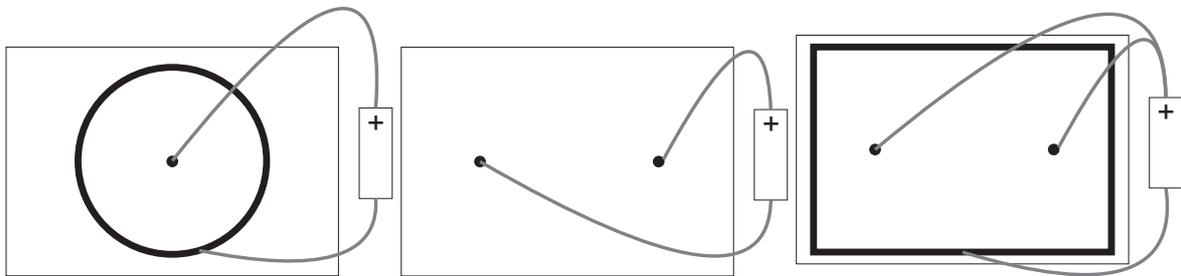


Abbildung 3: Prinzipzeichnungen der Elektroden für Aufgabe 3.1

3.2 Plattenkondensator

Zunächst wird ein Plattenkondensator aufgezeichnet und dessen Äquipotential- und Feldlinien oberhalb der Symmetrieachse aufgenommen. Zeichnen Sie danach eine kreisförmige schwebende Elektrode **oder** schneiden Sie einen Isolator zwischen den Platten und nehmen Sie die Äquipotential- und Feldlinien unterhalb der Symmetrieachse auf (Abbildung 4).

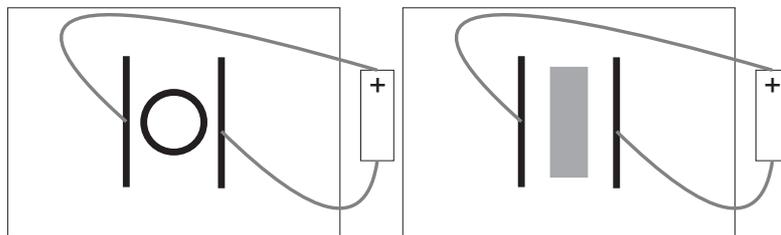


Abbildung 4: Prinzipzeichnungen der Elektroden für die Aufgabe 3.2

1. Wie sieht das Feld innerhalb und außerhalb des Plattenkondensators aus?
2. Wie beeinflusst das Verhältnis der Plattenlänge zum Abstand zwischen den Platten den ausfransenden Effekt am Rand der Platten?

3. Welches Design der Platten könnte helfen den ausfransenden Effekt zu verringern?
4. Welches Potential und Elektrisches Feld herrschen innerhalb der kreisförmigen Elektrode/Isolators?

3.3 Modell einer Elektronenlinse und eines Feldemission-Mikroskopes

Zeichnen Sie das Modell der Elektronenlinse **oder** des Feldemission-Mikroskops und bestimmen Sie dessen Äquipotential- und Feldlinien. Erklären Sie die Ergebnisse und die Hypotetische Bewegung der Elektronen in dem gezeichneten elektrischen Feld.

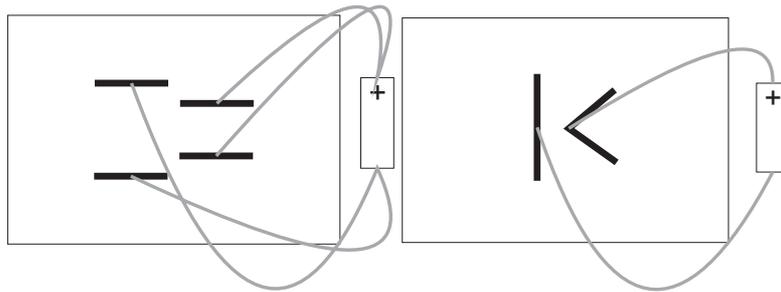


Abbildung 5: Aufgabe 3.3: links: Elektronenlinse, rechts: Feldemission-Mikroskop

Literatur:

Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik*. Kap. 1.1, 1.2 und 1.3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage (2015).

Meschede: *Gerthsen Physik*, Kap.7.1, 7.2 und 7.3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 25. Auflage (2015).