

5.3. Elektrolytischer Trog

Ziel

Der elektrolytische Trog dient der Veranschaulichung elektrischer Felder. Sie sollen im Laufe des Versuchs Äquipotenziallinien für verschiedene Elektrodenanordnungen bestimmen und aus diesen den Verlauf der elektrischen Feldlinien ableiten. Die experimentelle Beschränkung auf zwei Dimensionen erleichtert dabei sowohl die Durchführung als auch das Verständnis.

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Was ist ein elektrolytischer Trog?
 - Was versteht man unter dem elektrischen Potenzial, der elektrischen Spannung und der elektrischen Feldstärke?
 - Was sind Äquipotenziallinien?
 - Welche Kraft wirkt in einem elektrischen Feld auf eine Ladung?
 - Wieso bedient man sich in diesem Versuch der stromlosen Messung?
 - Was versteht man unter einem „Durchgriff“?
- für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):**
 - Wieso laufen Blitzableiter möglichst spitz zu?
 - Wieso besitzt eine Hochspannungsleitung oft Doppel-, Dreifach- oder sogar Vierfachleiter?

Zubehör

- Kunststoffwanne mit Anschlussbuchsenleiste, bis etwa zur halben Höhe mit Leitungswasser gefüllt,
- diverse Elektrodenanordnungen zum Einlegen in die Wanne,
- Netzgerät mit mehreren teils variablen Wechselspannungsausgängen und in das Netzgerät integrierter Transistormessbrückenschaltung mit Nullinstrument,¹

¹Das stilisierte Schaltbild auf der Frontplatte des Netzgerätes kann aus verschiedenen Gründen etwas verwirrend sein:

- Die Drehknöpfe beziehen sich jeweils auf das nächstliegende Potentiometer.
- Das Nullinstrument schlägt nur nach einer Seite aus, weil in die Messbrückenschaltung ein Gleichrichter integriert ist.

- Mechanik zur gleichzeitigen Bewegung einer Elektrode im Trog und eines Zeichenstiftes auf einem Blatt Papier; der Zeichenstift kann über einen Drahtauslöser auf das Papier gedrückt werden, um Punkte zu markieren.

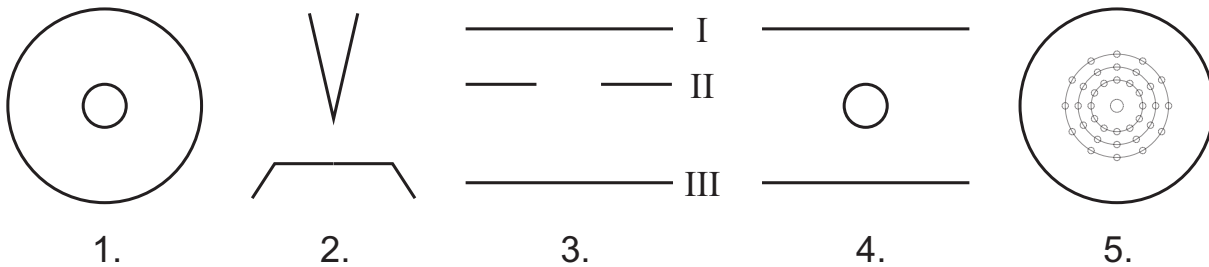


Abbildung 5.3.1.: Elektrodenanordnungen, für die im elektrolytischen Trog die Äquipotenziallinien und Feldlinien bestimmt werden sollen.

Grundlagen

Siehe z. B. [Wes74], sowie Standardlehrbücher unter den oben aufgeführten Stichwörtern.

Versuchsdurchführung

Untersuchen Sie in Absprache mit der Betreuerin/dem Betreuer mindestens die erste und weitere drei der folgenden Anordnungen (siehe auch Abbildung 5.3.1):

1. zwei koaxiale zylinderförmige Elektroden,
2. eine Spitze gegenüber einer ebenen Elektrode,
3. Dreielektrodensystem (zwei ebene Elektroden I und III mit einer dazwischenliegenden Elektrode II, die eine „Lücke“ aufweist) mit dem Potenzial der mittleren Elektrode II außerhalb des Potenzialgefälles zwischen den Elektroden I und III,
4. ein kreisrunder Leiter (nicht angeschlossen) im homogenen elektrischen Feld zwischen zwei ebenen Elektroden,
5. eine umsteckbare Anordnung von zylindrischen Elektroden im Zentrum einer großen Ringelektrode.

Anhand dieser Anordnung soll untersucht werden, wie das elektrische Feld um die „Drähte“ einer Hochspannungsleitung aussieht. Messen Sie mehrere Kombinationen, z. B. zwei, drei oder vier der dünnen Zylinder symmetrisch verteilt um den Mittelpunkt.

- Die Wechselspannung von nominell 10 V bzw. 20 V hat nicht genau diesen Wert. Das ist aber nicht wichtig, solange nur der Verlauf der Äquipotenziallinien und Feldlinien gemessen werden soll. Dabei kommt es nicht auf absolute, sondern nur auf relative Potenzialänderungen an.

Prinzipielles Messverfahren:

6. Wählen Sie am Netzgerät ein Potenzial, zu dem Sie die zugehörige Äquipotentialfläche bestimmen wollen, und legen Sie dieses an die verschiebbare Elektrode.²
7. Verschieben Sie die bewegliche Elektrode, bis das Nullinstrument der Messbrücke keinen Ausschlag (bzw. einen minimalen Ausschlag) zeigt.
8. Markieren Sie den gefundenen Punkt.
9. Wiederholen Sie das Verfahren mit anderen Punkten und anderen Potenzialen, bis Sie genügend viele Punkte erfasst haben, um später Äquipotenziallinien und Feldlinien so einzeichnen zu können, dass sich eine klares Bild des Feldverlaufs ergibt.

Hinweise:

- Vergessen Sie dabei nicht, die Punkte so zu beschriften, dass Sie später die Potenzialwerte wieder zuordnen können.
- Messen Sie nicht mehr Punkte als nötig, sondern nutzen Sie die jeweilige Symmetrie der Elektrodenanordnung aus!

Auswertung

1. Zeichnen Sie ausgehend von den markierten Punkten Äquipotenziallinien und Feldlinien für alle Anordnungen ein.
2. Zeichnen Sie für die koaxiale Elektrodenanordnung ein halblogarithmisches Diagramm des Potenzials als Funktion des Radius (Abstand vom Mittelpunkt der Anordnung). Der Radius soll auf der logarithmischen Achse nach rechts, das Potenzial auf der linearen Achse nach oben aufgetragen werden.³

Hinweis: Zur Abstandsabhängigkeit des elektrischen Potenzials in zwei und drei Dimensionen siehe auch Aufgabenteil.

²Wichtiger Hinweis: Da das Netzgerät Wechselspannung liefert, wird genaugenommen kein bestimmtes Potenzial angelegt, denn dieses schwankt ja sinusförmig mit einer bestimmten Amplitude um den Wert Null. Auf den Verlauf der Äquipotenzialflächen hat dies aber keinen Einfluss. Das Potentiometer, mit dem „das Vergleichspotential“ eingestellt wird, ist ein sog. Zehngangpotentiometer, zwischen seinen beiden Endstellungen liegen also zehn volle Umdrehungen des Knopfes. Was man wirklich einstellt, ist also sozusagen ein gewisser Bruchteil der gesamten Potentialdifferenz. Sie können die Äquipotenziallinien auch gerne so beschriften, also z. B. als „10 %, 20 %, 30 %, ...“ oder „ $0.1 \cdot U_0$, $0.2 \cdot U_0$, $0.3 \cdot U_0$, ...“.

³Sie können hierzu entweder

- a) halblogarithmisches Diagrammpapier benutzen,
- b) jeweils den Logarithmus des Radius berechnen und diese Werte auf einem linearen Papier auftragen oder
- c) die Darstellung einem Computerprogramm überlassen.

Fragen und Aufgaben

1. Warum benutzt man bei Messungen am elektrolytischen Trog zweckmäßigerweise Wechselspannung und nicht Gleichspannung?
2. Beweisen Sie, dass bei der coaxialen Elektrodenanordnung die folgende Beziehung gilt:⁴

$$E(r) = \text{const.}/r \quad (5.3.1)$$

mit

E = elektrische Feldstärke,

r = Abstand vom Mittelpunkt der Elektrodenanordnung.

Lösungshinweis: Trägt ein Zylinder der Länge a die Ladung Q , hat die sog. „Verschiebungsdichte“ D im Abstand r von der Zylinderachse den Wert

$$D(r) = \frac{Q}{2\pi \cdot r \cdot a} \quad (5.3.2)$$

Zwischen der Verschiebungsdichte und der elektrischen Feldstärke besteht wiederum die Beziehung

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (5.3.3)$$

3. Unter welchen Voraussetzungen gibt es Feldlinien, die beim Dreielektrodensystem (Potentiale gemäß Punkt 3 der Versuchsdurchführung) direkt von der einen äußeren Elektrode zur anderen äußeren Elektrode verlaufen („Durchgriff“, vgl. hierzu [Wes74]⁵)?
4. **für alle Physik-Studiengänge (B.Sc. und B.Ed.):** Welche Veränderung der Äquipotenziallinien erwarten Sie, wenn Sie bei der Elektrodenanordnung aus Punkt 4 der Versuchsdurchführung an den kreisrunden Leiter ein Potenzial zwischen den beiden Potenzialen der äußeren Elektroden anlegen?

Welchem Stromlinienverlauf aus der Strömungsmechanik entsprechen diese Äquipotenziallinien?

Ergänzende Informationen

Bedeutung in der Biologie

Die elektrischen Potenzialverläufe in Wasser sind z. B. für die „Elektrofische“ wie Zitterwels und Zitterrochen von großer Bedeutung.

⁴Beachten Sie den Unterschied zwischen diesem für die zweidimensionale Anordnung gefundenen Ergebnis ($E \sim \frac{1}{r}$) und der $\frac{1}{r^2}$ -Abstandsabhängigkeit der elektrischen Feldstärke im Coulomb-Feld einer Punktladung im dreidimensionalen Raum!

⁵Die relevanten Seiten sind auf dem AP-Server verfügbar unter dem Dateinamen „westphal1974...“

Historische Bedeutung

Noch vor einigen Jahren (siehe z. B. [GGG78] S. 890) war der Modellversuch im elektrolytischen Trog eine von wenigen Möglichkeiten, sich Kenntnis über den Potenzialverlauf in komplizierteren Elektrodenanordnungen zu verschaffen. Seit die Leistungsfähigkeit der Computer stark zugenommen hat, ist diese Anwendung nicht mehr von Bedeutung. Das Modell ist aber weiterhin zur Veranschaulichung elektrischer Potenziale sehr gut geeignet. Wer die Äquipotentiallinien einmal selbst numerisch berechnen möchte, kann dafür z. B. das sehr leistungsfähige Programm „FlexPDE“ einsetzen [fle06]. Studenten erhalten eine kostenlose Lizenznummer für eine voll funktionstüchtige Version, bei der nur die Zahl der „Stützstellen“ begrenzt ist (Stand dieser Information: 16.11.2006).

Gekrümmte Leiter und elektrisches Feld

Wie insbesondere bei der Elektrodenanordnung mit der Spitze vor der Platte aber auch bei den konzentrischen Ringen deutlich wird, ist die Stärke des elektrischen Feldes vom Krümmungsradius des Leiters abhängig (höhere Dichte der Feldlinien an der stärker gekrümmten Oberfläche – vgl. auch Aufgabe 2). Dieser Effekt wird in der Technik oft verwendet. Hier einige Beispiele:

- Geheizte Kathoden zur Emission von Elektronen (in braunsche Röhren, wie sie z. B. in Fernsehgeräten, Monitoren und Oszilloskopen alter Bauart verwendet werden, aber auch in Elektronenmikroskopen usw.) werden möglichst spitz geformt, um die Feldstärke zu erhöhen und die Emssion dadurch zu erleichtern.
- Blitzableiter werden möglichst spitz ausgeführt, um die Feldstärke zu erhöhen und damit den Einschlag an dieser Stelle bevorzugt stattfinden zu lassen. Andere Leiter, die bei hohen Spannungen verwendet werden, sind hingegen meist „kugelig“ gestaltet, um das Abfließen von Ladungen zu vermeiden (z. B. die große Kugel oben auf einem Bandgenerator).
- Die Drähte von Hochspannungsleitungen⁶ werden oft als Doppel-, Dreifach- oder sogar Vierfachleiter ausgeführt. Dabei hängen mehrere leitend miteinander verbundene Drähte an einem gemeinsamen Isolator und werden über Abstandshalter gegeneinander fixiert.⁷ Nach außen hin wirkt die Anordnung ähnlich wie ein dicker Draht mit viel geringerem Krümmungsradius, so dass die Feldstärke und damit auch die Verluste durch „Leckströme“ über die Luft (insbesondere bei feuchter Witterung) stark abnehmen.

⁶In Deutschland werden diese Leitungen im Drehstromnetz mit Spannungen bis maximal 400 kV, in anderen Ländern auch mit bis zu 800 kV betrieben.

⁷Man sieht das bei vielen großen Überlandleitungen, es fällt einem allerdings normalerweise erst auf, wenn man gezielt darauf achtet...



Abbildung 5.3.2.: Hochspannungsleitungen mit zusammengesetzten „Drähten“, bei denen mehrere leitend miteinander verbundene Einzeldrähte über Abstandhalter einen großen „Draht“ bilden, um die Feldstärke zu reduzieren.

Literaturhinweise

Der Versuch ist sehr ausführlich in [Wes74] beschrieben.

Software zur Berechnung der Äquipotentialflächen über die numerische Lösung von Differentialgleichungen: [fle06].

Literaturverzeichnis

- [fle06] *FlexPDE*, <http://www.pdesolutions.com/>, November 2006.
- [GGG78] GOBRECHT, HEINRICH, JENS H. GOBRECHT und KLAUS H. GOBRECHT (Herausgeber): *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band III: Optik. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage, 1978.
- [Wes74] WESTPHAL, WILHELM H.: *Physikalisches Praktikum*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 13. Auflage, 1974. 1. unveränderter Nachdruck der Auflage von 1971.