

Der elektrolytische Trog (E3)

Ziel des Versuches

Es soll ein Verständnis der Begriffe *elektrisches Feld* und *elektrisches Potential* erlangt werden. Es wird ein Verfahren zur Vermessung elektrischer Felder und Potentiale kennengelernt.

Theoretischer Hintergrund

Der Verlauf des von einem System geladener Elektroden erzeugten elektrischen Felds innerhalb eines homogenen Mediums ist unabhängig von dem umgebenden Medium. Es ist also unbedeutend, ob sich das System im Vakuum, in Luft oder in einem hochohmigen Elektrolyten befindet, da darin – abgesehen von den Elektroden – keine Quellen und Senken des Felds auftreten. Man kann den Verlauf solcher Felder, z. B. in Elektronenröhren und in der Elektronenoptik (elektrische Linsen), dadurch bestimmen, dass das zu untersuchende Elektrodensystem in entsprechender Größe kopiert und in einen Elektrolyten gebracht wird. Dann werden an die Elektroden Spannungen angelegt, die den Verhältnissen des zu simulierenden Systems entsprechen, und das Potential wird in einzelnen Punkten des Felds vermessen. Ein solcher Versuch wird hier durchgeführt.

Auf eine Ladung q wirkt im elektrischen Feld \vec{E} die Kraft $\vec{F} = q \vec{E}$. Die Richtung des elektrischen Feldes entspricht der Richtung der Kraft, die auf eine positive Ladung wirkt und wird zeichnerisch durch Pfeile (Feldlinien genannt) veranschaulicht. Feldlinien beginnen stets bei positiven Ladungen (Quelle) und enden in negativen Ladungen (Senke). Ist nur eine Sorte von Ladungen vorhanden, werden die Feldlinien nach ∞ verlängert. Der Betrag des elektrischen Feldes ist proportional zur Dichte der Feldlinien.

Analog zu anderen Kraftfeldern wie z. B. dem Schwerfeld der Erde lässt sich auch in der Elektrostatik ein Potential φ einführen, aus dem die lokal wirkenden Kräfte durch Gradientenbildung berechnet werden können. Das elektrostatische Potential lässt sich durch:

$$-\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}) = \vec{E}(\vec{r}) \quad (1)$$

berechnen. Linien (bzw. Flächen) gleichen Potentials heißen Äquipotentiallinien (bzw. -flächen). Aus der Definition des Potentials folgt, dass sie stets senkrecht zu den Feldlinien stehen. Sie bilden außerdem stets geschlossene Linien bzw. Flächen. Das Potential selbst kann nicht direkt gemessen werden, sondern nur die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten. Diese heißt die elektrische Spannung:

$$U_{12} = \varphi(\vec{r}_2) - \varphi(\vec{r}_1) \quad . \quad (2)$$

Um eine Ladung q in einem elektrischen Feld von einem durch den Ortsvektor \vec{r}_1 festgelegten Punkt zu einem durch den Ortsvektor \vec{r}_2 festgelegten Punkt zu verschieben, muss die Arbeit

$$W_{12} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}(\vec{s}) d\vec{s} = -q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{\nabla} \varphi(\vec{s}) d\vec{s} = -q (\varphi(\vec{r}_2) - \varphi(\vec{r}_1)) = -q U_{12} \quad (3)$$

verrichtet werden. Liegen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 auf einer Äquipotentialfläche, so ist die Spannung zwischen beiden Punkten Null und für die Bewegung einer Ladung von \vec{r}_1 zu \vec{r}_2 muss keine Energie aufgewendet werden.

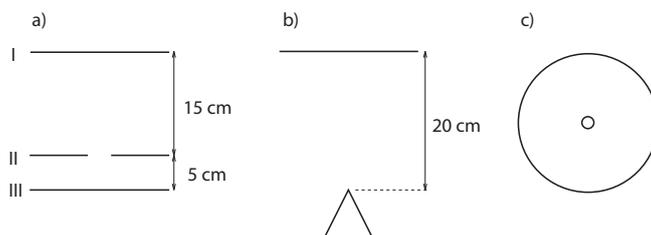


Abbildung 1: Elektrodensysteme zur Bestimmung der Potentiallinien im Trog (Beispiele).

Versuchsaufbau und -durchführung

Das Elektrodensystem wird in einer Entwicklerschale (Trog) aufgebaut, in die eine Platte eingelegt ist, welche eine gleichmäßige Tiefe des Elektrolyten gewährleistet. Die Elektroden müssen möglichst tief in die Elektrolytschicht eingetaucht und vertikal ausgerichtet sein, damit das elektrische Feld unabhängig von der z -Richtung (Vertikale) ist. Als Elektrolyt wird Leitungswasser verwendet. Mit einem speziellen Netzgerät¹ werden Spannungen an die Elektroden angelegt. Die Potentiallinien werden mit einer Drahtsonde aufgesucht, die sowohl in x - als auch in y -Richtung über dem Trog verschoben werden kann. Die Sonde ist über ein Gestell starr mit einer Stifthalterung verbunden, die eine 1:1-Übertragung der Sondenposition auf ein neben den Trog gelegtes Papier ermöglicht. Das Aufsuchen der Potentiallinien erfolgt, indem die Sonde solange verschoben wird, bis das Multimeter den entsprechenden Spannungswert anzeigt.

Die Potentiallinien sollen für verschiedene Elektrodensysteme (siehe Abb. 1) gemessen werden z. B.:

1. ein Dreielektrodensystem mit Spaltblende,
2. ein System aus einer Kante und einer ebenen Elektrode und
3. ein Elektrodensystem aus zwei koaxialen Zylindern.

Vor Messbeginn ist jeweils die Lage der Elektroden auf das Papier zu übertragen, indem die Elektroden bei *abgezogenen Kabeln* mit der Sonde abgefahren und auf diese Weise aufgezeichnet werden.

Bei der eigentlichen Messung kann man die Symmetrie der Elektrodensysteme nutzen, um die Anzahl der Messpunkte zu verringern. Auf diese

¹ Überlegen Sie sich warum eine Wechselspannung verwendet wird.

Weise braucht man die Potentiallinien nur auf einer Seite der Anordnung zu messen. Dabei sollten die Messungen nicht zu nahe an die Seitenwände herangeführt werden, da diese Wände aufgrund ihrer Ankopplung an das Erdpotential eventuell eine Störung des zu messenden Potentialverlaufes bewirken können. Wegen der geringen Leitfähigkeit des Behälters sollte diese Störung jedoch nicht allzu stark sein.

Bei der Aufnahme der Potentiale ist auf eine hinreichende Dichte der Messpunkte zu achten. Bei Potentiallinien mit geringer Krümmung mag ein Abstand von 2 - 3 cm genügen. In Bereichen eines stark inhomogenen Felds, in denen eine starke Krümmung der Äquipotentiallinien zu erwarten ist, sollte der Abstand auf 0,5 - 1 cm reduziert werden. Nehmen Sie die Messpunkte beim Dreielektrodensystem im Bereich des Spaltes und beim Kantensystem in der Nähe der Spitze besonders sorgfältig auf! Vervollständigen Sie generell bei allen experimentell aufgenommenen Potentialverläufen die Äquipotentiallinien, indem Sie *ausgleichende* Kurven durch die Messpunkte zeichnen und diese gegebenenfalls an der Symmetrieachse der Anordnung spiegeln. Zeichnen Sie zusätzlich die Feldlinienverläufe in die Bilder ein, wobei Sie einen Abstand der Feldlinien von 2 - 3 cm wählen sollten.

Aufgabenstellung

1. Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der Feld- und Potentiallinien für die in Abb. 2 angegebenen Konstellationen positiver und negativer Elektroden. Bedenken Sie dabei, dass innerhalb der Elektroden und auch auf deren Oberfläche das Potential konstant ist. Die Zeichnungen sind dem Protokoll beizulegen.

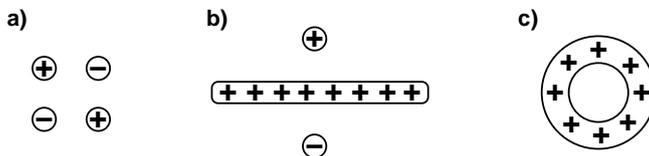


Abbildung 2: Elektrodenkonstellationen

2. Bestimmen Sie experimentell die Potentiallinien für ein Dreielektrodensystem mit Spaltblende (siehe Abb. 1a) für die Elektroden Spannungen: $U_I = 8 \text{ V}$, $U_{II} = 0 \text{ V}$, $U_{III} = 4 \text{ V}$. Dabei sind immer die Spannungen relativ zum Erdpotential gemeint. Bestimmen Sie jeweils die Äquipotentiallinien für 1, 1,5, 2, 3, 5, 7 V, und skizzieren Sie den Feldlinienverlauf wie oben angegeben. Zeichnen Sie die Potentiallinie ein, die den Übergang von der Linienform der 1,5 V-Linie zur Linienform der 2 V-Linie darstellt. Beschreiben Sie die Änderung der Feldstärke in diesem Bereich des Elektrodensystems (Spaltbereich).
3. Nehmen Sie die Potentiallinien für ein Elektrodensystem aus einer Kante (Dreieckelektrode) und einer ebenen Elektrode auf (Abb. 1b) (Vorschlag: Messen Sie die Linien für 1 V, 2 V, 3 V, 5 V und 7 V). Legen Sie dabei an die ebene Elektrode die Spannung 8 V und an die Kante 0 V an.
4. Berechnen Sie mit Gl. (1) aus den experimentell bestimmten Potentiallinien die Feldstärke an der Elektrodenspitze in drei verschiedenen Richtungen: (1) senkrecht zur Flächenelektrode, (2) im Winkel von 45° und

(3) im Winkel von 90° dazu. Dabei ergibt sich der Betrag des Gradienten in Gl. (1) aus der Division der Potentialänderung durch den Abstand der Potentiallinien. Berechnen Sie außerdem die Feldstärken zwischen den 1 V- und 2 V- und zwischen den 2 V- und 3 V-Linien in den angegebenen Richtungen. Berechnen Sie zusätzlich die Feldstärke an der ebenen Seite der Spitzenelektrode. Vergleichen Sie die Werte und diskutieren Sie das Ergebnis.

5. Legen Sie bei einem Elektrodensystem aus zwei coaxialen Zylindern (Abb. 1c) an den inneren Zylinder 0 V und an den äußeren 8 V an. Zeigen Sie, dass die Potentiallinien hier konzentrische Kreise sind. Nehmen Sie für jeden Kreis mindestens acht Messpunkte auf und messen Sie die Kreise für 2 bis 7 V in 1 V-Schritten. Bestimmen Sie die Durchmesser der Elektroden. Ermitteln Sie die Radien r der Potentiallinien (bilden Sie dabei Mittelwerte aus den vier Messwerten) und zeigen Sie, dass der Betrag des elektrischen Feldes umgekehrt proportional zum Abstand von den Zylinderachsen ist ($E \sim 1/r$). Tragen Sie hierzu die Spannung U gegen $\log r$ auf. Aus $E \sim 1/r$ folgt $U = C_1 \log r + C_2$, wobei C_1 und C_2 Konstanten sind, die durch die Randbedingungen festgelegt werden. Sind r_1 und r_2 die Radien des inneren und äußeren Zylinders, lauten die Randbedingungen $U(r_1) = 0$ und $U(r_2) = U_0 = 8$ V. Ermitteln Sie daraus C_1 und C_2 und tragen Sie die entsprechend berechnete Gerade für $U = f(\log r)$ mit in das Diagramm ein. Diskutieren Sie das Ergebnis.
6. Messen Sie die Äquipotentiallinien (3, 3,5, 4, 4,5, 5 V) für zwei Punktelektroden (Abstand 15 cm), die auf 0 V und 8 V liegen. Diskutieren Sie den Verlauf der Äquipotential- und Feldlinien insbesondere im Randbereich.

Zusätzliche Aufgabe für Physik-VF/ZF

7. Messen Sie die Potentiallinien für 2, 4 und 6 V an einem Elektrodensystem, das aus zwei Flächenelektroden mit 0 V und 8 V (Abstand ca. 25 cm), und einer dazwischenliegende Zylinderelektrode (ohne Potential) besteht und diskutieren Sie das Ergebnis.