

Der Gradient ist der Vektor in Richtung der größten Steigung, somit zeigt $\vec{E}(\vec{r})$ in die Richtung des stärksten Potenzialgefälles. Stellt man sich das Potenzial als eine hügelige Landschaft vor, so sind die Höhenlinien gleich den Äquipotenziallinien und die Falllinien entsprechen den Feldlinien (s. Abb. 1.34, entnommen aus [15]). Der Gradient zeigt dann in Richtung des steilsten Anstieges und steht immer senkrecht auf den Äquipotenziallinien (bzw. Höhenlinien). In Abb. 1.35 (links) ist eine skalare Funktion $F(x, y)$ als Fläche

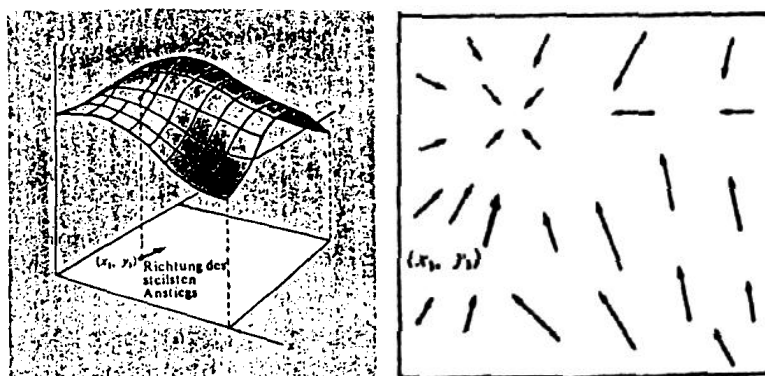


Abbildung 1.35: Veranschaulichung des Gradienten einer skalaren Funktion $f(x, y)$

dargestellt, Abb. 1.35 (rechts) zeigt die Darstellung des Vektorfeldes ∇f durch Pfeile: $\nabla f = \text{grad } f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}\right)$. In Abb. 1.23 auf Seite 33 wird das Gravitationsfeld mit dem elektrischen Feld verglichen (entnommen aus [3]).

1.7 Anwendung homogener elektrischer Felder

1.7.1 Der Dipol im homogenen Feld

Wir betrachten nun einen elektrische Dipol im homogenen Feld, dessen Ursprung in den Mittelpunkt von \vec{l} gelegt wird (vgl. Abschnitt 1.5.1, Seite 40). Das elektrische Feld wirkt mit entgegengesetzten gleich großen Kräften $\vec{F} = Q \vec{E}$ und $-\vec{F} = -Q \vec{E}$ auf die Ladungen des Dipols. Die resultierende Kraft ist daher null, d.h. der Dipol ändert seinen translatoischen Bewegungszustand im Feld nicht. Das Kräftepaar erzeugt jedoch ein Drehmoment $\vec{\tau}$ um die Mittelachse senkrecht zu der von \vec{p} und \vec{E} aufgespannten Ebene (s. Abb. 1.36, entnommen aus [15]). Es ist:

$$\tau = 2 F \frac{l}{2} \sin \alpha = F l \sin \alpha = Q E l \sin \alpha = P E \sin \alpha \quad (1.85)$$

$$\text{oder} \quad \boxed{\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} = Q \vec{l} \times \vec{E}.} \quad (1.86)$$

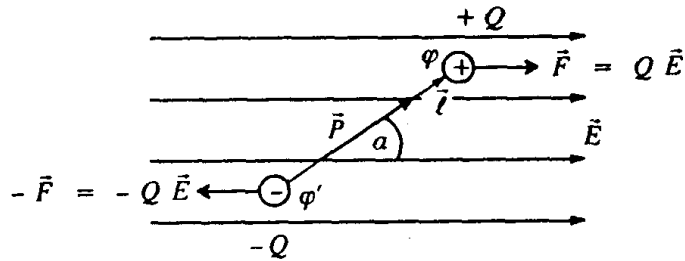


Abbildung 1.36: Dipolmoment

Versuch 1.19

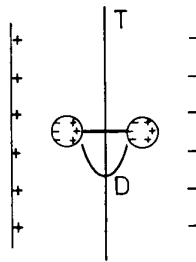


Abbildung 1.37: Dipol im homogenen Feld

Zwischen einem Plattenkondensator befinden sich als Dipol zwei graphitierte, starr miteinander verbundene Tischtennisbälle. Sie sind an einem Torsionsdraht aufgehängt und befinden sich parallel zu den Kondensatorplatten. Nun wird auf die Bälle unterschiedliche Ladung aufgebracht und ein homogenes Feld erzeugt. Der Dipol richtet sich nun senkrecht zu den Platten aus. Dreht man das Feld um, so dreht sich auch der Dipol (s. Abb. 1.37 aus [2]).

Ein freier Dipol wird also im Feld so gedreht, dass \vec{p} und \vec{E} parallel stehen. Dann wird das Drehmoment null.

Dipolanwendungen

1. Entstaubungsanlage:

Versuch 1.20

Wir lassen den Rauch einer Pfeife durch einen Metallzylinder treten, durch dessen Mittelachse ein Draht geführt ist. Erzeugt man nun mittels einer Spannung ein radiales, also inhomogenes Feld, so werden die Rauchpartikel polarisiert, d.h. sie bilden durch partikelinterne Influenz elektrische Dipole aus, und bewegen sich zum Zylinder bzw. zum Draht, wo sie sich ablagern (s. Abb. 1.38 aus [2]).

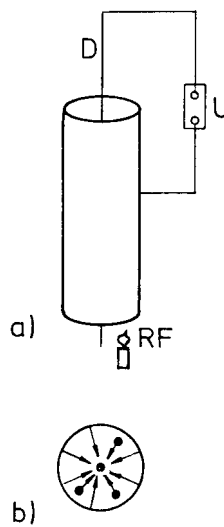


Abbildung 1.38: Entstaubungsanlage

2. Antennen: Dipole haben als Ultrakurzwellen-Antennen sehr große Bedeutung. Sie sind in der Mitte unterbrochen, wo sie beim Sender ihre Hochfrequenzenergie zugeführt bekommen, die sie abstrahlen. Die Ladungsverteilung wechselt im Rhythmus der Hochfrequenz. Sie nimmt z.B. von der Mitte über die Länge des Dipols nach den beiden Enden hin sinusförmig zu und hat zu einem bestimmten Zeitpunkt ihr Maximum. Sie ist dann in der Mitte null ($\lambda/2$ -Dipol). Beim Empfänger-Dipol wird von der unterbrochenen Mitte die empfangene Energie über eine Zweidrahtleitung dem Verstärker zugeführt. Die (horizontale oder vertikale) Lage des Sende-Dipols bestimmt die Richtung der Polarisation der Strahlung. Der empfangende Dipol muss für den optimalen Empfang die gleiche Lage wie der Sende-Dipol haben, also horizontal oder vertikal.
3. Velours Strukturen: Bringt man Textilhärchen in ein inhomogenes Feld, so entstehen

Dipole, die sich parallel ausrichten und im Feld bewegen. Lässt man sie auf eine mit einem Kleber versehene Unterlage treffen, so entsteht eine Velours-Struktur.

4. Spritzlackierung: Erzeugt man zwischen Spritzpistole und Spritzgut ein elektrisches Feld, so werden die einzelnen Lackteilchen polarisiert und folgen dem Feld. Auf diese Weise lassen sich feine Strukturen ohne Verluste lackieren.

1.7.2 Der Versuch von MILLIKAN zur Bestimmung der Elementarladung

An dieser Stelle soll nun der Versuch von R.A. MILLIKAN erklärt und gezeigt werden. Ein Plattenkondensator mit Plattenabstand $d = 6 \text{ mm}$ wird horizontal aufgestellt und durch eine Kunststoffkappe gegen äußere Einflüsse geschützt. In dieser Kappe befinden sich zwei kleine Löcher, durch die mittels eines Zerstäubers feine Öltröpfchen eingestäubt werden. Beim Einstäuben werden einige der Öltröpfchen durch Reibungselektrizität ne-

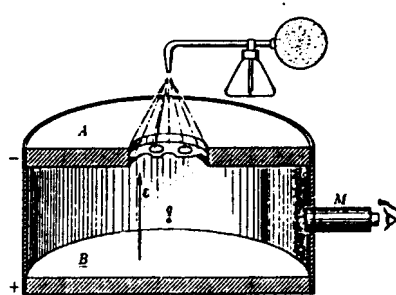


Abbildung 1.39: Millikan-Versuch im schematischen Aufbau

gativ aufgeladen. Die Bewegung, d.h. der Fall unter der Wirkung der Schwerkraft oder der Anstieg unter der Wirkung des elektrischen Feldes von einer Platte zur anderen, kann bei entsprechender Beleuchtung durch ein Mikroskop beobachtet werden. Die Geschwindigkeit wird durch Stoppen der Laufzeit gemessen, wobei eine Skala, die am Mikroskop befestigt ist, zur Streckenmessung zur Verfügung steht. Der schematische Aufbau ist in Abb. 1.39 dargestellt (entnommen aus [15]).

Im ersten Versuchsteil ist das Feld ausgeschaltet und die Öltröpfchen fallen unter der Wirkung der Schwerkraft mit einer konstanten Geschwindigkeit \vec{v}_1 . Diese kommt dadurch zustande, dass insgesamt keine Kraft wirkt, d.h. die nach oben zeigende Reibungskraft \vec{F}_R auf Grund des STOKESchen Gesetzes und der Auftrieb der Luft \vec{F}_A (wird zum Schluss berücksichtigt), sind der Gewichtskraft \vec{F}_G des Tröpfchens gleich (s. Abb 1.40, entnommen aus [15]). Für die wirkenden Kräfte ergibt sich somit bei Gleichgewicht:

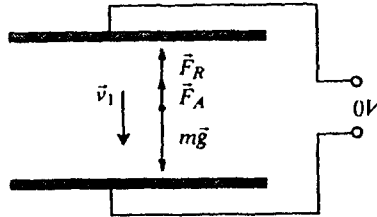


Abbildung 1.40: Wirkende Kräfte ohne E-Feld

$$\vec{F}_R \stackrel{!}{=} \vec{F}_G + \vec{F}_A = 6 \pi \eta r \vec{v}_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \vec{g}, \quad (1.87)$$

wobei r der Tröpfchenradius, ρ die Dichte mit $\rho = \rho_{\text{öl}} - \rho_{\text{Luft}}$ und η die Viskosität der Luft ist. Im zweiten Versuchsteil wird das elektrische Feld eingeschaltet. Zu den bereits

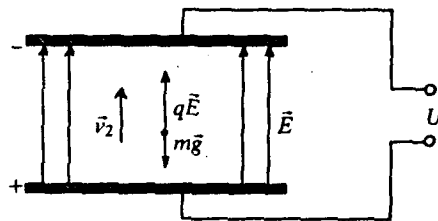


Abbildung 1.41: Wirkende Kräfte mit E-Feld

betrachteten Kräften kommt nun noch die elektrische Kraft $\vec{F}_{el} = q \vec{E}$ hinzu (s. Abb. 1.41, entnommen aus [15]):

$$\vec{F}_R = \vec{F}_G + \vec{F}_{el} - \vec{F}_A = 6 \pi \eta r \vec{v}_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \vec{g} + q \vec{E}. \quad (1.88)$$

Überwiegt hierbei die Kraft des elektrischen Feldes die Schwerkraft, so bewegt sich das Tröpfchen mit der Geschwindigkeit \vec{v}_2 nach oben. Aus den Gleichungen 1.87 und 1.88 folgt für die Bewegung des Tröpfchens

$$6 \pi \eta r (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = q \vec{E} \quad (1.89)$$

$$\Rightarrow q = (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \frac{6 \pi \eta r}{E} \quad (1.90)$$

Der Tröpfchenradius r lässt sich mit Gleichung 1.87 bestimmen.

$$r = 3 \sqrt{\frac{\eta \vec{v}_1}{2 \rho g}}. \quad (1.91)$$

Somit können wir allein durch Messen der Fall- und der Steiggeschwindigkeit die Ladung q bestimmen.

1.7.3 Die BRAUNsche Röhre

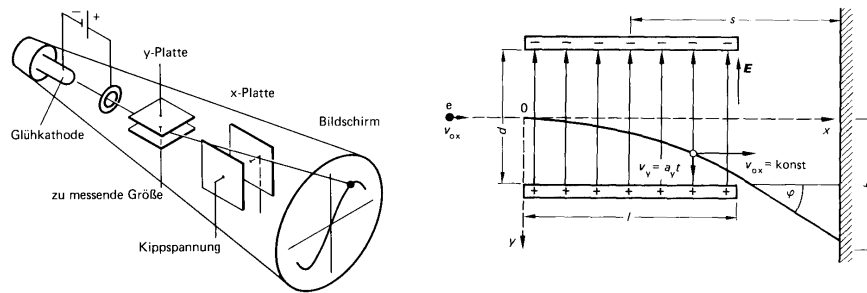


Abbildung 1.42: Elektronenröhre

Als weiteres Beispiel der Anwendung homogener Felder soll die BRAUNsche Röhre, benannt nach ihrem Erfinder F. BRAUN (1850-1918), genannt werden. Ihre Anwendung findet sie im **Kathodenstrahloszillograph**, wie er z. B. in der Vorlesung benutzt wird (s. Abb. 1.42, entnommen aus [3]). Als weiteres weit verbreitetes Beispiels ist der Fernseher zu nennen. In diesen Röhren werden Elektronen aus der Glühkathode ausgelöst und durch zwei um 90° versetzt angeordnete Ablenkcondensatoren in horizontaler und vertikaler Richtung abgelenkt. Die Elektronen treffen anschließend auf einen Fluoreszenzschirm, der am Auftreffpunkt leuchtet.

Versuch 1.21

In einer Elektronenablenkröhre werden die Elektronen durch das Auftreffen auf einem Fluoreszenzschirm sichtbar gemacht. Der Schirm ist parallel zum Elektronenstrahl ausgerichtet, so dass er als horizontaler Strich zu sehen ist. Wird nun senkrecht zu dem Strahl ein homogenes Feld erzeugt, so wird der Strahl abgelenkt, und zwar um so stärker, je stärker das elektrische Feld ist.