

Untersuchung der Ladungsverteilung auf der Oberfläche elektrischer Leiter

Versuchsziele

- Untersuchung der Ladungsverteilung auf der äußeren Oberfläche eines Faraday-Behchers und eines Kegelkonduktors in Abhängigkeit von der Krümmung der Oberfläche.
- Messung der Ladung auf der inneren Oberfläche eines Faraday-Behchers und eines Kegelkonduktors.

Grundlagen

In einem elektrischen Leiter sind überschüssige Ladungen frei verschiebbar. Die Ladungen sind daher im elektrostatischen Gleichgewicht ausschließlich auf der Oberfläche des Leiters angeordnet; das Innere des Leiters enthält keine freien Ladungen.

Genauer verteilen sich die Ladungen auf der Oberfläche des Leiters so, daß sie keinem elektrischen Feld bzw. keinem Potentialgefälle längs der Oberfläche ausgesetzt sind. Die elektrische Feldstärke ist überall senkrecht zur Oberfläche gerichtet und alle Orte auf der Oberfläche und im Inneren des Leiters haben das gleiche Potential. Ladungsdichte und elektrisches Feld sind an Orten auf der Oberfläche mit starker Krümmung besonders hoch.

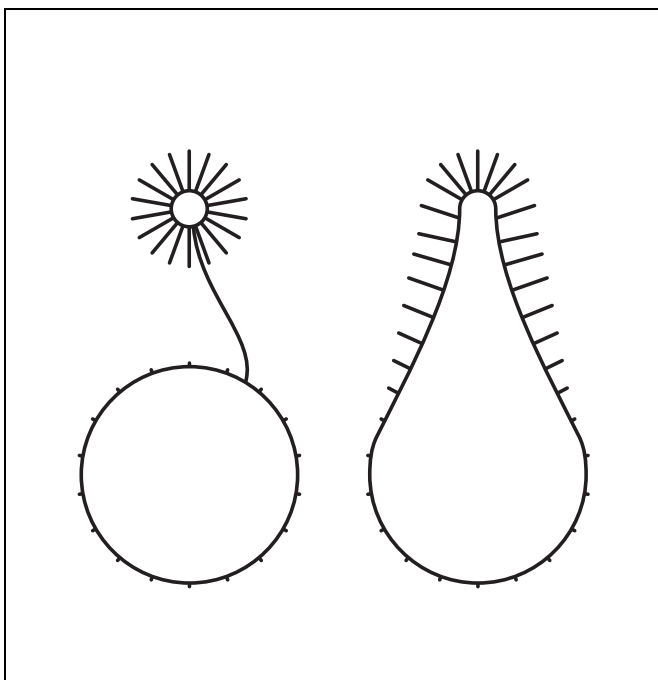
Elektrisch leitende Hohlkörper nehmen elektrische Ladungen nur auf ihrer äußeren Oberfläche auf. Der Hohlraum ist feldfrei und hat ein konstantes elektrisches Potential. Will man Ladung, die sich auf einem Leiter befindet, vollständig abgeben, so berührt man daher möglichst das Innere eines metallischen Hohlkörpers.

Zur Untersuchung der Ladungsverteilung wird im Versuch mit einem Probescheibchen elektrische Ladung von geladenen leitenden Hohlkörpern abgegriffen und mit einem als Coulombmeter beschalteten Elektrometer-Verstärker gemessen. Zur Aufnahme der Ladungen ist der Elektrometer-Verstärker seinerseits mit einem metallischen Hohlkörper, einem Faraday-Becher bestückt. Als Anzeigergerät für die Ausgangsspannung U_A dient ein beliebiges Voltmeter. Aus der Vergleichskapazität C berechnet man

$$Q = C \cdot U_A \quad (I).$$

Bei $C = 10 \text{ nF}$ entspricht somit z.B. $U_A = 1 \text{ V}$ der Ladung $Q = 10 \text{ nAs}$. Mit anderen Kapazitäten erhält man andere Meßbereiche.

Von zwei geladenen Metallkugeln auf gleichem Potential hat die kleinere Kugel die größere Feldstärke. An feinen Spitzen können daher sehr große Feldstärken herrschen.



Geräte

1 Kegelkonduktor auf isolierendem Stativ	543 07
2 Faraday-Becher	546 12
1 Probescheibchen	542 52
1 Hochspannungs-Netzgerät 10 kV	521 70
1 Hochspannungskabel	501 05
1 Elektrometer-Verstärker	532 14
1 Steckernetzgerät 230 V/12 V~/20 W	562 791
1 STE Kondensator 1 nF, 630 V	578 25
1 STE Kondensator 10 nF, 100 V	578 10
1 Voltmeter, DC, bis $U = \pm 8 \text{ V}$ z.B.	531 100
1 Klemmstecker	590 011
1 Anschlußstab	532 16
1 Experimentierisolator	540 52
1 Sockel	300 11
1 Satz 6 Krokodilklemmen	501 861
Experimentierkabel	

Sicherheitshinweise

Das Hochspannungs-Netzgerät 10 kV entspricht den Sicherheitsbestimmungen für elektrische Meß-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte. Es liefert eine nicht berührungsfähige Hochspannung. Folgende Sicherheitsmaßnahmen sind zu berücksichtigen.

- Gebrauchsanweisung zum Hochspannungs-Netzgerät beachten.
- Änderung der Beschaltung im Versuchsaufbau nur bei abgeschaltetem Hochspannungs-Netzgerät 10 kV vornehmen.
- Den Versuchsaufbau so plazieren, daß weder nicht isolierte Teile noch Kabel und Stecker unbewußt berührt werden können.
- Vor Inbetriebnahme des Hochspannungs-Netzgeräts 10kV die Ausgangsspannung auf Null regeln. (Drehregler auf Linksanschlag drehen.)
- Das Hochspannungskabel so auslegen, daß sich in der Nähe des Kabels keine elektrisch leitenden Gegenstände befinden, da sonst Funkenüberschlag auftreten kann.

Vorbemerkung

Der Versuch erfordert eine besondere Sorgfalt bei der Durchführung, denn Ladungsverluste durch „Leckströme“ über den Isolatoren können erhebliche Meßfehler verursachen. Außerdem können unerwünschte Influenzwirkungen das Ergebnis beeinflussen.

Der Versuch muß in einem geschlossenen, trockenen Raum durchgeführt werden, damit Ladungsverluste durch hohe Luftfeuchtigkeit möglichst vermieden werden.

Es empfiehlt sich, die Isolatoren mit destilliertem Wasser zu reinigen, denn destilliertes Wasser ist das beste Lösungsmittel für leitfähige Salze auf den Isolatoren. Außerdem sollte man die Isolatoren zur Entladung vor jedem Experiment mehrmals zügig durch die nicht rußende Flamme z. B. eines Butangasbrenners ziehen.

Der Experimentator muß – insbesondere bei der Ladungsmessung – den Anschlußstab des Elektrometer-Verstärkers in der Hand halten, um sich selbst elektrisch zu erden.

Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Teilen. In Fig. 1 ist der Aufbau zur elektrostatischen Aufladung der Hohlkörper und zur Entnahme der Probeladungen dargestellt. Fig. 2 zeigt die Beschaltung des Elektrometer-Verstärkers zur Messung der Probeladungen.

Elektrostatische Aufladung der Hohlkörper:

- Faraday-Becher (a) auf Experimentierisolator stecken und auf Sockel montieren.
- Hochspannungskabel an Pluspol des Hochspannungs-Netzgeräts anschließen und Minuspol mit Erde verbinden.
- Freies Ende des Hochspannungskabels in obere (!) 4-mm-Bohrung des Experimentier-Isolators stecken.

Aufbau zur Messung der Probeladung:

- Elektrometer-Verstärker über das Steckernetzgerät mit Spannung versorgen.
- Zweiten Faraday-Becher (c) mit Klemmstecker aufstecken.
- STE-Kondensator 10 nF (d) aufstecken.
- Anschlußstab (e) mittels Experimentierkabel mit Masse verbinden und Masse am besten über langes Experimentierkabel an die Erde des Hochspannungs-Netzgeräts anschließen.
- Voltmeter an Ausgang anschließen.

Durchführung

Hinweis:

Faraday-Becher und Kegelkonduktor bleiben während des Experiments an die Hochspannungsquelle angeschlossen. Berührung der untersuchten Hohlkörper mit der Hand vermeiden, auch wenn die Hochspannung nicht berührungsfähig ist.

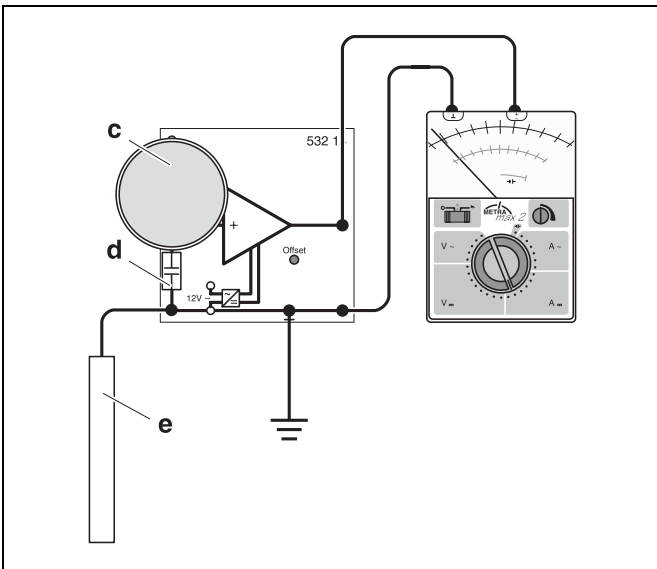
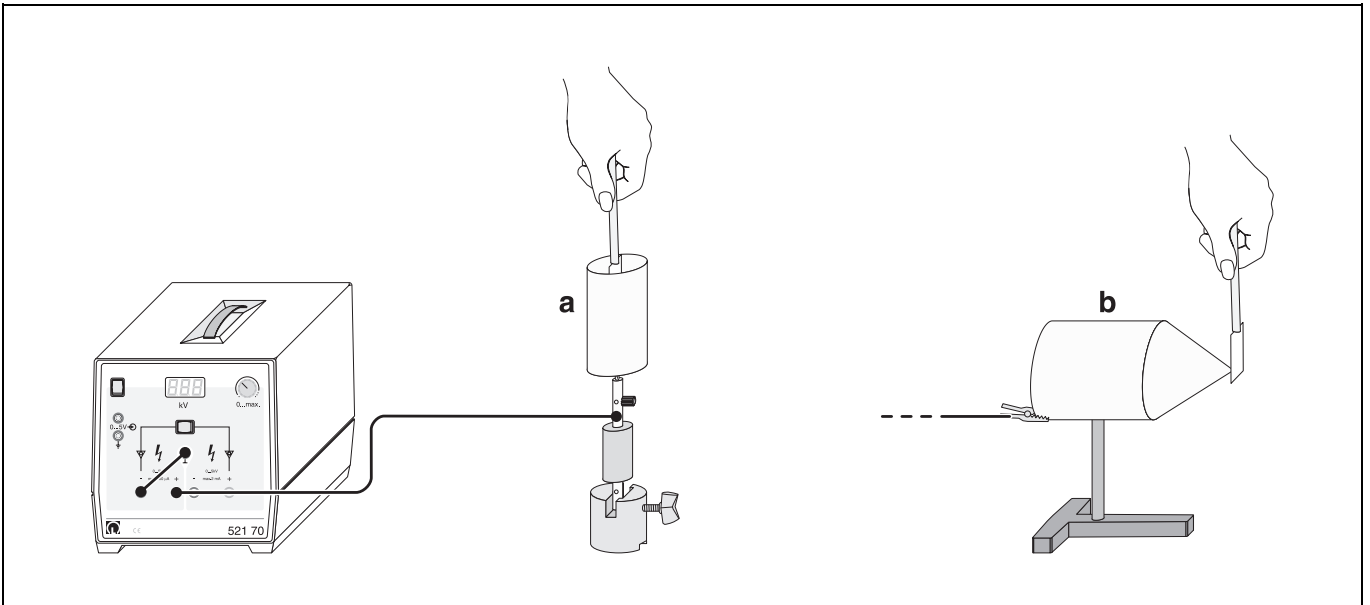
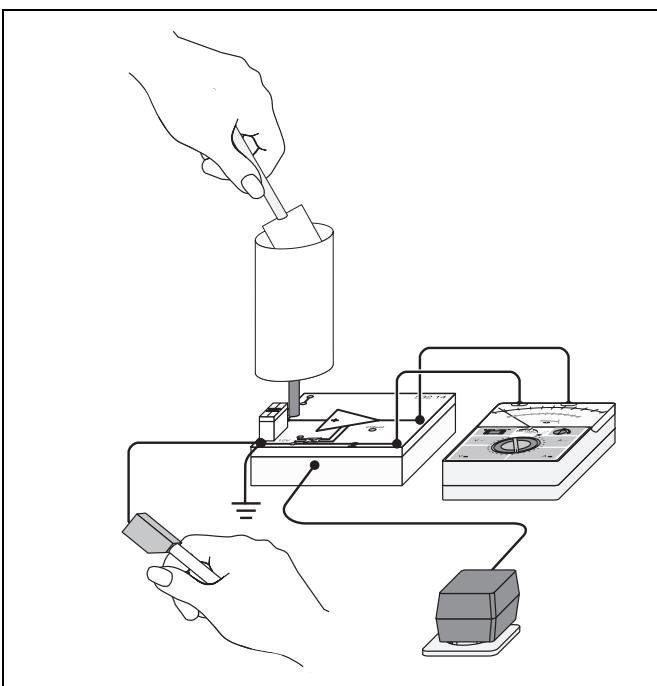


Fig. 1 Versuchsaufbau zur Messung der Ladungsverteilung auf einem Faraday-Becher (a) und auf einem Kegelkonduktor (b)

Fig. 2 Versuchsaufbau zur Messung der Ladung auf dem Probescheibchen

Fig. 3 Messung der Ladung auf dem Probescheibchen.



a) Ladungsverteilung auf dem Faraday-Becher:

- Hochspannungs-Netzgerät einschalten und $U = 5 \text{ kV}$ einstellen.
- Probescheibchen mit Anschlußstab (e) entladen.
- Mit dem Probescheibchen die Außenwand des Faraday-Bechers (a) berühren und Ladung abnehmen.
- Zur Ladungsmessung Faraday-Becher (c) des Elektrometers mit Anschlußstab (e) berühren und entladen, anschließend Anschlußstab in die Hand nehmen und Probescheibchen an die Innenseite des Faraday-Bechers führen (siehe Fig. 3).
- Untersuchung für verschiedene Stellen auf der Außen- und Innenwand des Faraday-Bechers (a) wiederholen; dazu jeweils Probescheibchen mit Anschlußstab (e) entladen.

b) Ladungsverteilung auf dem Kegelkonduktor:

- Hochspannungs-Netzgerät ausschalten und Faraday-Becher durch Kegelkonduktor (b) ersetzen; dazu Hochspannungskabel mit Krokodilklemme an Kegelkonduktor befestigen.
- Hochspannungs-Netzgerät einschalten und 5 kV einstellen.
- Probescheibchen von vorne an die Spitze des Kegelkonduktors führen und Ladung auf dem Probescheibchen messen.
- Untersuchung für verschiedene Stellen auf der Außen- und Innenwand des Kegelkonduktors wiederholen; dazu jeweils Probescheibchen mit Anschlußstab (e) entladen.

Messbeispiel

a) Ladungsverteilung auf dem Faraday-Becher:

Ort	$\frac{Q}{nAs}$
Außenwand	6,0
Innenwand	0,1

b) Ladungsverteilung auf dem Kegelkonduktor:

Ort	$\frac{Q}{nAs}$
Außenwand	
Spitze	8,6
Kegelabschnitt	7,8
Zylinderabschnitt	6,2
Innenwand	0,4

Auswertung und Ergebnis

Auf den Innenwänden von Faraday-Becher und Kegelkonduktor lassen sich nahezu keine Ladungen nachweisen. Die gesamte Ladung befindet auf der Außenwand des Leiters.

Auf dem Kegelkonduktor hängt die der äußeren Oberfläche entnommene Ladung von der Krümmung der Oberfläche ab. Je kleiner der Krümmungsradius ist, desto größer ist die vorhandene Ladung. Einen besonders kleinen Krümmungsradius weist die Spitze des Kegelkonduktors auf. Dort findet man eine große Anhäufung von Ladung.

Da die elektrische Feldstärke an der Oberfläche proportional zur Ladungsdichte ist, ist an der Spitze auch die Feldstärke groß. Diese Erscheinung wird auch Spitzeneffekt genannt und findet z. B. im Blitzableiter eine praktische Anwendung.

Zusatzinformation

Die Abhängigkeit der Ladungsdichte vom Krümmungsradius läßt sich wie folgt begründen: Das Potential einer geladenen Metallkugel mit dem Radius R und der Ladung Q Kugel ist

$$U = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R} \quad (\text{II})$$

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante

Da die Ladung auf der Kugeloberfläche gleichmäßig verteilt ist, ist die Ladungsdichte

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi \cdot R^2} \quad (\text{III})$$

Aus (II) und (III) folgt

$$U = \frac{\sigma \cdot R}{\epsilon_0} \quad (\text{III})$$

Zwei Kugeln oder verallgemeinert zwei gekrümmte Oberflächen mit unterschiedlichem Krümmungsradius R befinden sich auf dem gleichen Potential, wenn für ihre Ladungsdichte σ gilt

$$\sigma \sim \frac{1}{R} \quad (\text{IV})$$