Versuch C 17: Kraftwirkung elektrischer Ladungen (Coulomb-Gesetz)

1. Literatur: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II: Elektrizität u. Magnetismus
Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
Pohl, Einführung in die Physik, Bd.2: Elektrizitätslehre
Westphal, Physik

Stichworte: elektr. Ladung, Coulomb-Gesetz, elektr. Feld, Potenzial, Spannung; Gaußscher Satz; Kapazität: Plattenkondensator, Kugel; Influenz, Bildkraft

2. Grundlagen

2.1 Elektrische Ladungen, Coulomb-Gesetz

Elektrische Ladungen treten in der Elektrostatik durch ihre gegenseitige Kraftwirkung in Erscheinung: Werden bestimmte nichtmetallische Körper aneinander gerieben (z.B. Kunststoff und Wolle) und anschließend getrennt, ziehen sich diese gegenseitig an. Zwei gleiche auf diese Weise behandelte Körper (z.B. zwei mit Wolle geriebene Kunststoffstäbe) stoßen sich dagegen ab. Diese seit Jahrtausenden bekannte Erscheinung der elektrostatischen Kraftwirkung beruht auf der Existenz zweier verschiedener *elektrischer Ladungsarten* der Materie, die als positiv und negativ bezeichnet werden. Gleichartige Ladungen stoßen sich ab, ungleichartige ziehen sich an. Die elektr. Ladung ist in der Summe der negativen u. positiven Ladungen eine Erhaltungsgröße, eine Ladungsart kann weder allein erzeugt noch vernichtet werden. Durch räumliche Trennung von positiven u. negativen Ladungen (wie z.B. durch Reibung) werden ihre Kraftwirkungen makroskopisch beobachtbar. Elektrisch neutrale Körper tragen die gleiche Menge positiver wie negativer Ladungen, die sich in der Summe ihrer Kraftwirkungen makroskopisch aufheben.

Heute wissen wir, dass elektr. Ladungen als ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung e ($e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C (Coulomb)) auftreten und dass Protonen bzw. Elektronen Träger der positiven bzw. negativen Elementarladung sind. Die Kraftwirkungen der Elementarladungen sind für die Struktur aller Materie auf atomarer und molekularer Größenskala entscheidend und bewirken den Zusammenhalt von Festkörpern und Flüssigkeiten.

C. Coulomb (1785) war der erste, der die zwischen zwei elektr. geladenen Körpern

wirkende Kraft, die nach ihm benannte *Coulomb-Kraft*, quantitativ untersuchte. Er bestimmte mit einer Torsionswaage die Kraft, welche zwei elektr. geladene Kugeln aufeinander ausüben. Die Ergebnisse seiner Messungen sind im *Coulomb-Gesetz*, Gl.(1), zusammengefasst, welches besagt, dass die zwischen zwei Ladungen Q_1 u. Q_2 (in Richtung der Verbindungslinie) wirkende Kraft $\underline{F}$ proportional zum Produkt Q_1Q_2 und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes r der Ladungsschwerpunkte ist.

$$F = a\,\frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad \begin{array}{ll} F<0: & \text{anziehend} \\ F>0: & \text{abstoßend} \end{array} \tag{1}$$

Streng genommen gilt das Coulomb-Gesetz nur für "Punktladungen" (Ladungen ohne räumliche Ausdehnung), d.h. in der Praxis um so besser, je geringer die Größe der geladenen Körper oder Teilchen im Vergleich zu ihrem gegenseitigen Abstand r ist. Die Proportionalitätskonstante a in Gl.(1) ist durch die Einheit der Ladungsmenge festgelegt. Im SI-System ist die Ladungseinheit das Coulomb (C), welches durch die Einheiten der Stromstärke und Zeit definiert wird (1 C = 1 As). Der Faktor 4π ist ein zweckmäßiger Geometriefaktor, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ As/Vm die *Influenzkonstante* oder *elektr. Feldkonstante*. Das Coulomb-Gesetz gilt in der Form von Gl. (1) für Punktladungen im Vakuum, mit geringer Abweichung der Proportionalitätskonstanten auch in Luft.

Wirken mehrere Ladungen Q_i auf eine Ladung Q, so ist die resultierende Kraft gleich der vektoriellen Summe der durch Gl. (1) beschriebenen Einzelkräfte (Superpositionsprinzip).

Das Coulomb-Gesetz soll im vorliegenden Versuch durch die Messung der zwischen zwei geladenen Kugeln wirkenden Kraft experimentell bestätigt werden. Die für den Versuch wichtigen physikalischen Größen und Gesetze der Elektrostatik werden im folgenden kurz erläutert.

2.2 Elektrisches Feld, Gaußscher Satz, elektrisches Potenzial

Die Eigenschaft einer elektr. Ladung Q, auf eine weitere Ladung q eine Kraft auszuüben, wird durch ein elektrostatisches Feld beschrieben, welches jede ruhende elektr. Ladung umgibt. Die Feldstärke $\underline{E}$ ist ein Vektor, der für eine positive Ladung Q von ihr wegweisend in jedem Punkt des Raumes den Quotienten aus der Kraft $\underline{F}$ und der (Probe)-Ladung q für den Grenzfall $q \to 0$ darstellt. Für eine Punktladung Q folgt mit Gl. (1):

$$E = \lim_{q \to 0} \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} \qquad (2)$$

Das elektrische Feld mehrerer Punktladungen ist wie die wirkende Kraft die vektorielle Summe aus den Feldstärken der einzelnen Ladungen. Bei räumlich oder flächenhaft verteilten Ladungen ist die elektr. Feldstärke ein entsprechendes Volumen- oder Flächenintegral. Das elektrostatische Feld kann bildlich durch *Feldlinien* dargestellt werden, die von positiven Ladungen (Quellen) ausgehen und in negativen Ladungen (Senken) enden. Der Vektor $\underline{E}$ zeigt dabei in Richtung der Feldlinien, seine Größe variiert wie ihr gegenseitiger Abstand (s. Abb. 1).

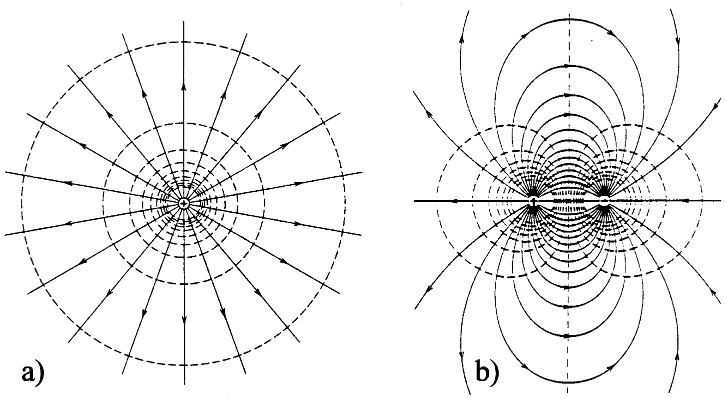

Abb.1: Elektr. Feldlinien (——) und Schnittlinien durch Äquipotenzialflächen (– –) für a) positive Punktladung, b) positive und negative Punktladung (elektr. Dipol)

Da das elektrostatische Feld keine Wirbel (in sich geschlossene Feldlinien) und immer Quellen und Senken in Ladungen hat, ist der von punktförmigen oder räumlich verteilten Ladungen ausgehende *elektr. Fluss* Φ durch jede in sich geschlossene Fläche S unabhängig von der Form der Fläche und nur abhängig von der von ihr umschlossenen Gesamtladung Q:

$$\Phi = \oint_S \underline{E}\, d\underline{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (3)$$

Dies ist der *Kraftflusssatz* oder *Gaußsche Satz* der Elektrostatik. Aus Gl.(3) folgt speziell für eine konzentrisch um eine Punktladung Q gelegte Kugelfläche mit

Radius r:

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0} \qquad (4)$$

Das Coulomb-Gesetz wird also durch den Gaußschen Satz bestätigt bzw. lässt sich aus ihm ableiten.

Wird eine Ladung q im elektrostatischen Feld einer Ladung Q vom Ort $\underline{r}_1$ nach $\underline{r}_2$ bewegt, so wird an ihr infolge der Kraftwirkung eine Arbeit geleistet, die sich in der Veränderung der potentiellen Energie der Ladung q im Feld $\underline{E}$ um

$$\Delta W = -\int_{\underline{r}_1}^{\underline{r}_2} \underline{F}\, d\underline{r} = -q \int_{\underline{r}_1}^{\underline{r}_2} \underline{E}\, d\underline{r} = -q\, U(\underline{r}_1, \underline{r}_2) \qquad (5)$$

äußert. Die Größe $U(\underline{r}_1,\underline{r}_2)$ ist die *elektr. Spannung* U. Sie ist eine Eigenschaft des elektr. Feldes und vom Wege zwischen $\underline{r}_1$ und $\underline{r}_2$ unabhängig. U lässt sich deshalb als Differenz eines *elektr. Potenzials* $\varphi(\underline{r})$ darstellen: $U(\underline{r}_1,\underline{r}_2) = \varphi(\underline{r}_1) - \varphi(\underline{r}_2)$. Das elektr. Potenzial $\varphi(\underline{r})$ erhält man aus Gl.(5) mit $\underline{r}_2 = \underline{r}$ und $\underline{r}_1 \to \infty$ und der Festlegung $\varphi(\infty) = 0$. Für das elektr. Potenzial einer Punktladung Q folgt damit aus Gln.(2) u. (5):

$$\varphi(\underline{r}) = -\int_{\infty}^{\underline{r}} \underline{E}\, d\underline{r} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad (6)$$

Flächen mit jeweils konstantem Potenzial, sog. *Äquipotenzialflächen*, sind alle die Orte in der Umgebung einer Ladung, zwischen denen eine Probeladung ohne Arbeitsleistung bewegt werden kann. Auf ihnen steht der Vektor der elektr. Feldstärke jeweils senkrecht (s. Abb. 1). Kennt man das Potenzial einer Ladungsverteilung, kann mit der Beziehung $\underline{E} = -\,\mathrm{grad}\,\varphi$ die elektr. Feldstärke berechnet werden und umgekehrt aus $\underline{E}$ das Potenzial φ.

2.3 Metallische Leiter, Kapazität

Wird ein Metall einem elektrostatischen Feld ausgesetzt oder durch Berührung mit einem geladenen Metall ebenfalls elektrisch geladen, werden sich seine Elektronen aufgrund ihrer leichten Beweglichkeit so lange verlagern, bis sich im

Gleichgewicht die Kräfte auf sie aufheben, d.h. das elektr. Potenzial konstant ist und das elektr. Feld überall im Inneren des Metalls verschwindet. Dann ist jedoch im Inneren eines Metalls auch der elektr. Fluss durch jede geschlossene Fläche und die darin liegende elektr. Ladung Null. Mit Versuchen, im Inneren geladener Metallkörper Ladungen nachzuweisen, ist die Gültigkeit des Gaußschen Satzes und des Coulomb-Gesetzes mit viel größerer Genauigkeit nachgewiesen worden, als es durch Coulombs Experimente möglich war.

Ein elektr. geladenes Metall hat also (getrennte) Ladungen nur an seiner äußeren Oberfläche, die zugleich Äquipotenzialfläche ist. Auf diesem Prinzip beruht der *Faraday-Becher*: Führt man einen geladenen Körper in einen Metallbecher und berührt ihn damit von innen, so fließen die Ladungen an die äußere Oberfläche des Bechers ab, der Körper wird entladen.

Befinden sich zwei entgegengesetzt geladene Leiter, z.B. zwei Metallkugeln mit den Ladungen +Q u. -Q im sonst freien Raum gegenüber, so besteht ein elektr. Feld und damit eine elektr. Spannung U zwischen ihnen. Um eine Probeladung q (q << Q) von einer Kugel zur anderen zu transportieren, muss die Arbeit qU geleistet werden. Erhöht man die Ladungen Q, vergrößert sich proportional dazu auch die Spannung zwischen den Kugeln. Das Verhältnis von Ladung zu Spannung einer Anordnung entgegengesetzt geladener Leiter ist die *Kapazität* C = Q/U. (Einheit der Kapazität: 1 Farad, 1 F = 1 C/V = 1 As/V). Die Kapazität C einer Anordnung von Leitern im Vakuum ist eine von der Geometrie der Leiter und ihrer relativen Lage abhängige Größe. Dies sei an zwei einfachen Beispielen verdeutlicht:

Metallkugel im freien Raum:

Die Kugel mit Radius r_0 habe die Ladung Q. Man denkt sich die Ladung -Q sehr weit von der Kugel entfernt gleichmäßig im Raum verteilt. Aus Symmetriegründen ist die Ladung der Kugel gleichmäßig auf ihrer Oberfläche verteilt und das elektr. Feld und Potenzial im Außenraum der Kugel radialsymmetrisch (s. Abb. 2a). Aus dem Gaußschen Satz, Gl.(3), folgt damit, dass Feldstärke und Potenzial im Außenraum denen einer Punktladung Q gleichen, die sich anstelle der Kugel in ihrem Zentrum befindet. Im Inneren der Kugel ist E = 0 und φ = const. wie an der Kugeloberfläche, also $\varphi = Q/4\pi\varepsilon_0 r_0$. Die Spannung zwischen der Kugel und der Umgebung (im Unendlichen) ist gleich dem Potenzial, so dass ihre Kapazität $C = Q/U = 4\pi\varepsilon_0 r_0$ ist. Eine Kugel, z.B. mit dem Radius r_0 = 1 cm hat eine (geringe) Kapazität von ca. 1 pF (10^{-12} F).

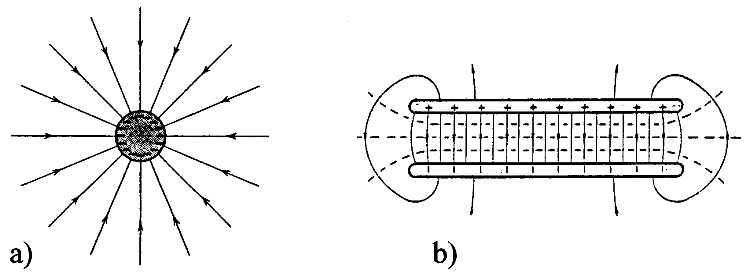

Abb.2: a) Feldlinien einer negativ geladenen Metallkugel, b) Feldlinien und Äquipotenzialflächen(schnitte) eines Plattenkondensators

Plattenkondensator:

Befinden sich zwei ebene, die Ladungen +Q u. -Q tragende Metallplatten der Fläche S im Abstand d ($d^2 << S$) dicht gegenüber, ist das elektr. Feld im wesentlichen im Raum zwischen den Platten konzentriert und dort (nahezu) homogen (s. Abb. 2b). Die Ladungen sind (bis auf die Plattenränder) gleichmäßig auf den gegenüberliegenden Oberflächen der Platten verteilt. Legt man eine geschlossene Fläche mit der einen Seite in eine Kondensatorplatte hinein, mit der anderen in den Raum zwischen die Platten, so ist gerade die Ladung Q darin eingeschlossen, so dass mit Gln. (3) u. (5) $E = Q/\varepsilon_0 S$, U = E d und damit die Kapazität des Plattenkondensators $C = Q/U = \varepsilon_0 S/d$ ist. Für z.B. S = 1 dm^2, d = 1mm ist C ca. 90 pF. Je nach Aufbau hat ein Plattenkondensator infolge des Feldes außerhalb des Raumes zwischen den Platten eine geringe, für einen kleinen Plattenabstand nur wenig von d abhängige zusätzliche sog. *Streukapazität* C_0 .

2.4 Influenz, Bildladung

Nähert man eine positive Ladung Q einer ungeladenen Metallplatte, wird das elektrische Feld der Ladung auf die zuvor gleichmäßig verteilten pos. u. neg. Ladungen der Platte Kräfte ausüben. Die negativen Ladungen (Elektronen) der Platte werden in den Bereich direkt gegenüber der Ladung Q angezogen, so dass dieser negativ gegenüber der von Q weiter entfernten Umgebung der Platte geladen wird. Diesen, beim Entfernen der Ladung Q wieder verschwindenden Ladungseffekt nennt man *Influenz*. Infolge der Influenz resultiert eine anziehende Kraft, die sog. *Bildkraft*, zwischen einer Ladung und der durch sie influenzierten Ladung. Im oben genannten Beispiel kann für eine Punktladung Q im Abstand d gegenüber einer großen geerdeten Metallplatte die Bildkraft leicht bestimmt werden (s. Abb. 3a). Da die geerdete Platte eine ebene Äquipotenzialfläche (φ = 0) darstellt, ist der Feldlinien- u. Potenzialverlauf zwischen der Ladung Q und der

Platte der gleiche wie derjenige zwischen zwei Punktladungen +Q und -Q im Abstand 2d für den Raumbereich von einer Punktladung bis zur Mittelebene (vergl. Abb. 1b). Die durch die Punktladung Q verursachte Influenzladung der Platte ist also hinsichtlich des Feldverlaufs und der Bildkraft einer gedachten Punktladung -Q, der *Bildladung* im Abstand 2d gleichwertig.

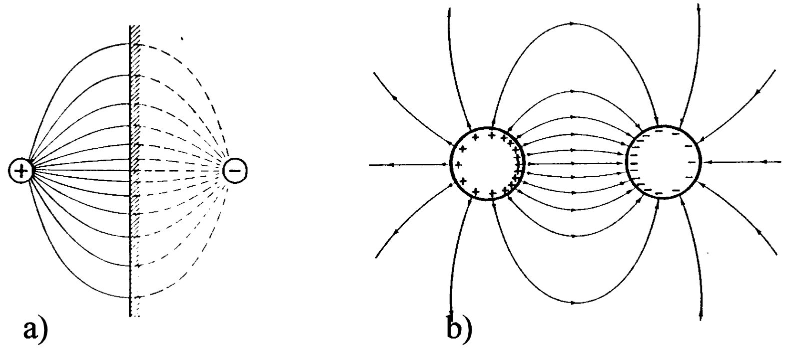

Abb.3: a) Feldlinien einer Punktladung vor geerdeter Metallplatte (mit Bildladung), b) Feldlinien und Ladungsverteilung durch Influenz zweier entgegengesetzt geladener Metallkugeln

Die Bildkraft ist also in diesem Fall mit Gl. (1)

$$F = -\frac{Q^2}{16\pi\varepsilon_0 d^2} \tag{7}$$

Befinden sich zwei gleich oder entgegengesetzt geladene Metallkugeln mit Radius r_0 in großem Abstand r ihrer Mittelpunkte gegenüber ($r >> r_0$), so ist die gegenseitig influenzierte Ladung sehr gering; die Kugeln haben eine gleichmäßige Oberflächenladung (s. Abb. 2a) und üben die gleiche Coulomb-Kraft aufeinander aus wie entsprechende Punktladungen in den Kugelzentren. Ist der Abstand r jedoch nicht viel größer als der minimale Abstand 2 r_0, sind die Ladungen aufgrund ihrer gegenseitigen Influenz nicht mehr gleichmäßig auf den Oberflächen verteilt (s. z.B. Abb. 3b). Es wirkt zwischen den Kugeln zusätzlich eine anziehende Bildkraft. Diese kann für kleine Abstände r beträchtlich sein und muss im vorliegenden Versuch berücksichtigt werden. Ihre Berechnung ist aus Geometriegründen schwieriger als im vorhergehenden Beispiel. Seien F_+ bzw. F_- die Beträge der zwischen zwei gleich bzw. entgegengesetzt geladenen Kugeln

wirkenden Gesamtkräfte und F_C der Betrag der Coulomb-Kraft für entsprechende Punktladungen, sind mit der Festlegung:

$$F_+ = K_+ F_C \quad \text{bzw.} \quad F_- = K_- F_C \tag{8}$$

K_+ bzw. K_- die Korrekturfaktoren infolge der Influenz. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle für den im Versuch wichtigen Abstandsbereich r_0/r angegeben:

r_0/r	K_+	K_-
0,10	0,996	1,004
0,15	0,986	1,014
0,20	0,967	1,035
0,25	0,935	1,074
0,30	0,889	1,141
0,35	0,828	1,265

3. Aufgabenstellung

1. Aufgabe: Eichen Sie ein Ladungsmessgerät durch Bestimmung der Ladung eines Plattenkondensators bei fester Spannung für verschiedene Plattenabstände.

2. Aufgabe: Bestimmen Sie die Ladung einer Metallkugel für verschiedene Ladespannungen und vergleichen Sie ihre Kapazität mit der einer *freien* Kugel.

3. Aufgabe: Bestimmen Sie die zwischen zwei positiv geladenen Metallkugeln wirkene Kraft a) als Funktion der Ladespannung bei festem Abstand und b) als Funktion des Abstandes bei konstanter Ladespannung.

4. Aufgabe: Bestimmen Sie die zwischen einer positiv geladenen Metallkugel und einer geerdeten Metallplatte wirkende Bildkraft als Funktion des Abstandes.

4. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Teilen:

1) Zur Eichung des Ladungsmessers (s. Abb. 4) wird ein Plattenkondensator C mit variablem auf 0,1 mm genau einstellbaren Plattenabstand benutzt. Die positiv zu ladende isolierte Kondensatorplatte ist über einen Schutzwiderstand R = 50 MΩ und den Schalter S zum Laden mit der Spannungsquelle U und zum Entladen mit dem Eingang des Ladungsmessverstärkers MV verbunden. Die der Ladung (ca. 10^{-8} As) proportionale Ausgangsspannung des Verstärkers wird mit dem Digitalvoltmeter DVM bestimmt.

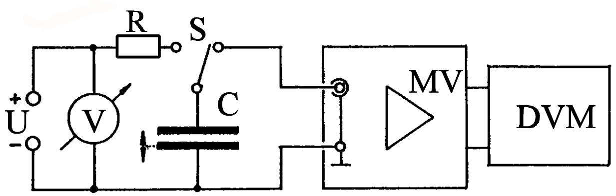

Abb.4: Schaltschema zur Ladungsmessung am Plattenkondensator

2) Die Anordnung zur Messung der Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln sowie zwischen einer Kugel und einer geerdeten Metallplatte zeigt Abb. 5. Zwei elektr. isoliert angebrachte metallisierte Kunststoffkugeln K_1 und K_2 befinden sich auf gleicher Höhe in variablem Abstand gegenüber. K_1 ist an einem Hebelarm befestigt, welcher das Moment der seitlich auf sie wirkenden Kraft innerhalb des Sensors KS auf eine dünne Blechlamelle überträgt und diese leicht durchbiegt. Die Biegung wird von zwei Dehnungsmessstreifen bestimmt, die auf beide Seiten der Lamelle geklebt sind. Dehnungsmessstreifen sind dünne Folien mit Leiterbahnen, deren Längenänderung durch Messung ihres elektr. Widerstandes mit großer Empfindlichkeit bestimmt werden kann. Das mit dem Sensor verbundene Messgerät KM zeigt die auf K_1 wirkende Kraft digital in Newton an. Da die im Versuch zu bestimmenden Kräfte jedoch sehr klein sind (≈ 10^{-4} N), dient ein nachgeschaltetes Digitalvoltmeter DVM zur Ablesung der Kraft. Die Kugel K_2 bzw. ein geerdetes Blech B werden über einer Schiene S in variablem Abstand zu K_1 aufgestellt. Zur Ladung der Kugeln dient die Hochspannungsquelle HV (max.benutzte Spannung: 15 kV). Ihr Minuspol ist mit der Erdbuchse des Geräts und der Schiene verbunden, der Pluspol über einen (internen) Schutzwiderstand mit dem Steckerstift HS. Dieser wird zum Laden der Kugeln mit ihnen in Kontakt gebracht. Bei jedem Ladungvorgang ist **unbedingt** gleichzeitig ein mit der Schiene (Erde) verbundener Metallstab E zu umfassen! Auf diese Weise bleibt der

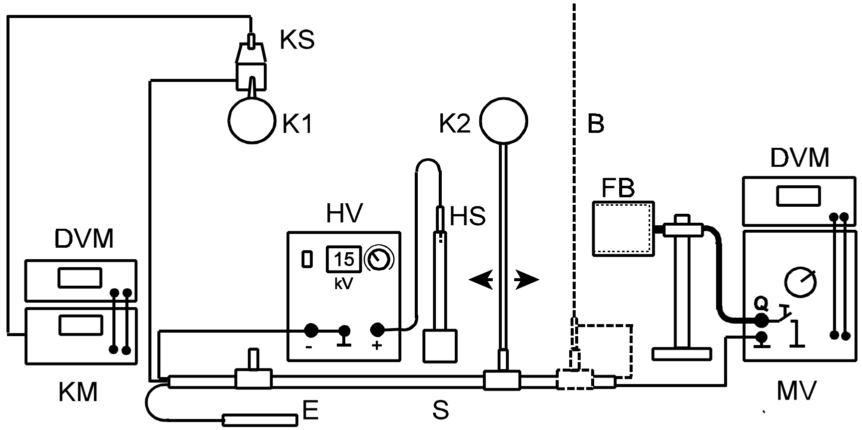

Abb.5: Versuchsaufbau zur Kraft- und Ladungsmessung der Kugeln

menschliche Körper auf Erdpotential und es werden unangenehme Stromschläge bei Annäherung an den Ladungsstift HS vermieden. Zur Ladungsmessung der Kugel K_2 wird über sie ein Faraday-Becher FB gestülpt, der mit dem Eingang des Messverstärkers MV verbunden ist, dessen Erde wiederum mit der Schiene S. Zum Trocknen der Kugeln, ihrer Isolatoren und der Umgebungsluft dient ggf. ein Warmluftventilator.

5. Versuchsdurchführung und Auswertung

Zum Versuchsbeginn sind die Schaltungen Abb. 4 u. 5 (soweit gleichzeitig möglich) aufzubauen und die empfindlichen Messgeräte Kraft- und Ladungsmesser zum Aufwärmen einzuschalten (mindestens 15 min. vor der Messung). Vor Beginn der Messungen sind die Schaltungen vom **Betreuer** des Versuchs zu überprüfen und **nur von ihm** die Hochspannungsquelle einzuschalten.

Wegen der selbst bei hohen Spannungen nur geringen Ladungen der Kugeln ist darauf zu achten, dass diese und die Isolatoren sauber und trocken sind bzw. bleiben; insbesondere sollten sie nicht mit den Händen berührt oder angehaucht werden. Ein zu schnelles Abfließen der Ladungen infolge z.B. feuchter Isolatoren kann bei der Kraftmessung leicht bemerkt werden und diese unmöglich machen.

Bei der Messung mit dem Plattenkondensator ist zu beachten, dass das Kabel vom Schalter S zur isolierten, feststehenden Kondensatorplatte möglichst kurz und ohne Berührung zu geerdeten Teilen sein sollte. Ferner sollte der Steckerstift der mit dem Messverstärker verbundenen Koaxialleitung nicht ganz in die betreffende Buchse des Schlters S eingesteckt werden, da sonst möglicherweise der Isolationswiderstand zur Erde nicht ausreichend groß ist.

zu Aufgabe 1:

Der Messverstärker ist auf den Bereich 10^{-8} As stat., der Nullpunkt der Ausgangsspannung U_Q bei geerdetem Eingang (gedrückte Erdungstaste) einzustellen, die Gleichspannungsquelle auf 200 V. Es ist die der Ladungsmenge des Kondensators $Q = a\ U_Q$ proportionale Spannung U_Q des Verstärkers für Plattenabstände

d = 10; 5; 3; 2; 1,5 u. 1 mm

jeweils dreimal, bei großen Abweichungen der Einzelmessungen entsprechend öfter zu bestimmen. Der Verstärkereingang ist kurz vor der Entladung des Kondensators zu erden, der Schalter jeweils nur kurzzeitig auf Entladen zu stellen.

Tragen Sie in der Auswertung die Mittelwerte U_Q über 1/d auf und bestimmen Sie über eine Ausgleichsgerade und die Kapazitätsformel für den Plattenkondensator die Eichkonstante a des Messverstärkers sowie aus dem Achsenabschnitt $U_Q(1/d=0)$ die Streukapazität C_0 des Kondensators! Der Durchmesser D der Kondensatorplatten beträgt 26 cm.

zu Aufgabe 2:

Es wird die Ladung der Kugel K_2 bzw. die Spannung U_Q für positive Ladespannungen U = 5 bis 15 kV (gegen die Schiene, bzw. Erde) in Schritten von 2,5 kV jeweils dreimal bestimmt. Dazu wird K_2 über die Position x = 80 cm der Schiene gestellt. Nach Einstellen der Sollspannung des Hochspannungsgeräts und Ergreifen des Erdstabes wird mit der anderen Hand der Steckerstift HS am kabelseitigen hinteren Ende des Griffes erfasst, aus dem Isolator-Standfuß genommen, kurzzeitig an die Kugel gehalten und dann wieder in den Fuß zurückgesteckt. Zur Ladungsmessung wird der Eingang des Messverstärkers (Einstellung wie vorher) kurzzeitig geerdet, der Faraday-Becher aus der in ausreichendem Abstand zu HS aufgestellten Halterung genommen und vorsichtig über die Kugel geführt. Beobachten Sie, wie schon bei der Annäherung des Bechers an die Kugel (oder den Stift HS) Ladung im Becher influenziert wird. Befindet sich die Kugel ganz innerhalb des Bechers ohne ihn zu berühren, ist die influenzierte Ladung gleich der auf der Kugel. Sie verschwindet wieder bei Entfernen des Bechers. Berührt die Kugel die Innenwand des Bechers, fließt ihre

Ladung in den Becher ab. Nach Zurücklegen des Bechers in die Halterung ist die vom Ladungsmesser angezeigte Spannung U_Q *sofort* abzulesen.

In der Auswertung ist die mittlere Ladung der Kugel über der Ladespannung aufzutragen und über eine Ausgleichgerade die Kapazität der Kugel in dieser Anordnung zu bestimmen. Vergleichen Sie diese mit der Kapazität einer Kugel im freien Raum! Der Radius der beiden Kugeln beträgt $r_0 = 1{,}9$ cm.

zu Aufgabe 3:

a) Zunächst ist die Schiene so einzurichten, dass beide Kugeln (in gleicher Höhe) sich ohne Kraftwirkung gerade berühren, wenn der Isolator von K_2 auf der Position x = 43,8 cm steht, der Abstand r = 0 der Kugelmittelpunkte also x = 40 cm entspricht. Einer weiterer Schienenfuß ist so festzuklemmen, dass sich K_2 auf einen minimalen Abstand r = 6 cm an K_1 heranführen lässt.

Es ist jeweils die Differenz der Kräfte $\Delta F = F(6\text{ cm}) - F(40\text{ cm})$ zwischen beiden positiv geladenen Kugeln für Ladespannungen U von 5 bis 15 kV in Schritten von 2,5 kV jeweils dreimal zu bestimmen. Vor jeder Messung sind die Kugeln erneut zu laden. Stellen Sie dazu K_2 auf x = 80 cm und laden Sie die Kugeln auf, K_1 nur durch leichtes Berühren von unten! Drücken Sie die Nulltaste des Kraftmessers und notieren Sie die Anzeige des Voltmeters (Bereich: 2V; 1V entspricht 5×10^{-3} N)! Nach Heranführen von K_2 auf x = 46 cm ist die Anzeige erneut zu notieren. Es ist zweckmäßig, danach nochmals die Kraftanzeige für den Abstand r = 40 cm zu bestimmen und bei der Differenzbildung die Mittelwerte F(40 cm) zu benutzen.

Tragen Sie in der Auswertung die Mittelwerte ΔF über U^2 auf, gegebenenfalls mit den Ergebnissen der 2. Aufgabe auch über Q^2 und prüfen Sie die Proportionalität!

b) Der Versuch ist wie im Teil a) durchzuführen jedoch bei einer Ladespannung von 15 kV je zweimal für die Abstände

r = 6; 6,5; 7; 8; 10; 12; 14; 18 cm.

Vor jeder Messung sind die Kugeln neu zu laden. Die Mittelwerte der Messergebnisse sind über $1/r^2$ aufzutragen, für kleine Abstände r zusätzlich die infolge der Bildkraft korrigierten Werte F/K_+. Die Korrekturfaktoren sind durch Interpolation der Tabelle zu entnehmen. Bestimmen Sie aus einer Ausgleichsgeraden das beobachtete Kraftgesetz und vergleichen Sie es mit dem Coulomb-Gesetz, Gl.(1)! Diskutieren Sie das Ergebnis. Schätzen Sie aus den Messwerten unsystematische und mögliche systematische Fehler ab!

zu Aufgabe 4:

Zu Beginn ist das mit einem Kabel an der Schiene geerdete Blech B anstelle K_2 mit der Schiene so zu justieren, dass B bei Berührung von K_1 gerade auf der Position x = 41,9 cm steht. Anschließend ist wie vorher zu verfahren: Laden der Kugel K_1 mit U = 15 kV, wenn B auf x = 80 cm steht, Messung der Kraftdifferenz $\Delta F = F(d) - F(40 \text{ cm})$ für die Abstände:

d = 3; 3,5; 4; 5; 6; 7; 9 cm.

Tragen Sie Messwerte entsprechend Gl.(7) über $1/4d^2$ auf, ebenso die korrigierten Messwerte F/K_- und diskutieren Sie das Ergebnis wie in Aufgabe 3!

6. Fragen zur Selbstkontrolle

1) Wie lautet das *Coulomb-Gesetz*? Welches universelle Kraftgesetz hat die gleiche Form wie das Coulomb-Gesetz?

2) Was besagt der *Kraftflusssatz* (Gaußsche Satz) der Elektrostatik? Was kann aus ihm hinsichtlich elektr. (Überschuss-)Ladungen im Inneren von Metallen gefolgert werden?

3) Wie ist die *elektrische Feldstärke* definiert, wie das *elektrische Potenzial*?

4) Welchen Verlauf haben elektr. Feldstärke u. Potenzial a) innerhalb und außerhalb einer mit Q geladenen Metallkugel, b) innerhalb und zwischen den Platten eines geladenen Kondensators?

5) Was versteht man unter der *Kapazität* elektr. Leiter und wie kann man sie experimentell bestimmen?

6) Was bedeutet die *elektrische Influenz* und wie wirkt sie auf geladene bzw. ungeladene elektr. Leiter ?