

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 1    |

## 1. Aufgabenstellung

- 1.1. Eine Versuchsanordnung, bestehend aus Faraday-Becher und Elektrometer, ist zu kalibrieren. Mit Ihrer Hilfe ist die Abhängigkeit der auf eine metallisierte Hohlkugel übertragenen Ladungsmenge als Funktion der eingepprägten Spannungsdifferenz gegenüber Erdpotential zu bestimmen.
- 1.2. Die Kraftwirkung zwischen zwei gleichgeladenen metallisierten Hohlkugeln als Funktionen des Abstandes zwischen ihnen (a) und der aufgebrauchten Ladungen (b) ist unter Verwendung einer Torsionswaage nach Coulomb zu untersuchen.
- 1.3. Ähnlich Aufgabe 1.2 ist die Kraftwirkung zwischen einer geladenen Hohlkugel und einer auf Erdpotential gehaltenen Metallplatte zu untersuchen.

|            |  |   |
|------------|--|---|
| Literatur: | Demtröder, W.                                  | Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik<br>Springer Berlin Heidelberg New York<br>4. Ausgabe 2006, S. 1-11, S. 18                            |
|            | Stroppe, H.                                    | Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften<br>Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag<br>11. Auflage 1999, S. 205-213, S. 291 |
|            | Eichler, H. J.<br>Kronfeldt, H.-D.<br>Sahm, J. | Das Neue Physikalischen Grundpraktikum<br>Springer Berlin Heidelberg New York<br>2. Auflage 2006, S. 257-267                                      |

## 2. Grundlagen

### 2.1. Elektrische Ladungen, Coulomb-Gesetz

Elektrische Ladungen sind an die Existenz der Atombausteine *Proton* und *Elektron* gebunden. Diese tragen die kleinste, nicht mehr teilbare Ladungsmenge, die *Elementarladung*, jedoch in unterschiedlicher Qualität, welche durch ein Vorzeichen unterschieden wird. Protonen sind vereinbarungsgemäß positiv und Elektronen negativ geladen. Kennzeichnend für elektrische Ladungen sind die Kraftwirkungen aufeinander, Ladungen mit gleichem Vorzeichen stoßen sich stets ab, ungleichartige dagegen ziehen sich an.

Für elektrische Ladungen gilt das Erhaltungsprinzip, welches besagt, dass sie niemals vernichtet oder aus dem Nichts erschaffen werden können. Es ist jedoch möglich, einen kleinen Teil davon durch geeignete Maßnahmen von einem Körper auf einen anderen zu übertragen, so dass unterschiedlich geladene makroskopische Gebilde entstehen, zwischen denen Kräfte beobachtbar sind. Ein experimentell einfach zu realisierendes Beispiel hierfür ist das Phänomen der Reibungselektrizität, das bereits in der Antike bekannt war.

Nach einer Reihe von Versuchen konnte von *Charles Augustin de Coulomb* um 1785 erstmals ein mathematischer Ausdruck für die Kraft  $\vec{F}_C$  von *Punktladungen*  $Q_1$  und  $Q_2$  aufeinander angegeben werden:

$$|\vec{F}_C| = k_C \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}. \quad (1)$$

$k_C$  ist (analog zu  $G$  im Gravitationsgesetz) die Coulomb-Konstante,  $r$  der Abstand der Punktladungen voneinander und im rechten Teil von (1) bezeichnet  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante.

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 2    |

## 2.2. Elektrische Feldstärke und elektrisches Potential einer Punktladung

Denkt man sich in (1)  $Q_2 = q$  als sehr kleine positive Probeladung und normiert auf  $q$ , dann ergibt sich, wenn der Koordinatenursprung am Ort von  $Q_1 = Q$  festgelegt wird, für beliebige Orte  $\vec{r}$  von  $q$  mit  $|\vec{r}| > 0$  die Definition der *elektrischen Feldstärke*. Sie lautet in vektorieller Form:

$$\vec{E}(\vec{r}) \stackrel{\text{Def}}{=} \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_C(\vec{r})}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q\vec{r}}{r^3}. \quad (2)$$

$\vec{E}(\vec{r})$  kennzeichnet also die Ortsabhängigkeit der Coulombkraft auf eine Probeladung, hier speziell ausgehend von einer Punktladung  $Q$ , und ist ein Beispiel für ein *Vektorfeld*. Bewegt man nun  $q$  unter dem Einfluss der elektrischen Feldkraft, dann muss mechanische Arbeit gegen diese geleistet werden, für  $q$  ändert sich daher die potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$ :

$$\Delta E_{\text{pot}}(\vec{r}) = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{F}_C(\vec{r}) d\vec{r} = -q \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r}. \quad (3)$$

Setzt man für  $\vec{E}$  das Feld einer Punktladung nach (2) ein, dividiert (3) durch die Probeladung  $q$  und legt den Anfangspunkt  $\vec{r}_0$  ins Unendliche (dort sei die potentielle Energie gleich Null), dann führt die Integration auf die Definition des *elektrischen Potentials*  $\varphi$ :

$$\varphi(\vec{r}) \stackrel{\text{Def}}{=} \frac{E_{\text{pot}}(\vec{r})}{q} = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{|\vec{r}|}. \quad (4)$$

$\varphi(\vec{r})$  beschreibt ein so genanntes *Skalarfeld*. Die Differenz der elektrischen Potentiale  $\varphi_2 - \varphi_1$  an zwei verschiedenen Orten heißt *elektrische Spannung*  $U_{21}$ .

Die Gleichungen (2) und (4) lassen sich auch auf Systeme mehrerer Punktladungen bzw. kontinuierliche Ladungsverteilungen verallgemeinern, es gilt (zumindest im Vakuum) das *Superpositionsprinzip*. Zur grafischen Veranschaulichung beider Felder bedient man sich der *Feldlinien* sowie, bei zweidimensionaler Darstellung, der *Äquipotentiallinien* (Abb. 1). Elektrische Feldlinien beginnen an einer positiven Ladung und enden an einer negativen. Tangenten an die Feldlinien zeigen immer in Richtung des Feldstärkevektors, die Dichte der Feldlinien erlaubt Rückschlüsse auf seinen Betrag.

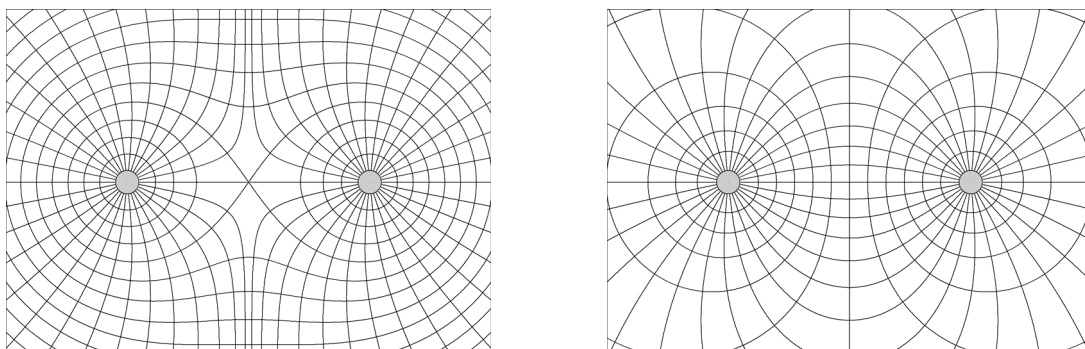


Abb. 1: Feld- und Äquipotentiallinien zwischen zwei gleichen (a) und entgegengesetzt gleichen Ladungen (b)

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 3    |

Äquipotentiallinien sind Schnittbilder von Flächen konstanten Potentials mit der Zeichenebene. Sie sind in sich geschlossen und kennzeichnen Bewegungspfade, längs derer sich die potentielle Energie einer Probeladung nicht ändert. Elektrische Feldlinien verlaufen stets senkrecht durch die Äquipotentialflächen.

In Abb. 1 sind bewusst kleine Kugeln als Quellen bzw. Senken elektrischer Feldlinien dargestellt, weil das Konzept der Punktladung zu dem Problem führt, dass die Feldstärke mit kleiner werdendem Abstand zum Ort der Ladung über alle Maßen anwachsen würde. Denkt man sich jedoch eine kleine Kugel mit elektrisch leitfähiger Oberfläche und überträgt auf sie die Ladungsmenge  $Q$ , dann verteilen sich die Ladungsträger aufgrund ihrer gegenseitigen Abstoßung und Beweglichkeit sofort so, dass an der Kugeloberfläche keine Tangentialkomponente des elektrischen Feldes mehr vorkommt. Bei Abwesenheit weiterer störender Ladungen ist die Verteilung homogen und die Feldlinien gehen von der Kugeloberfläche radial aus, als kämen sie aus dem Kugelmittelpunkt, einer virtuellen Punktladung.

### 2.3. Metalle im elektrostatischen Feld, Influenz

Nähert man einen elektrisch geladenen Körper einer geerdeten, also insgesamt ungeladenen Metallplatte, dann lässt sich zwischen beiden dennoch eine anziehende Kraft feststellen. Ursache hierfür ist, dass die frei beweglichen Ladungsträger (Elektronen) des Metalls sich solange umverteilen, bis parallel zur Oberfläche und im Innern des Metalls keine elektrischen Feldkräfte mehr auftreten. Man nennt diese Erscheinung *Influenz*. Aufgrund der jetzt inhomogenen Oberflächenladungsdichte überlagern sich die elektrischen Felder des geladenen Körpers und der Metallplatte derart, dass die Feldlinien stets senkrecht in die Metalloberfläche einmünden.

- Im Innern von Körpern mit elektrisch leitender Oberfläche gibt es kein elektrisches Feld (*Faradayscher Käfig*). Das elektrische Potential ist daher überall konstant.
- Metalloberflächen im elektrischen Feld sind auch immer Äquipotentialflächen.

Influenz spielt bei allen drei Teilaufgaben dieses Versuches eine wichtige Rolle. Die quantitative Behandlung der auftretenden Kräfte bzw. Ladungsverteilungen würde den Rahmen dieser Versuchsanleitung sprengen und wird, wenn überhaupt, nur ansatzweise vorgestellt.

Faraday-Becher: Ein oben offener, metallischer Hohlzylinder sei elektrisch isoliert aufgestellt. Bringt man einen geladen Körper (Ladung  $Q$ ) in das Innere des Zylinders, ohne die Metallwände zu berühren, dann führt die Ladungstrennung in der Zylinderwandung dazu, dass genauso viele Ladungen auf der Außenoberfläche influenziert werden wie der Körper trägt. Ist der Faraday-Becher von einem auf Erdpotential gehaltenen, metallischen Schirm umgeben, dann kann durch Messung der Spannung  $U_{FB}$  zwischen beiden Zylindern die eingebrachte Ladungsmenge bestimmt werden. Hierzu muss die Gesamtkapazität  $C_0$  der Anordnung bekannt sein. Für den so realisierten Kondensator gilt:

$$Q = U_{FB} C_0 \quad (5)$$

Wird die Ladung auf dem Körper für weitere Experimente nicht mehr benötigt, dann kann man sie auch übertragen, indem der Körper im Faraday-Becher kurz ablegt wird. Die Ladung fließt sofort auf die äußere Metallfläche ab und für die gemessene Spannung zwischen den Zylindern gilt wieder (5).

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 4    |

Coulombkraft zwischen metallisierten Kugeln: Das Experiment zur Überprüfung des Kraftgesetzes nach Coulomb wird mit geladenen Kugeln anstelle von Punktladungen durchgeführt. Je geringer der Abstand der Kugeln voneinander wird, desto stärker ist der Einfluss der gegenseitigen Influenz und die gemessene Kraft zwischen ihnen unterscheidet sich zunehmend vom  $\sim 1/r^2$ -Zusammenhang zwischen Punktladungen.

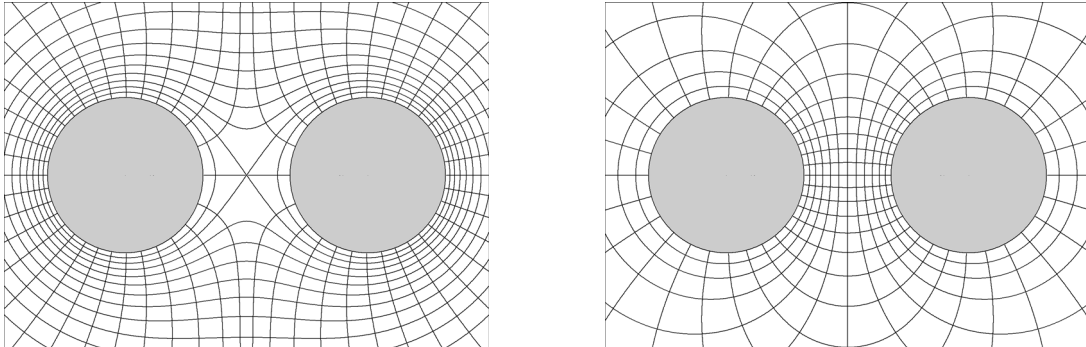


Abb. 2: Feld- und Äquipotentiallinien zwischen zwei gleichgeladenen (a) und entgegengesetzt gleich geladenen Metallkugeln (b), das Verhältnis Kugelradius zu Abstand der Mittelpunkte beträgt  $R/r \approx 0,32$ , Wahl der Äquipotentiallinien im Unterschied zur Darstellung in Abb. 1 so, dass zwischen benachbarten Linien immer die gleiche Potentialdifferenz besteht

Die tatsächlich auftretende Kraft lässt sich berechnen, wenn man ein System von virtuellen Ersatzladungen im Innern beider Kugeln konstruiert, deren überlagerte Potentiale das geforderte konstante Potential auf beiden Kugeloberflächen ergibt (Abb. 2). Anschließend summiert man über die Kräfte zwischen allen aufeinander einwirkenden Ladungen (Tabelle hierzu im Anhang).

Bildladung: Eine positive Punktladung  $Q_1$  soll sich im Abstand  $d$  vor einer geerdeten Metallplatte befinden. Als Folge der Influenz verteilen sich die Elektronen im Metall so um, dass die Forderung nach konstantem Potential auf der Oberfläche erfüllt wird, es dürfen also nur Feldkomponenten senkrecht hierzu vorkommen. Denkt man sich eine entgegengesetzt gleich geladene Punktladung  $Q_2$  im Abstand  $d$  rechts vom Metall, dann sieht man sofort, dass die parallel zur Metalloberfläche gerichteten Feldstärkekomponenten sich stets aufheben (Abb. 3).

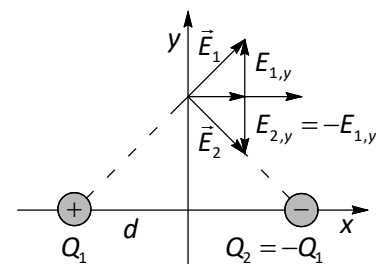


Abb. 3: zur Bildladung

Zum gleichen Ergebnis führt die Untersuchung der Forderung  $\varphi=0$  für die gesamte Metalloberfläche, indem zur Berechnung des Gesamtpotentials Gl. (4) verwendet wird. Man findet schließlich einen Ausdruck für die Kraft zwischen Punktladung und Metallplatte (Bildkraft), die derjenigen zwischen zwei im Abstand  $2d$  platzierten, entgegengesetzt gleichen Ladungen äquivalent ist:

$$|\vec{F}_B| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1^2}{4d^2}. \quad (6)$$

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 5    |

### 3. Messanleitung

Allgemeine Hinweise: Elektrische Ladungen sind äußerst beweglich und experimentell schwierig zu handhaben. Aufgrund der starken Wechselwirkungskräfte untereinander finden sie immer Kriechwege, geladene Körper zu verlassen. Um dennoch zu reproduzierbaren Messergebnissen zu gelangen, sind folgende Punkte durch die experimentierende Person zu beachten bzw. wurden beim Aufbau des Versuchsplatzes berücksichtigt:

- Hohe Luftfeuchtigkeit ist der Hauptfeind elektrostatischer Experimente, daher wird dieser Versuch bevorzugt in der kalten Jahreszeit durchgeführt. Im Laborraum ist eine weitestgehend zugfreie Lüftung gewährleistet, darüber hinaus schützen Trennwände den Versuchsaufbau vor Luftbewegungen.
- Die sehr guten Isolationseigenschaften der Träger für die geladenen Kugeln dürfen nicht durch Berühren mit den Fingern beeinträchtigt werden. Gegebenenfalls wird eine Reinigung mit Ethanol oder destilliertem Wasser empfohlen.
- Insbesondere beim Experimentieren mit der Torsionswaage sind störende elektrische Ladungen in deren Nähe zu vermeiden. Der Versuchstisch besteht aus isolierendem Material, sein Rahmengerüst wird elektrisch auf Erdpotential (Masse) gehalten. Die den Versuch durchführende Person sollte möglichst keine synthetische Kleidung tragen und das Auftreten weiterer elektrostatischer Aufladungen mittels eines Antistatik-Erdungsarmbands verhindern.

#### 3.1. Faraday-Becher/Kugelladung

Das Übertragen einer definierten Ladung auf die Probekugeln geschieht durch kurzen Kontakt mit einer auf konstantem Potential gehaltenen, polierten Metallkugel. Die elektrische Spannung zwischen ihr und Masse wird durch ein Hochspannungsnetzgerät bereitgestellt.

#### **Achtung!**

***Trotz hoher Spannung liefert das Netzgerät keine Ströme, die für den menschlichen Körper gefährlich sein könnten. Dennoch dürfen die Maßnahmen zur Verhinderung eines direkten elektrischen Kontakts nicht außer Kraft gesetzt werden. Eine Buchse des Hochspannungsausgangs (z. B. der Minuspol) ist mit der grüngelben Erdbuchse auf der Gerätefrontplatte zu verbinden.***

Zur Bestimmung der auf einem Körper befindlichen Ladung  $Q$  stehen am Versuchsplatz ein Faraday-Becher mit Isolierschirm sowie ein sehr hochohmiges Spannungsmessgerät (Elektrometer) zur Verfügung. Der Eingang des Elektrometers wird mithilfe eines BNC-Kabels mit dem Faraday-Becher verbunden (Abb. 4). Die Massebuchse des Gerätes ist schließlich noch mit der Erdbuchse des Netzgerätes zu verbinden.

***Auf keinen Fall darf während der Experimente die mit dem Netzgerät verbundene Metallkugel den Elektrometereingang, d. h. den inneren Korb des Faraday-Bechers, berühren!***

Nach dem Einschalten des Elektrometers ist zunächst der unempfindlichste Messbereich (100V) einzustellen. Eventuell vorhandene Restladungen der Anordnung entfernt man durch Drücken der ZERO-Taste bei gleichzeitigem Verbinden beider Metallzylinder mit einer Hand.

Wichtig: Beim Zurücknehmen der Hand immer zuerst die Finger vom Innenbehälter lösen!

|                     |                               |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau          | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut für Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 6    |

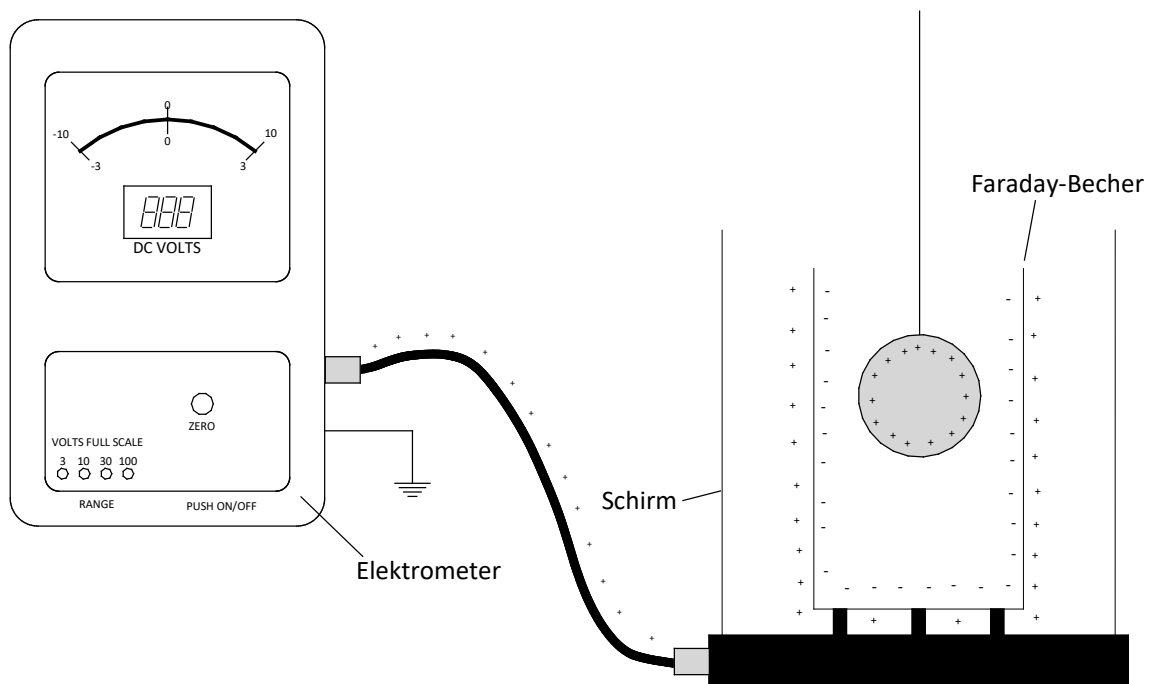


Abb. 4: Messanordnung zur Bestimmung der elektrischen Ladung  $Q$  auf Körpern

Mithilfe einiger qualitativer Experimente kann man die Funktionsweise der Messanordnung kennenlernen:

- Vorsichtig eine Hand in den Faraday-Behälter tauchen, ohne ihn zu berühren. Bei angelegtem Antistatik-Erdungsarmband sollte am Elektrometer keine Spannung feststellbar sein.
- Eine Probekugel am Nylonfaden, fertigungsgleich wie die Kugel an der Torsionswaage, wird zunächst kurz mit Erdpotential (Außenbehälter) verbunden und in den Faraday-Behälter gebracht. Auch hier sollte das gleiche Ergebnis erscheinen. Falls am Elektrometer eine geringe Spannung angezeigt wird, könnten elektrische Ladungen auf der Probekugel influenziert worden sein. Ursache hierfür ist zumeist die zu nah am Faraday-Behälter aufgestellte, mit dem Netzgerät verbundene Metallkugel auf hohem elektrischen Potential.
- Am Hochspannungsnetzgerät wird eine Ausgangsspannung  $U = 6\text{ kV}$  eingestellt und die Probekugel auf dieses Potential gebracht. Taucht man diese jetzt zügig, aber ohne die Wandung zu berühren, in den Faraday-Behälter, so resultiert hieraus eine Spannungsdifferenz  $U_{FB}$  zwischen den beiden Metallzylindern. Der Vorgang ist einige Male wiederholbar und demonstriert möglicherweise auch den Ladungsverlust an der Probekugel.
- Der Versuch wird wiederholt mit dem Unterschied, dass die Probekugel kurz im Faraday-Behälter abgelegt wird. Sie ist jetzt entladen und kann entfernt werden, ohne dass die Spannung  $U_{FB}$  sich ändert. Gemäß Gl. (5) ist somit die ursprünglich auf der Probekugel befindliche Ladung  $Q$  bestimmbar, die Gesamtkapazität  $C_0$  der Anordnung Faraday-Behälter, Messkabel und Elektrometer ist jedoch noch unbekannt (Ermittlung wird zur ersten Messaufgabe).

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 7    |

Für die Bestimmung von  $C_0$  und der Ladung  $Q$  steht ein veränderlicher Plattenkondensator (Drehkondensator, Kapazität  $C_z$  in Stufen einstellbar) zur Verfügung, der parallel zur Anordnung Elektrometer/Faraday-Becher geklemmt werden kann. Hierdurch realisiert man eine Parallelschaltung von Kapazitäten, und für die Gesamtkapazität der Messanordnung gilt  $C_{ges} = C_0 + C_z$ . Aus Gl. (5) wird dann:

$$C_z = \frac{Q}{U_{FB}} - C_0 \quad (7)$$

$C_0$  enthält jetzt auch noch die Kapazität der Verbindungsleitung zum Drehkondensator sowie seine Restkapazität bei Linksanschlag des Drehknopfes. In dieser Stellung wird die Messung begonnen, indem man die geladene Probekugel im Faraday-Becher ablegt und  $U_{FB}$  ( $C_z = 0$ ) notiert. Zügig wird  $C_z$  schrittweise erhöht und jeweils  $U_{FB}$  dazu ermittelt. Das Experiment ist kurz und sollte für eine eingestellte Netzteilspannung fünfmal wiederholt werden.  $U_{FB}$  ist dann zu mitteln, die Werte von  $C_z$  sind dem Aufdruck am Kondensatorgehäuse zu entnehmen. Trägt man in einem Diagramm  $C_z$  über  $1/U_{FB}$  auf, dann sollte sich ein linearer Zusammenhang zeigen. Eine berechnete Ausgleichsgerade liefert mit ihrem Anstieg die gesuchte Ladung  $Q$ , darüber hinaus kann am Absolutglied die Kapazität  $C_0$  der Anordnung abgelesen werden.

Das Experiment ist für weitere eingestellte Spannungen  $U$  am Netzgerät zu wiederholen, insgesamt für  $U = (1kV \dots 6kV)$  in Schritten von jeweils  $1kV$ . Die gefundenen Ladungen  $Q$  sind danach als Funktion der Netzteilspannung grafisch darzustellen und man erhält, wiederum mittels linearer Regression, den Zusammenhang  $Q(U)$ .

### 3.2. Kraft zwischen geladenen Kugeln

Im vorliegenden Versuchsaufbau erfolgt, in Anlehnung an die Experimente von Coulomb, die Bestimmung der sehr kleinen Kräfte zwischen den geladenen Körpern mithilfe einer Dreh- oder auch Torsionswaage. Ihr Funktionsprinzip geht auf *John Michell (1724-1793)* zurück.

Zwischen Winkelmesstisch und einer Blattfeder ist ein dünner Metalldraht mit kreisförmigem Querschnitt eingespannt. Nicht zwingend auf halber Länge des Drahtes ist der Halter für die geladene Kugel zusammen mit einem Gewichtsausgleichsflügel festgeklemmt.

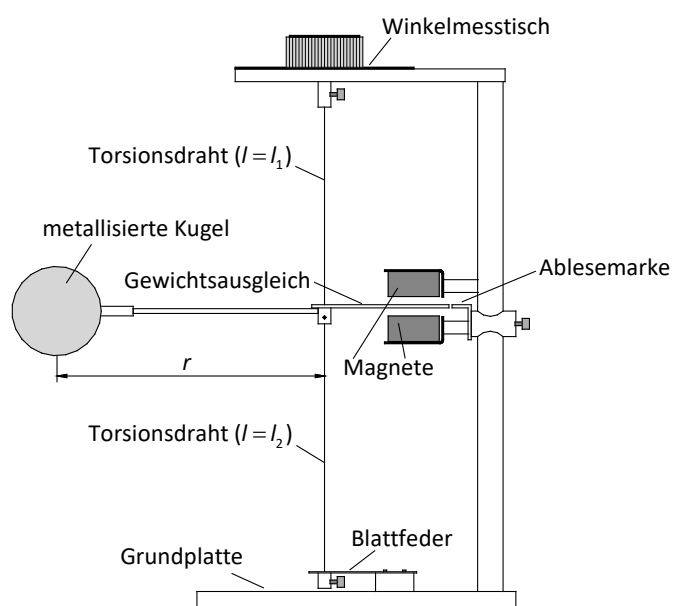


Abb. 5: Torsionswaage

erlaubt die genaue Feststellung der

Gleichgewichtsposition der Anordnung (Abb. 5). Wirkt auf die geladene Kugel eine Kraft (z. B. senkrecht

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 8    |

$l_1$  bzw.  $l_2$ ). Durch Verdrehen der oberen Drahtklemme wird die Gleichgewichtsposition der Waage wiederhergestellt, der Messtisch zeigt den Torsionswinkel  $\alpha$  des oberen Drahtstücks an. Der Zusammenhang zwischen  $\alpha$  und der auf die Kugel wirkende Kraft ist am Versuchsplatz ausgelegt.

**Achtung!**

**Die Torsionswaage ist ein empfindliches Messinstrument. Jegliche Überbeanspruchungen des Torsionsdrahtes sind zu vermeiden. Bei Nichtgebrauch der Waage ist der Gewichtsausgleichsflügel so mithilfe einer schwenkbaren Klemme zu fixieren, dass er sich etwa in der Mitte zwischen den Dämpfungsmagneten befindet.**

Für diesen Versuchsteil wird die Verschiebeeinheit mit der beweglichen Kugel von links an die Torsionswaage geschraubt. Nach Lösen der Fixierklemme und Ausrichten der Ablesemarken auf gleiche Höhe sind folgende Justierschritte durchzuführen:

- Der Verschiebetisch wird auf die Position doppelter Kugelradius, d. h.  $r = 2R = 4\text{ cm}$ , geschoben und das Tragrohr in seiner Klemme so justiert, dass sich die Torsionswaage bei Berührung beider Kugeln in ihrer Gleichgewichtsstellung befindet. Es empfiehlt sich, den Winkelmesstisch etwas aus seiner Nullstellung zu drehen, damit die Kugeln leicht gegeneinander drücken.
- Die verschiebbare Kugel wird soweit wie möglich von der Torsionswaage entfernt platziert, der Winkelmesstisch auf  $\alpha = 0^\circ$  gestellt und beide Kugeln durch vorsichtiges Berühren mit einem Massekabel entladen. Sollte die Waage nicht an der Gleichgewichtsposition zur Ruhe kommen, erfolgt eine genaue Justage durch geringfügiges Verdrehen der unteren Drahtklemme.
- Zur Erleichterung der späteren Messungen (Winkelmesstisch verdreht, aber keine Kraft auf die Kugel) kann die am Versuchsplatz vorhandene Konstruktion aus Stativmaterial als Bewegungsanschlag für den Gewichtsausgleichsflügel aufgestellt werden.

Das Aufladen beider Kugeln erfolgt zur Vermeidung von gegenseitiger Influenz grundsätzlich bei größtmöglichem eingestelltem Abstand voneinander. Danach wird die verschiebbare Kugel zügig an ihre Sollposition gebracht und  $\alpha$  der Torsionswaage bestimmt. Die Messungen sind mehrmals zu wiederholen, wobei als Qualitätskriterium eine Reproduzierbarkeit der Ablesung von einem, höchstens zwei Grad dienen soll.

a) Abstandsabhängigkeit, Netzteilspannung konstant bei  $U = 5\text{ kV}$

Die Messungen erfolgen, wie oben beschrieben, im Bereich von  $r = (20 \dots 5)\text{ cm}$ , wobei oberhalb von  $r = 10\text{ cm}$  eine Schrittweite von  $2\text{ cm}$  genügt, diese dann unterhalb  $r = 10\text{ cm}$  auf  $1\text{ cm}$  verkürzt wird.

Aus  $\alpha$  und den am Versuchsplatz ausliegenden Kalibrierdaten der Torsionswaage gewinnt man zunächst die tatsächlich wirkende Kraft  $F$  zwischen den geladenen Kugeln, deren Abstandsabhängigkeit jedoch nicht Gl. (1) folgt, sondern als Folge der gegenseitigen Influenz um einen Faktor  $K_+(r, R)$  geringer ausfällt (Zahlenwerte hierzu im Anhang).



|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 9    |

Man berechnet zunächst die korrigierte Kraft

$$F_k = \frac{F}{K_+(r, R)}, \quad (8)$$

und stellt diese in einem Diagramm über dem reziproken Abstandsquadrat  $1/r^2$  dar. Eine Ausgleichsrechnung des erwarteten linearen Zusammenhangs liefert gemäß (1) den Geradenanstieg

$$S = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0}, \quad (9)$$

aus dem mit den Versuchsergebnissen aus 3.1 die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$  einschließlich der kombinierten Unsicherheit zu berechnen ist.

b) Ladungsabhängigkeit, Abstand konstant bei  $r = 10\text{ cm}$

Die Messungen werden analog zu a) durchgeführt, wobei der Abstand zwischen den geladenen Kugeln immer wieder gleich eingestellt wird. Die Netzteilspannung ist hierbei von  $U = (2,0 \dots 6,0)\text{ kV}$  in Schritten von  $0,5\text{ kV}$  zu variieren und die gemessene Kraft wieder nach (8) zu korrigieren. Eine grafische Darstellung der korrigierten Kraft  $F_k$  über dem Quadrat der Kugelladung  $Q^2$  ermöglicht die Überprüfung des linearen Zusammenhangs nach (1), aus dem Anstieg der berechneten Ausgleichsgeraden

$$S = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (10)$$

ist wiederum  $\epsilon_0$  einschließlich seiner kombinierten Unsicherheit zu berechnen und mit dem Versuchsergebnis aus 3.2a) sowie dem Tabellenwert zu vergleichen.

### 3.3. Bildkraft an Metallplatte

Für diesen Versuchsteil wird die Verschiebeeinheit mit der beweglichen Metallplatte von rechts an die Torsionswaage geschraubt und die Metallplatte mit einem Massekabel verbunden. Die Längenskala zeigt den Abstand  $d$  zwischen Kugelmittelpunkt und Metalloberfläche an (vgl. Abb. 3).

In Erweiterung des Modells „Bildladung“ auf einen kugelförmigen geladenen Körper, der sich einer geraden Metalloberfläche nähert, ist die Kraftwirkung zwischen beiden äquivalent derjenigen zu einer in der Entfernung  $r = 2d$  befindlichen, entgegengesetzt geladenen und gleichgroßen Metallkugel. Die Abstandsabhängigkeit der auftretenden anziehenden Kraft folgt hierbei wieder nicht Gl. (1), sondern ist um einen Faktor  $K_-(r, R)$  vergrößert, so dass für eine quantitative Auswertung der Versuchsdaten eine Kraftkorrektur ähnlich (8) erfolgen muss.

Erschwerend für die Durchführung dieses Versuchsteils ist die Tatsache, dass die Torsionswaage nur bis zu einer gewissen minimalen Distanz  $d_{\min}$  stabil in die Gleichgewichtsposition gebracht werden kann ( $d_{\min} \sim Q^{2/3}$  Herleitung hierzu am Versuchsplatz). Deshalb wird zunächst eine Spannung  $U = 2\text{ kV}$  am Netzteil vorgeschlagen. Die Messungen werden, ähnlich wie unter 3.2 a) beschrieben, beginnend bei  $d = 10\text{ cm}$  durchgeführt und ausgewertet.  $d$  ist jeweils um  $1\text{ cm}$  zu verringern, bis die Stabilitätsgrenze erreicht ist.

Das Experiment kann danach qualitativ für  $U = 5\text{ kV}$  wiederholt werden.

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch E7 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Coulombsches Gesetz</b>    | Seite 10   |

#### 4. Anhang

Korrekturtabelle zu den zwischen zwei gleichgroßen geladenen Metallkugeln auftretenden Kräften im Vergleich zu Punktladungen gleichen Abstands.  $K_+$  gilt für gleich geladene Kugeln (Abstoßung),  $K_-$  für entgegengesetzt gleich geladene (Anziehung). Während  $K_+$  bis zur gegenseitigen Berührung der Kugeln berechenbar ist, wächst  $K_-$  für diesen Fall über alle Maßen an. Für den praktischen Gebrauch genügt ein Runden der Korrekturfaktoren auf die dritte Nachkommastelle.

$R$  - Radius der Hohlkugeln,  $r$  - Abstand der Kugelmittelpunkte bzw. Punktladungen

| $R[cm]$ | $r[cm]$ | $R/r$     | $K_+$     | $K_-$     |             |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 2,0     | 20      | 0,1000000 | 0,9959537 | 1,0040754 |             |
|         | 19      | 0,1052632 | 0,9952757 | 1,0047641 |             |
|         | 18      | 0,1111111 | 0,9944373 | 1,0056180 |             |
|         | 17      | 0,1176471 | 0,9933879 | 1,0066905 |             |
|         | 16      | 0,1250000 | 0,9920569 | 1,0080566 |             |
|         | 15      | 0,1333333 | 0,9903433 | 1,0098254 |             |
|         | 14      | 0,1428571 | 0,9880990 | 1,0121588 |             |
|         | 13      | 0,1538462 | 0,9851023 | 1,0153053 |             |
|         | 12      | 0,1666667 | 0,9810105 | 1,0196595 |             |
|         | 11      | 0,1818182 | 0,9752772 | 1,0258769 |             |
|         | 10      | 0,2000000 | 0,9669979 | 1,0351069 |             |
|         | 9       | 0,2222222 | 0,9546121 | 1,0495102 |             |
|         | 8       | 0,2500000 | 0,9353046 | 1,0735500 |             |
|         | 7       | 0,2857143 | 0,9037796 | 1,1177871 |             |
|         | 6       | 0,3333333 | 0,8499325 | 1,2133697 |             |
|         | 5       | 0,4000000 | 0,7568189 | 1,5040458 |             |
|         |         | 4,0008    | 0,4999000 | 0,6150305 | 186,0638149 |
|         |         | 4         | 0,5000000 | 0,6149019 |             |