

IE1

Modul Elektrizitätslehre

Coulomb'sches Gesetz und ϵ_0

In diesem Experiment soll das Coulomb'sche Gesetz experimentell überprüft werden. Aus den Messungen soll weiterhin ϵ_0 - die Permittivität des Vakuums - bestimmt werden.

Versuch IE1 - Coulomb'sches Gesetz und ϵ_0

In diesem Experiment soll das Coulomb'sche Gesetz experimentell überprüft werden. Aus den Messungen soll weiterhin ϵ_0 - die Permittivität des Vakuums - bestimmt werden.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Wie lautet das Coulomb'sche Gesetz? Benenne alle auftretenden Grössen.
- Was versteht man unter der Permittivität des Vakuums und welcher Zusammenhang besteht zwischen ϵ_0 , der Permeabilität des Vakuums μ_0 und der Lichtgeschwindigkeit?
- Recherchiere den Literaturwert von ϵ_0 und leite deren Einheit aus dem Coulomb'schen Gesetz ab
- Welche Eigenschaften besitzen elektrische Feldlinien, d.h welche Richtung haben sie und warum? Die Dichte der elektrischen Feldlinien ist ein Mass für welche Grösse?
- Im Coulomb'schen Gesetz tritt nur eine Probeladung, sowie die zu vermessene Ladung auf. Betrachte nun aber den Fall, dass mehrere Ladungen vorhanden sind. Wie sieht dann das Columb'sche Gesetz aus, bzw. wie wird die resultierende Kraft berechnet?
- Was versteht man unter dem Begriff Torsion?
- Denke darüber nach was geschieht wenn zwei Metallkugel zusammengeführt werden. Beschreibe für jeden der vier folgenden Fällen ob sich die Kugel an- oder abstossen oder überhaupt nichts geschieht: 1) beide Kugeln sind positive geladen; 2) eine Kugel ist positiv und eine negative geladen; 3) beide sind negative geladen; 4) eine ist positive geladen, die andere ist neutral.

1.2 Theorie

1.2.1 Einleitung

Alle in der Natur auftretenden Kräfte lassen sich auf vier Grundkräfte zurück führen, welche als die vier FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN DER PHYSIK bezeichnet werden. Diese vier Grundkräfte sind die Gravitation, die schwache Kernkraft, die starke Kernkraft und die elektromagnetische Kraft. Gegenstand dieses Experiments soll die elektromagnetische Kraft sein, welche im Alltag in Form von Licht, Magnetismus und Elektrizität allgegenwärtig ist. Weiterhin spielt sie eine entscheidende Rolle im Aufbau von Atomen, Molekülen und Festkörpern. Lapidar ausgedrückt ist die elektromagnetische Kraft der Grund dafür, dass Du diese Anleitung überhaupt in Händen halten kannst und Deine Hände nicht einfach durch das Papier hindurch greifen können!

1.2.2 Das Coulomb'sche Gesetz

Die elektromagnetische Kraft manifestiert sich, wie eingangs bereits erwähnt, unter anderem im Phänomen der Elektrizität. Wir wollen uns hier den Grundlagen der ELEKTROSTATIK widmen. Wir behandeln also zeitlich konstant elektrische Felder und Kräfte, welche von elektrischen Ladungen verursacht werden.

In der Natur treten zwei verschiedene Arten von elektrischen Ladungen auf, welche als positive- und negative Ladungen bezeichnet werden. Diese Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Gleichnamige Ladungen stossen sich ab, währen ungleichnamige Ladungen sich gegenseitig anziehen. Jedoch besagt eines der fundamentalen Prinzipien der Physik, dass elektrische Ladungen weder erzeugt noch vernichtet werden können - man spricht von der LADUNGS-ERHALTUNG.

Haben zwei elektrische Ladungen den Abstand r zu einander, so üben sie folgende Kraft auf einander aus:

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

Die Kraft ist also direkt proportional zur Grösse der Ladungen q_1 und q_2 , sowie zu r^{-2} . Man sagt auch die Kraft fällt quadratisch mit dem Abstand ab. Dabei handelt es sich um ein unterschiedenes Charakteristikum dieses Gesetzes. Weiterhin tritt der konstante Faktor $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$ auf. ϵ_0 ist eine Naturkonstante, welche als PERMITTIVITÄT DES VAKUUMS oder ELEKTRISCHE FELDKONSTANTE bezeichnet wird¹. Somit ist das COULOMB'SCHE GESETZ vollkommen analog zum NEWTON'SCHEN GRAVITATIONSGESETZ, nur dass hier die Ladung die Rolle der Masse einnimmt und eine andere Naturkonstante als Vorfaktor auftritt!

Gleichung 1.1 gibt jedoch nur den Betrag der Kraft an, nicht jedoch die Richtung. Da eine Kraft jedoch immer eine Richtung besitzt, empfiehlt es sich das COULOMB'SCHE GESETZ in der so genannten vektoriellen Form zu schreiben:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^2} \cdot \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|} \quad (1.2)$$

Hier werden also explizit die Ortsvektoren \vec{r}_1 und \vec{r}_2 verwendet. Der hier neu auftretende Term $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)/|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ ist ein normierter Richtungsvektor und gibt die Richtung an, in welche die Kraft wirkt.

Es ist interessant zu erwähnen, dass das elektrostatische COULOMB'SCHE GESETZ analog ist zum NEWTON'SCHEN GRAVITATIONSGESETZ $F_G = Gm_1m_2/r^2$. Die elektrische Ladung übernimmt die selbe Rolle wie die zwei Massen und die Gravitationskonstante G wird vom Vorfaktor $1/(4\pi\epsilon_0)$ ersetzt.

1.2.3 Torsion

Die Torsion ist ein Phänomen der Mechanik, welches man sich in diesem Versuch zu nutze macht, um elektrische Kräfte zu messen. Sie beschreibt die Verdrehung eines Objekts und ist abhängig von der Form des Objekts, sowie von den Eigenschaften des Materials, aus welchem das zu verdrehende Objekt besteht. In diesem Experiment wird eine Torsionswaage verwendet, welche man als ein Torsionspendel auffassen kann.

Solch ein Torsionspendel kann in der Mechanik als harmonischer Oszillator behandelt werden. Sobald das Pendel wieder in Ruhelage ist kann die Rotation θ durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\theta = \frac{F_T L}{D}, \quad (1.3)$$

mit F_T dem angewandten Drehmoment, L ist die Distanz vom Pendeldraht bis zum Zentrum der Kugel (Ball 2 in Abbildung 1.1), und D ist das intrinsische Wiederherstellungsmoment des Pendels. In diesem Versuch ist $D \approx 3 \cdot 10^{-4} Nm$. Der genaue Wert steht auf dem Fuss des Torsionspendels. Zusätzlich nehmen wir an, dass die Coulomb Kraft F_C zu 100% auf das Drehmoment wirkt d.h. $F_T = F_C$.

Wir messen die Rotation des Pendels, in dem einen Laser am Spiegel reflektieren lassen, welcher am Pendel befestigt ist. Der Laserstrahl trifft dann auf Skala, so dass wir mit einfach Trigonometrie die Änderung des Winkels berechnen können. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Änderung des Winkels welche mit dem Laser gemessen wird dem doppelten Winkel des Torsionspendels entspricht. D.h. wenn der Laser den Winkel α misst, entspricht dies der Rotation des Pendels $\theta = \alpha/2$.

¹ $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

1.3 Experiment

In diesem Experiment wirst Du mit Hilfe einer Torsionsdrehwaage die Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln bestimmen, als Funktion des Abstands dieser beiden Kugel und ihrer Ladung. Aus den Messdaten kann anschliessend die Permittivität des Vakuums bestimmt werden.

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit diese Versuchs und der nötigen Eichung der Messung, um Absolutmessungen der Kraft zu ermöglichen, ist dieser Versuch zum grössten Teil bereits fertig aufgebaut. Die Studenten sind dazu angehalten, möglichst vorsichtig und verantwortungsbewusst mit der Apparatur umzugehen. Dies gilt vor allem auch für den Betrieb der Hochspannungsquelle, welche Spannungen bis 25 kV liefert!

Beachte: Die Kugeln können ihre Ladungen sehr schnell mit variierenden Ladungsverlusten verlieren, z.B. durch die Witterungsverhältnisse. Dies verursacht Schwierigkeiten bei der Messung und führt zu Unregelmässigkeiten in den Resultaten. Es ist deshalb wichtig, die Messungen oft zu wiederholen und über die Messpunkte zu mitteln, um ein analysierbares Resultat zubekommen.

1.3.1 Versuchszubehör

Gegenstand	Anzahl
Laser	1
Netzgerät	1
Hochspannungsquelle	1
Torsionswaage	1
Elektrometer-Verstärker	1
Kugeln	3
Massstab auf Stativ	1
Stativ für Abstandsmessung	1

1.3.2 Versuchsdurchführung

- Überprüfe die Vollständigkeit (siehe 1.3.1) des Versuchs und überlege dir, wie die geladene Kugel auf dem Stativ im Bezug auf die Kugel auf der Torsionswaage positioniert werden muss, um korrekte Messungen vorzunehmen. Diskutiere diesen Gesichtspunkt gegebenenfalls mit dem zuständigen Betreuer.
- Verkable das Hochspannungsgerät und den Elektrometer-Verstärker gemäss Abbildung 1.1).
- Befülle das Glasgefäss mit Wasser und führe vorsichtig die Dämpfungsfahne (vgl: Abbildung 1.1) in das Wassergefäss ein. Stelle sicher, dass die Bewegung der Dämpfungsfahne nicht durch die Wände des Glasgefässes behindert wird. Da das Glasgefäss relativ klein ist muss die Position des Glasgefässes der Aufgabe angepasst werden.
- Mache dich damit vertraut, wie man die Kugel lädt. Stelle den Hochspannungsgenerator auf 15 kV ein. Berühre vorsichtig nacheinander jede Kugel mit dem Hochspannungsgerät und schalte den Hochspannungsgenerator wieder aus. Die Kugel dürfen sich nach dem Berühren nicht bewegen!

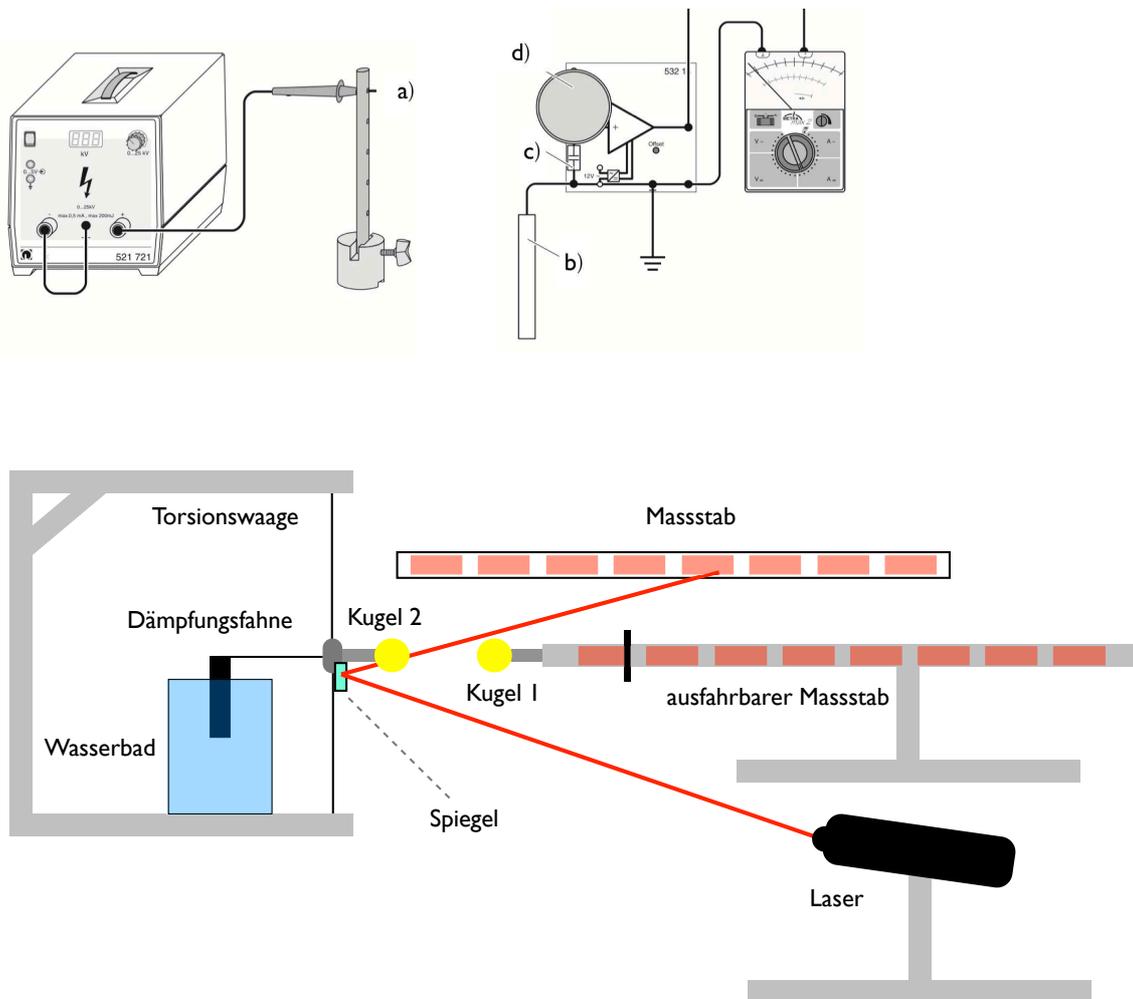


Abbildung 1.1: Auf der linken Seite dieser Abbildung ist das Hochspannungsnetzgerät und die daran angeschlossene Spitze zu erkennen, welche dazu verwendet wird, im Experiment die Kugeln 1 und 2 aufzuladen. Auf der rechten Seite ist die Elektrometer-Verstärker Schaltung zu erkennen mit dem Faraday-Becher d), dem Kondensator c) und dem Anschlussstab b), welcher für die Entladung der Kugel 1 bzw. der Kugel 2 verwendet werden soll. Die untere Skizze zeigt schematisch den eigentlichen Versuchsaufbau mit der Torsionswaage, den zu ladenden Kugeln, dem Laser und dem Massstab, welcher zu Messung der Auslenkung der Torsionswaage dient.

- **Mache dich mit der Messung des Drehwinkels des Torsionspendels vertraut.** Justiere das Lineal und den Laser so, dass die Messungen für einen angemessenen Winkelbereich durchführen können. Notiere dir die Position des Laserpunkts auf dem Lineal (den Nullpunkt) und messe den Abstand vom Spiegel zum Lineal. **Wenn du den Laser oder das Lineal während des Experiments bewegst, muss der Nullpunkt und den Abstand zwischen Spiegel und Lineal erneut gemessen werden.** Lade die Kugeln auf und beobachte, wie sich der Laserpunkt auf dem Lineal bewegt. Schätze die Unsicherheit, mit der du den maximalen Drehwinkel bestimmen kannst.
- **Kalibrierung:** Um Berechnungen nach dem Coulombschen Gesetz durchführen zu können, müssen wir die Ladung der einzelnen Kugeln kennen. Die Ladung wird durch die Einstellung bestimmt, die wir für die Hochspannungsversorgung gewählt haben (5 kV, 10 kV, 15 kV usw.) und sollte zu dieser Einstellung linear proportional sein: $q \propto V_{HV}$,

dabei ist q die Ladung eines Balles und V_{HV} die Versorgungsspannung. Der erste Schritt besteht daher darin, eine Kalibrierung durchzuführen, um die Beziehung zwischen der Stromversorgungseinstellung und der Ladung der Kugeln zu bestimmen.

Grundsätzlich sollten wir für jeden Ball eine Kalibrierung einzeln vornehmen, da die genaue Beziehung für jeden Ball unterschiedlich sein kann. In der Praxis können wir davon ausgehen, dass der Kalibrierungsfaktor für beide Kugeln sehr ähnlich ist. Die Kalibrierung kann am einfachsten mit Ball 1 (auf der Stange montiert) durchgeführt werden.

Wir messen die Ladung einer Kugel mit dem Elektrometer Verstärker. Der Versuchsleiter wird zeigen, wie das funktioniert. Grundsätzlich berühren Sie den Entladungsstab (in Abbildung 1.1 gezeigt) an der Kugel, und die elektrische Energie U , die durch die überschüssige Ladung der Kugel gespeichert wird, wird in [V] am Multimeter angezeigt. U bezieht sich auf die Ladung der Kapazität der Verstärkerschaltung, C (entweder 1 nF oder 10 nF):

$$q = C \cdot U \quad (1.4)$$

Durch Messen von q für verschiedene Werte von V_{HV} kannst du eine Kalibrierungskurve erstellen. Eine sinnvolle Menge von Punkten zum Messen wäre (5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV). Stelle sicher, dass die Kugeln zwischen den Messungen entladen sind, indem du sie mit der Entladestange berührst. Verwenden die Kalibrierungskurve im Rest des Experiments, um die am Netzteil eingestellten Werte von V_{HV} in die Ladungen für die Bälle q_1 und q_2 umzuwandeln. Es wird empfohlen, die ersten Messungen mit 15 kV durchzuführen, da die Messungen sowohl bei niedriger Spannung (kleines Signal) als auch bei hoher Spannung (elektrisches Laden nahegelegener Objekte - siehe (2+3) unten) schwieriger sind.

Komplikationen:

1) Ladungsverlust mit der Zeit. Die Ladung auf den Kugeln bleibt nicht für immer dort und gelangt schliesslich in die Umgebung. Dies geschieht durch verschiedene Kanäle, einschliesslich Verlust direkt an die Atmosphäre. Die Verlustrate ist daher wetterabhängig und variiert von Tag zu Tag. Im Allgemeinen ist es ziemlich kurz und liegt in der Grössenordnung von wenigen Sekunden. Eine wichtige Konsequenz ist, dass es wichtig ist, die Ladung der Bälle zu einer festgelegten Zeit nach dem Aufladen zu messen (z. B. 0,5 s nach dem Aufladen - Sie sollten mit dieser Verzögerung spielen, um sie für die Bedingungen Ihres Tages zu optimieren). Eine zweite Konsequenz ist, dass **es möglich ist, dass für niedrige Werte von V_{HV} keine Ladung auf den Kugeln gemessen werden kann**. Dies liegt daran, dass die Ladung zum Zeitpunkt der Messung bereits unter den Erkennungsschwellenwert gefallen ist.

2) Die Hochspannungsversorgung ist stark genug, um ein Signal in die Elektrometer Verstärkerschaltung zu induzieren, selbst wenn die Hochspannungsspitze weit entfernt ist. Es ist daher wichtig, die Entladestange beim Laden der Kugeln mit dem Faraday-Becher zu erden. Um die Ladung der Kugeln zu messen, schalte die Stromversorgung aus, *bevor* die Entladestange aus dem Faraday-Becher genommen wird.

3) Der Glasbehälter (und möglicherweise andere Teile des Experiments) laden sich im Laufe der Zeit häufig ebenfalls auf. Entlade diese durch Reiben der Glaswände (oder anderer Teile des Experiments) mit der Entladungsstange. Da das Glas kein Leiter ist, muss der Stab über die gesamte Glasoberfläche (oder den Grossteil davon) gerieben werden, um eine effektive Entladung zu erreichen. Die Entladungsstange kann auch ins Wasser

gelegt werden, falls sie ebenfalls aufgeladen ist. Die Wände sollten häufig entladen werden - nach jeder Messung ist am sichersten, obwohl es wahrscheinlich in Ordnung ist, alle 2-3 Messungen entladen zu werden. Diese Entladung sollte auch während der Messungen als Funktion des Kugelabstandes und der Ladung durchgeführt werden.

4) Verrauschte Daten. Das Ergebnis von (1-3) ist, dass in den Messungen wahrscheinlich eine grosse Streuung auftritt. Zusätzlich zu den in (1-3) beschriebenen Schritten müssen mehrere wiederholte Messungen durchgeführt und sie gemeinsam gemittelt werden. Abhängig vom Rauschen (der von Tag zu Tag variiert) sollten 5-10 Messungen bei jeder Einstellung von V_{HV} ausreichen. Wenn die Daten besonders verrauscht sind, müssen möglicherweise 20 Messungen wiederholt werden. Beim Aufzeichnen der Daten sollten sowohl der Mittelwert der wiederholten Messungen als auch die durch Standardabweichung bestimmten Fehlerbalken aufgezeichnet werden.

- **Messungen in Abhängigkeit des Kugelabstandes:** Dieser Teil des Versuchs wird einmal mit gleicher Ladung auf beiden Kugeln durchgeführt und einmal mit gleicher, aber gegenteiliger Ladung. Die stärkste Wechselwirkung zwischen den Kugeln wird mit 25 kV erzielt. Dies kann aber zu grossen induktiven Interferenzen im Messsignal führen, weshalb die Spannung angepasst werden muss.

Spiele mit der Position von Kugel 1 herum, um den Bereich der möglichen Abstände herauszufinden. Die grösste Distanz sollte etwas kürzer sein, als jene wo ein Signal gerade noch messbar ist.

Beginne bei jeder Messung mit dem Laden der Kugeln und schalte danach den Spannungsgenerator aus. Notiere dann die maximale Auslenkung des Lasers. Stelle sicher, dass du die Kugeln zwischen den Messungen entlädst.

Wiederhole deine Messungen für 8-10 verschiedene Distanzen. Wiederhole die Messung jeder Spannung 5-20 Mal, abhängig davon wie unterschiedlich die einzelnen Messungen sind. Bei der grössten Distanz sollte man gerade noch eine Interaktion zwischen den Kugeln registrieren können. Die kürzeste Distanz wird durch die Interferenz der Hochspannungsspitze beschränkt und ist typischerweise 1-2 cm².

- **Messungen in Abhängigkeit der Ladungen q_1 und q_2 :** Dieser Teil des Versuchs wird bei einer festen Distanz durchgeführt. Die Ladung auf Kugel 2 bleibt gleich, während die Ladung auf Kugel 1 variiert wird. Beide Ladungen haben das selbe Vorzeichen.

Die Kugeln sollten nahe genug beieinander positioniert sein, dass ein starkes Signal gemessen wird, aber genügt weit von einander entfernt sein, dass sich die Ladungen nicht gegenseitig beeinflussen. Die Distanz ist typischerweise 5 cm, muss aber jeweils angepasst werden.

Du benötigst zwei Spannungsgeneratoren. Benutze eine um Kugel 2 mit 15 kV zu laden und die andere um Kugel 1 mit variierender Spannung zu laden: 10 kV, 12.5 kV, 15 kV, 17.5 kV, 20 kV. Wiederhole die Messung jeder Spannung 5-20 Mal, abhängig davon wie unterschiedlich die einzelnen Messungen sind. Stelle sicher, dass du die Kugeln zwischen den Messungen entlädst.

²Tipp: Je näher du messen kannst und je mehr Messpunkte du aufzeichnest, desto einfacher wird die Auswertung.

1.4 Auswertung

Beim Plotten von Daten sollten Sie sowohl den Mittelwert der wiederholten Messungen als auch Fehlerbalken, die durch ihre Standardabweichung bestimmt werden, grafisch darstellen.

- **Kalibrierung:** Wandeln Sie die mit dem Multimeter gemessene Spannung U in Ladung der Kugel Q um. Verwenden Sie dazu Gl. 1.4.

Plotten Sie die Kalibrierungsdaten in Form von Ladung, Q , als eine Funktion der Ladungsspannung, V .

Fitten Sie Ihre Daten linear mit $Q = aV + b$. Wenn die Daten nur für grössere Werte von V linear sind (z.B. wenn $Q = 0$ für $V < 10$ kV), sollten Sie den Fit nur in der linearen Region anwenden. Sie können jetzt die Fitparameter a und b verwenden, um Ihre Daten für den Rest des Experiments zu kalibrieren.

- **Messung als Funktion des Abstandes zwischen den Kugeln:** Berechnen Sie die Kraft aus der Auslenkung des Torsionspendels. Verwenden Sie die Formeln in der Theorie, und vergessen Sie nicht den Faktor zwei in der Laserablenkung. Plotten Sie die Kraft F als Funktion des Abstandes r und fitten Sie die Funktion $F(r) = ar^{-2} + b$. Stimmen Ihre Daten mit der Abstandsbeziehung überein, die im Coulombschen Gesetz gegeben ist? Können Sie diese Distanzbeziehung bestätigen, oder sind andere Distanzbeziehungen auch mit den Daten konsistent? Fitten Sie Ihre Daten zusätzlich mit den folgenden Funktionen: (1) $F(r) = ar + b$ (linear); (2) $F(r) = ar^{-1} + b$ (invers proportional); (3) $F(r) = A \exp(-ar) + b$ (exponentiell). Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse und vergleichen Sie die vier Fits miteinander. **Alle vier Fits sollten übereinander, im Selben Plot dargestellt werden**, so dass sie direkt miteinander und mit den Daten verglichen werden können.
- **Messung als Funktion der Ladungen q_1 und q_2 :** Zeichnen Sie Ihre Daten in Form von Kraft als Funktion der Ladung ($F(q)$). Führen Sie einen linearen Fit aus. Bestimmen Sie ϵ_0 aus der Steigung dieser Linie mit Gl. 1.1.

Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit dem Literaturwert von ϵ_0 und diskutieren Sie diese. Wenn der Wert, den Sie für ϵ_0 erhalten, nicht Ihren Erwartungen entspricht, erklären warum. Diskutieren Sie, unter Berücksichtigung der experimentellen Probleme, warum Ihr Wert grösser oder kleiner ist als der Literaturwert. Sie sollten sich in Ihrer Diskussion auf die Gleichung für ϵ_0 und die von Ihnen eingegebenen Messwerte beziehen. Zum Beispiel, wenn Sie q in Ihren Messungen überschätzen, führt dies zu einer über- oder Unterschätzung von ϵ_0 ?

Tipps zum Protokoll

- **EINHEITEN!** Es gibt keine Entschuldigung, die Einheiten nicht in Ihre Berechnungen und Ergebnisse einzubeziehen. Schreibe die Ladung nicht als $q_1 = 0.4$, oder einen Wert wie folgt zu präsentieren: $\epsilon = 8 \times 10^{-12}$.

- Sie sollten ein Vektorzeichnungsprogramm finden, das Ihnen gefällt, und es für Diagramme und Schemata verwenden (z.B. das Experiment-Setup). Inkscape ist z. B. eine gute Option, und ist auch kostenlos.
- Beschriften Sie alle Abbildungen. Beschreibe, was sie zeigen, welche Daten du zeichnest, etc. in einer Bildunterschrift
- Mache Abbildungen, die gross genug zum Lesen sind - sie sollten einen beträchtlichen Teil der Seitenbreite abdecken.
- Abbildungen, Tabellen, Gleichungen usw. sollten ebenfalls im Text diskutiert werden. Es ist NIEMALS in Ordnung, eine davon zu verwenden, ohne sie im Hauptteil zu diskutieren.
- Denken Sie bei Diagrammen des Versuchsapparates daran, die Dinge mit anzugeben, die Sie gemessen haben, z.B. den Winkel Alpha, den Abstand zwischen den Kugeln usw. Vergessen Sie nicht, diese Parameter auch im Text anzugeben.
- Verwenden Sie eine vernünftige Anzahl von signifikanten Stellen. Der exakte Wert wird durch Ihre experimentelle Unsicherheit bestimmt. Wenn Sie eine Ladung mit einer Unsicherheit von ± 0.1 C berechnen, geben Sie $Q = 4.1$ C, nicht $Q = 4.1214353434509$ C an.
- Geben Sie bei Fehlerabschätzungen immer an, wie Sie diese bestimmt haben - z.B. abgeschätzt als die Hälfte der Auflösung des Messstabs, oder abgeschätzt als Ihre Fähigkeit zwei Komponenten auszurichten.
- Für den Abschnitt Einführung / Theorie (und andere auch): Erzählen Sie eine Geschichte! Schreiben Sie, als erklärten Sie das Experiment einem Ihrer Kollegen, d.H. Jemandem, der mit der Physik vertraut ist, aber überhaupt nicht mit der Theorie, die Sie verwenden, oder mit dem Experiment, das Sie gerade machen. Ein häufiger Fehler besteht darin, keinen ausreichenden Kontext/Erklärung bereitzustellen und nur einige relevante Gleichungen auf die Seite zu werfen. Das ist nicht genug. Vermeiden Sie es auch, irrelevante Informationen zu enthalten, nur weil sie im Abschnitt Theorie der Versuchsanleitung enthalten sind. Ein gutes Theorie Kapitel wird alles zusammenbringen und erklären, warum Sie tun, was Sie tun, warum Sie die Gleichungen verwenden, die Sie verwenden, usw. - also warum, nicht nur was.
- EINHEITEN!

Literatur

- Demtröder Band 2 - *Elektrizität und Optik*, 6. Auflage: Abschnitt 1.1 bis 1.3