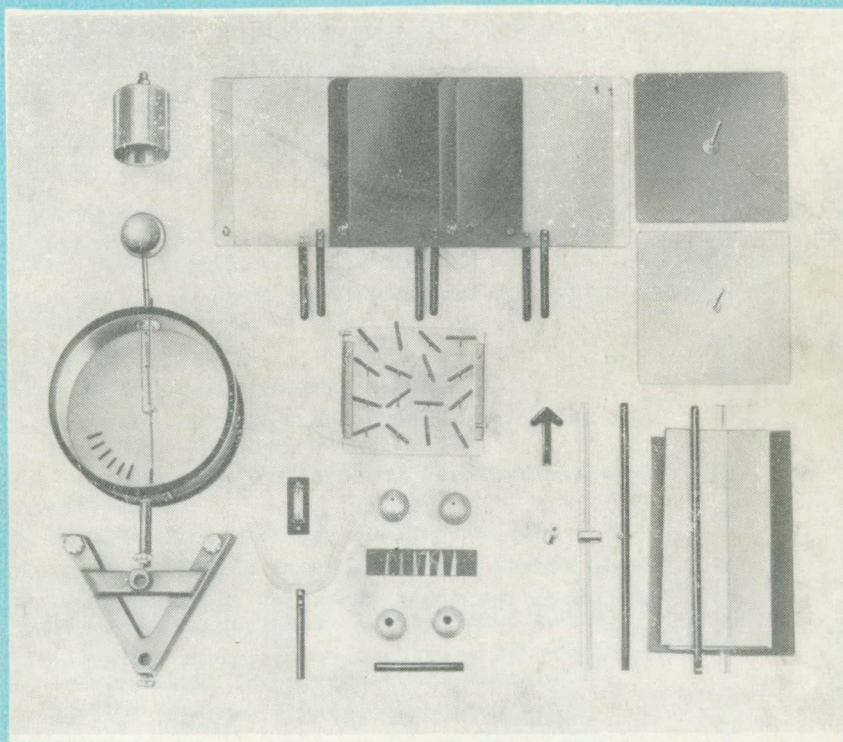


Gerätesatz Elektrostatik 50 380 9.01

Bedien- und Experimentieranleitung



D-0384-50 380

VEB KOMBINAT
POLYTECHNIK UND PRÄZISIONSGERÄTE
KARL-MARX-STADT



Inhalt	Seite
1. Bedienanleitung	5
1.1. Lieferumfang	5
1.2. Einsatzgebiet	6
1.3. Technische Daten	7
1.4. Einzelteile und deren Handhabung	7
1.5. Stativmaterial (S) - Zusatzgeräte (Z) - Hilfsmittel (B)	8
1.6. Experimentierhinweise	10
1.7. Wartung und Aufbewahrung	11
2. Experimentieranleitung	12
2.0. Vorbemerkungen	12
2.1. Spannung	14
2.1.1. Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im selbständigen Feld	14
2.1.2. Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im unselbständigen Feld	16
2.2. Ladungstrennung	18
2.2.1. Ladungstrennung durch Reibung	18
2.2.2. Nachweis elektrischer Ladungen durch Kraftwirkungen auf ungeladene Körper	19
2.2.3. Bestimmung des Vorzeichens der elektrischen Ladung	20
2.2.4. Bestimmung der Ladung des Reibzeuges	22
2.2.5. Ladungstrennung durch Berührung fester Körper	24
2.2.6. Bestimmung des Vorzeichens der bei Berührung von zwei Platteplatten entstehenden Ladung	26
2.2.7. Ladungstrennung durch Berührung zwischen einem festen Körper und einer Flüssigkeit	28
2.3. Kräfte zwischen elektrischen Ladungen	30
2.3.1. Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern (Variante 1)	30
2.3.2. Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern (Variante 2)	32
2.3.3. Nachweis des Coulombschen Gesetzes	34
2.4. Ladungsausgleich	38
2.4.1. Neutralisation von Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens	38

	Seite
2.4.2. Stufenweiser Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten (unselbständige Entladung)	40
2.4.3. Stufenweiser Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten (selbständige Entladung)	42
2.4.4. Entladung eines Plattenkondensators über eine Glimmlampe	44
2.4.5. Untersuchung des elektrischen Leitvermögens verschiedener Stoffe	46
2.4.6. Entladen eines Konduktors über ein Galvanometer	48
2.5. Ladungsübertragung	49
2.5.1. Nachweis der Ladungsübertragung mit zwei Elektrometern	49
2.5.2. Ladungsübertragung von einem Kugelkonduktor auf ein Elektrometer	50
2.5.3. Ladungsübertragung von einem Faradaybecher	51
2.5.4. Ladungsübertragung auf einen Faradaybecher	52
2.5.5. Untersuchung der Ladungsdichte auf einem Faradaybecher	54
2.6. Elektrisches Feld	56
2.6.1. Kraft auf einen elektrisch geladenen Probekörper im elektrischen Feld	56
2.6.2. Richtung der Kraft im elektrischen Feld	58
2.6.3. Zusammenhang zwischen der Feldkraft auf einen geladenen Probekörper und der Größe der Ladung des Probekörpers im homogenen elektrischen Feld	60
2.6.4. Zusammenhang zwischen Feldkraft und elektrischer Feldstärke im homogenen elektrischen Feld	63
2.7. Kapazität eines Plattenkondensators	66
2.7.1. Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Plattenfläche, Plattenabstand und Dielektrikum	66
2.8. Influenz	69
2.8.1. Nachweis der Influenz mittels eines Elektrometers	69

1. Bedienanleitung

1.1. Lieferumfang

<u>Anzahl</u>	<u>Benennung</u>	<u>Abmessungen in mm</u>
1	Plaststab (1)	Ø 10 x 300
1	Glasstab (2)	Ø 10 x 300
1	Kunstfasertuch (3)	250 x 250
1	Ledertuch (4)	250 x 250
1	Plaststab mit Nadellager (5)	Ø 10 x 300
1	Glasstab mit Nadellager (6)	Ø 10 x 300
1	Nadel mit Fuß (7)	Ø 10 x 60
1	Zeiger (8)	Ø 10 x 60
2	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)	Ø 38
2	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)	Ø 38
1	Isolierstab (11)	Ø 10 x 100
2	Kondensatorplatte Alu (12)	175 x 175 x 1,5
2	Haltestift (13)	Ø 3,8 x 56
1	Plastplatte 1 mit Telefonbuchse (14)	200 x 200 x 1,5
1	Plastplatte 2 mit Telefonbuchse (15)	200 x 200 x 1,5
1	Plastplatte 3 mit Telefonbuchse (16)	200 x 200 x 1,5
1	Plastplatte 1 (17)	200 x 200 x 1,5
1	Plastplatte 2 (18)	200 x 200 x 1,5
1	Plastplatte 3 (19)	200 x 200 x 1,5
1	Faradaybecher (20)	Ø 59, 70 hoch
1	Feldliniengerät (21)	160 x 145
20	Fähnchen (22)	35 x 4 x 1
1	Elektrische Gabel (23)	180 x 117
1	Glimmlampe mit Halterung (24)	50 x 20 x 30
	Aufhängefäden auf Wickelbrett (25)	125 x 30 x 4
1	Elektrometer (26)	ca. 400 hoch
1	Aufbewahrungspalette (27)	515 x 462 x 62
1	Experimentieranleitung (28)	

1.2. Einsatzgebiet

Der Gerätesatz Elektrostatik ist ein Aufbaugerät für Lehrerdemonstrationen im Physikunterricht. Er ermöglicht, die grundlegenden Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten der Elektrostatik darzustellen. Mit dem Gerätesatz sind u. a. folgende Versuche möglich:

- Ladungstrennung durch Reibung, Ladungstrennung durch Berührung, Nachweis elektrischer Ladungen, Bestimmung des Vorzeichens elektrischer Ladungen,
- Nachweis elektrischer Kräfte,
- Ladungsteilung,
- Ladungsübertragung, Ladungsausgleich,
- elektrisches Feld eines Plattenkondensators: Kräfte auf elektrisch geladene Probekörper im elektrischen Feld, Form des elektrischen Feldes, Darstellung der Feldlinien, Aufbau und Abbau des Feldes, Abhängigkeit der Feldkraft von Ladung des Probekörpers und Feldstärke,
- Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Plattenfläche, -abstand und Dielektrikum,
- Influenz,
- Nachweis des Coulombschen Gesetzes.

Unter Verwendung eines Hochspannungsgenerators, der eine konstante Gleichspannung bis ca. 25 kV erzeugt, sind darüber hinaus folgende Experimente möglich:

- Nachweis des Gesetzes $F \sim Q$ für das homogene elektrische Feld eines Plattenkondensators (Definition der elektrischen Feldstärke)
- Nachweis der Abhängigkeiten $F \sim U$ und $F \sim \frac{1}{d}$.

Die Einzelteile des Gerätesatzes sind vielseitig verwendbar und ermöglichen mit relativ einfachen Mitteln Demonstrationen vom Freihandexperiment bis zum anspruchsvollen quantitativ auszuwertenden Experiment. Für den Einsatz im Unterricht ist es vorteilhaft, daß die meisten Experimente in kurzer Zeit vom Lehrer vorbereitet werden können, wobei sie unter der Voraussetzung, daß im Experimentierraum keine zu hohe Luftfeuchtigkeit herrscht, eindeutige Effekte liefern.

Die quantitativ auszuwertenden Experimente erfordern sorgfältige Vorbereitungen. Ihre Projektion ist unumgänglich.

1.3. Technische Daten

Abmessungen der Einzelteile: s. Lieferumfang

Gesamtmasse : ca. 3,5 kg

1.4. Einzelteile und deren Handhabung

Plaststab (1) zur Ladungstrennung; wird durch Reiben mit dem Kunstfasertuch (3) negativ aufgeladen; daneben auch als isolierender Stativstab zu verwenden

Glasstab (2) zur Ladungstrennung; wird durch Reiben mit dem Ledertuch (4) positiv aufgeladen

Kunstfasertuch (3) als Reibzeug für Plaststab (1).

Ledertuch (4) als Reibzeug für Glasstab (2)

Plaststab mit Nadellager (5)) zum Nachweis elektrischer

Glasstab mit Nadellager (6)) Kräfte zwischen geladenen
Stäben, einzeln auf Nadel mit
Fuß (7) drehbar aufzusetzen

Nadel mit Fuß (7), auf Stativstab aufzuschrauben, drehbare Lagerung für Plaststab (5) oder Glasstab (6)

Zeiger (8) zur Anzeige der Drehung, auf drehbar gelagerten Plaststab (5) oder Glasstab (6) aufzustecken

Hohlkugel mit Aufhängeöse (9) zum Nachweis elektrischer Kräfte mittels isolierender Aufhängefäden (25) bifilar aufzuhängen

Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10) als Konduktor zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen geladenen Körpern sowie zur Ladungsteilung zu verwenden, auf Isolierstab (11), Plaststab (1) oder Glasstab (2) aufzustecken

Isolierstab (11) zum Aufstecken der Hohlkugel (10); daneben auch zur Erzeugung von Ladungen durch Reiben des Stabes oder als isolierender Stativstab verwendbar

Kondensatorplatte Alu (12) zum Aufbau eines Plattenkondensators

Haltestift (13) zur Halterung der Kondensatorplatte am Stativ, auf Kondensatorplatte (12) aufzuschrauben

Plastplatten 1,2,3 mit Telefonbuchse (14,15,16) zum Nachweis der Ladungstrennung durch Berührung, aus unterschiedlichen isolierenden Stoffen bestehend

Plastplatten 1,2,3 (17,18,19) als Dielektrika zwischen den Kondensatorplatten zu verwenden, aus unterschiedlichen isolierenden Stoffen bestehend

Faradaybecher (20) für Experimente zur Trennung und Übertragung von Ladungen sowie zur Untersuchung der Ladungsdichte auf Metalloberflächen, auf Isolator aufschraubbar

Feldliniengerät (21) zur Demonstration der Richtung der Feldkräfte, in Verbindung mit aufgesteckten Föhnchen (22) mittels Schreibprojektor projizierbar. Das erforderliche Feld wird durch Bandgenerator oder Influenzmaschine erzeugt. Die unterschiedliche Länge der föhnchenträgenden Nadeln gestattet, den räumlichen Charakter des Feldes zu demonstrieren

Föhnchen (22), auf die Nadeln des Feldliniengerätes (21) aufzusetzen

Elektrische Gabel (23) zur Herstellung von Kurzschlüssen und zur Übertragung von Ladungen.

Glimmlampe (24) zum Nachweis des Ladungszustandes und des Vorzeichens elektrischer Ladungen. Bei Annäherung der Glimmlampe an einen elektrisch geladenen Körper erfolgt Entladung über die Elektroden zur Erde hin. Dabei leuchtet immer der Minuspol auf.

Aufhängefäden auf Wickelbrett (25), zum isolierten Aufhängen der Hohlkugeln (9)

Elektrometer (26) zur Spannungsmessung bzw. zum Nachweis von Ladungen

1.5. Stativmaterial (S) - Zusatzgeräte (Z) - Hilfsmittel (B)

- Aus dem Universal-Präzisionsstativ (03 012 4.02) werden folgende Einzelteile benötigt:

- 2 Stativstäbe, 1000 mm lang
oder 2 Stativstäbe, 750 mm lang,
- 2 Stativstäbe, 500 mm lang,
- 2 Stativstäbe, 250 mm lang,
- 2 Stativstäbe, 100 mm lang,
- 2 Klemmstäbe,
- 1 großer V-Fuß oder 1 Tischklemme,
- 2 kleine V-Füße,
- 2 Rundfüße,
- 3 Kreuzmuffen A oder B,
- 1 Parallelmuffe,
- 2 Isolatoren.

Diese Teile werden verwendet zur elektrisch isolierten Befestigung der Kondensatorplatten (12), des Faradaybechers (20) und der auf den Isolierstab (11) aufgesteckten Hohl-

kugel (10) sowie zur Aufhängung der Hohlkugeln (9).

- Ein weiteres Elektrometer (26). Für eine qualitative Grobanzeige ist bereits das Elektroskop des SEG-Elektrostatik (12 520 3.02) ausreichend. Die Verwendung eines Wulf-Elektroskops (04 535 0.06) ist ebenfalls möglich.
- Drehspul-Spiegelgalvanometer (04 521 1.01), als ballistisches Galvanometer geeicht, zur Messung von Ladungen; ungeeicht zum Nachweis kleinster fließender Ströme bei Ladungsausgleich.
- Bandgenerator (53 050 8.06) oder Influenzmaschine (53 062 0.18) als Spannungsquellen. Für quantitative Experimente, z. B. zur Definition der elektrischen Feldstärke, ist ein Hochspannungsgenerator, der eine konstante Spannung bis zu 25 kV liefert, unerlässlich.
- Stromversorgungsgerät für Mittelspannung (05 505 7.11)
- Schreibprojektor TLS POLYLUX 1 W 220 (05 114 4.01), in Verbindung mit den Projektionsfolien Quadratraster (2-003) oder Koordinatenkreuz (2-002), zur Projektion der Hohlkugeln (9) und deren Bewegung unter dem Einfluß elektrischer Kräfte.
- Kippanordnung A 11 (05 172 6.01) für den Schreibprojektor bei der Projektion größerer Experimentieranordnungen.
- Isoliertisch zur Isolierung der Experimentieranordnungen gegenüber Erde.
- Meßplatte (Länge 1 m)
- Verbindungsleiter

Folgende Geräte können als zweckmäßige Ergänzung des Gerätesatzes eingesetzt werden und ermöglichen weiterführende Experimente:

- Magnetische und elektrische Felder (53 012 9.01),
- Leidener Flasche (05 593 8.01),
- Blockkondensator (C einige μF) bzw. Kondensatorenbatterie

Im Selbstbau einfach herzustellen sind:

Paraffinkugel, an Isolierstab befestigt, Metallplatten mit Isoliergriffen, Fähnchen aus Seidenpapier u.a.

1.6. Experimentierhinweise

- Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern sind besonders gut mit Hilfe der Hohlkugeln nachweisbar. Durch bifilares Aufhängen der Hohlkugeln als Pendel ist über die Auslenkung der geladenen Kugeln eine exakte Bestimmung der elektrostatischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte möglich. Man unterscheidet zwei verschiedene Anordnungen:
 - . zwei geladene bifilar aufgehängte Kugeln
 - . eine feststehende geladene und eine bifilar aufgehängte Kugel.

Wegen des metallischen Überzugs verteilt sich die aufgebraachte Ladung gut über die gesamte Kugeloberfläche. Wegen der geringen Kapazität der Kugeln sind jedoch die aufzubringenden Ladungen und damit die auftretenden Kräfte relativ gering. Für solche Experimente ist deshalb eine möglichst große Pendellänge zu wählen ($l = 1,20 \dots 1,50 \text{ m}$). Bei längeren Pendeln gilt auch genauer, daß die Auslenkung des Pendels der wirkenden Kraft proportional ist.

Für eine exakte Anzeige ist die Projektion der Kugeln erforderlich. Dafür eignet sich neben Kohlebogen- oder Projektionslampen sehr gut der Schreibprojektor POLYLUX 1 W 220. Zwei Kugeln lassen sich bequem projizieren. Die Projektionsfolien mit Quadratraster oder Koordinatensystem werden bei der Messung der Auslenkung als Skale benutzt. Versuchsanordnungen mit größeren Abmessungen, z. B. ein Plattenkondensator mit einer Pendelkugel als elektrisch geladener Probekörper, werden unter Benutzung der Kippeinrichtung A 11 projiziert. Da in dieser Anordnung jedoch keine Skale projiziert werden kann, muß diese an der Projektionsfläche befestigt werden.

- Bei Experimenten mit geladenen Hohlkugeln ist zu beachten, daß sich möglichst kein anderer Körper in deren Nähe befindet, um unerwünschte Kraftwirkungen durch Influenz zu vermeiden.
- Pendelkugeln geraten beim Aufladen mit geladenen Stäben rasch in unkontrollierte, heftige Schwingungen. Diese können verhindert werden, indem die Pendel an den isolierenden Aufhängefäden während des Ladevorganges kurz festgehalten werden. Eine Beeinträchtigung der Kugelladung erfolgt dadurch nicht.
- Grundsätzlich setzt ein gutes Gelingen von Experimenten zur Elektrostatik eine trockene Luft im Experimentierraum voraus. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit bis zu 80 % gelingen die Experimente im wesentlichen einwandfrei. In zu feuchter Luft schlägt sich an der Oberfläche der Geräte ein dünner Feuchtigkeitsfilm nieder, der ein Abfließen der elektrischen Ladungen bewirkt. Der Lehrer beachte, daß während des Unterrichts oft andere Bedingungen herrschen, als bei dessen Vorbereitung. Gewöhnlich steigt durch die längere Anwesenheit der Schüler im Unterrichtsraum die Luftfeuchtigkeit, so daß viele Experimente nicht

mehr gut gelingen. Ist die Luftfeuchtigkeit im Experimentierraum zu hoch, dann müssen die Oberflächen der verwendeten Geräte durch Erwärmung getrocknet werden. Gut eignen sich dazu ein Infrarotstrahler oder eine Heizsonne. Werden die Einzelteile des Gerätesatzes bzw. die benötigten Zusatzgeräte in einem relativ kühlen Raum aufbewahrt, dann müssen sie vor ihrer Inbetriebnahme erst auf die Temperatur des Unterrichts- bzw. Experimentierraumes erwärmt werden.

- Neben Feuchtigkeit kann auch Verschmutzung der Isolatoren oder der Aufhängefäden zum Abfließen der Ladungen führen. Es ist deshalb auf peinliche Sauberkeit der Geräte zu achten. Es ist zweckmäßig, von Zeit zu Zeit die isolierenden Teile mittels eines Lösungsmittels, z. B. Tetrachlorkohlenstoff, von Fett zu säubern.
- Um eine gute Isolierung zu gewährleisten, sollten nach Möglichkeit die Experimentieranordnungen auf eine isolierende Unterlage (Isoliertisch) gestellt werden. Polystyrolkästen eignen sich zur Isolierung besonders gut.
- Als Zuleitungen zu den Hochspannungsquellen und den Meßgeräten können gewöhnliche Verbindungsleiter verwendet werden. Diese müssen jedoch so kurz sein, daß sie an der aufgebauten Experimentieranordnung frei hängen und nicht den Boden oder andere Experimentiergeräte berühren und dadurch Ladungsausgleich herbeiführen.
- Vorsicht beim Umgang mit Hochspannungsquellen (Bandgenerator, Influenzmaschine)! Die von diesen Geräten erzeugten Spannungen reichen bis zu 60 kV. Sie sind zwar für den Menschen ungefährlich, da die Stromstärken bei Ladungsausgleich klein sind ($I \approx 10^{-5} \text{ A}$), jedoch können elektrische Schläge für den Experimentator recht unangenehm sein. Ein Funkenüberschlag ist bereits bei geringem Abstand der Hand oder anderer Körperteile vom spannungsführenden Gerät möglich und setzt keine Berührung voraus. Man achte darauf, daß nach Beendigung der Experimente die Spannungsquellen und Kondensatoren entladen werden.

Für weitere, spezielle Experimentierhinweise wird auf die Experimentieranleitung verwiesen.

1.7. Wartung und Aufbewahrung

Die Einzelteile werden in einer Palette und einem Stülpedeckelkarton aufbewahrt (s. Einlegeschema).

Sie müssen vor Verstaubung und Verschmutzung geschützt werden. Um die Rüstzeiten zu verkürzen, empfiehlt es sich, die bifilar aufgehängten Hohlkugeln in dieser Anordnung gleich zu belassen (staubgeschützt aufbewahren).

2. Experimentieranleitung

2.0. Vorbemerkung

In der folgenden Übersicht sind alle Teile und Geräte, die bei den einzelnen Experimenten benötigt werden, zusammengestellt und mit einer Bauteilnummer versehen, die in Klammern hinter der Benennung steht.

Die Kennzeichnung der Zusatzgeräte erfolgt durch ein vor die Bauteilnummer gestelltes Z. Stativmaterial wird durch ein vorangestelltes S gekennzeichnet.

Gerätesatz Elektrostatik:

- Plaststab (1)
- Glasstab (2)
- Kunstfasertuch (3)
- Ledertuch (4)
- Plaststab mit Nadellager (5)
- Glasstab mit Nadellager (6)
- Nadel mit Fuß (7)
- Zeiger (8)
- Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
- Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
- Isolierstab (11)
- Kondensatorplatte Alu (12)
- Haltestift (13)
- Plastplatte 1 mit Telefonbuchse (14)
- Plastplatte 2 mit Telefonbuchse (15)
- Plastplatte 3 mit Telefonbuchse (16)
- Plastplatte 1 (17)
- Plastplatte 2 (18)
- Plastplatte 3 (19)
- Faradaybecher (20)
- Feldliniengerät (21)
- Fähnchen (22)
- Elektrische Gabel (23)
- Glimmlampe mit Halterung (24)
- Aufhängefaden auf Wickelbrett (25)
- Elektrometer (26)

Zusatzgeräte (Z):

- Elektroskop (Z 30)
- Drehspul-Spiegelgalvanometer (Z 32)
- Bandgenerator (Z 33)
- Influenzmaschine (Z 34)
- Hochspannungsgenerator (Z 35)
- Stromversorgungsgerät für Mittelspannung (Z 36)
- Kugelkonduktor des Bandgenerators (Z 37)
- Schreibprojektor POLYLUX (Z 38)
- Projektionsfolie Quadratraster (Z 39)
- Projektionsfolie Koordinatensystem (Z 40)
- Kippanordnung für den Schreibprojektor (Z 41)
- Isoliertisch (Z 42)

Meßlatte, 1 m (Z 43)
Verbindungsleiter (Z 44)

Stativmaterial (S):

Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
Stativstab, 500 mm lang (S 51)
Stativstab, 250 mm lang (S 52)
Stativstab, 100 mm lang (S 53)
Klemmstab (S 54)
großer V-Fuß (S 55)
kleiner V-Fuß (S 56)
Rundfuß (S 57)
Kreuzmuffe (S 58)
Parallelmuffe (S 59)
Isolator (S 60)

Im Selbstbau herzustellende Geräte und Teile werden durch
ein B gekennzeichnet.

2.1. Spannung

2.1.1. Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im selbständigen elektrischen Feld

Zielstellung

Nachweis der Abhängigkeit der Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im selbständigen Feld vom Abstand der Platten.

Vorbemerkungen

Eine elektrische Spannung besteht zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes, die eine Potentialdifferenz besitzen. Es gilt

$$U = \int \vec{E}_s \cdot d\vec{s},$$

d.h., das Linienintegral der elektrischen Feldstärke längs eines beliebigen Weges ist gleich der Spannung zwischen Anfang und Ende dieses Weges. Für einen flachen Plattenkondensator vereinfacht sich die Gleichung zu

$$U = \vec{E} \cdot d.$$

E Feldstärke zwischen den Platten

d Abstand der Platten

Bei konstanter Feldstärke gilt

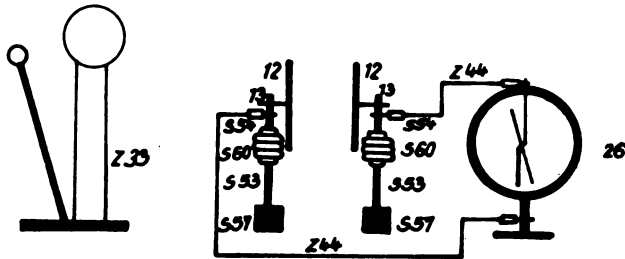
$$U \propto d.$$

Dieser Zusammenhang wird qualitativ experimentell nachgewiesen.

Geräte

Anzahl	Benennung
2	Kondensatorplatte (12)
2	Haltestift (13)
1	Elektrometer (26)
1	Bandgenerator (Z 33) oder Influenzmaschine (Z 34)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Durchführung

Die mit dem Ladungsknopf des Elektrometers verbundene Kondensatorplatte wird aufgeladen, die Hochspannungsquelle nach dem Aufladen wieder entfernt. Der Plattenabstand wird vergrößert/verkleinert, der Ausschlag des Elektrometers beobachtet.

Beobachtung

Nach dem Aufladen zeigt das Elektrometer eine Spannung an. Bei Vergrößerung des Plattenabstandes wächst der Zeigerausschlag, bei Annäherung sinkt er.

Ergebnis

Da die Ladungen auf den Platten nicht verändert wurden, ist die Feldstärke konstant geblieben. Die Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im selbständigen Feld ist vom Abstand der Platten abhängig. Sie verändert sich im gleichen Maße wie der Plattenabstand.

2.1.2. Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten im unselbständigen Feld

Zielstellung

Nachweis, daß die Spannung im unselbständigen Feld unabhängig vom Abstand der Kondensatorplatten ist.

Vor

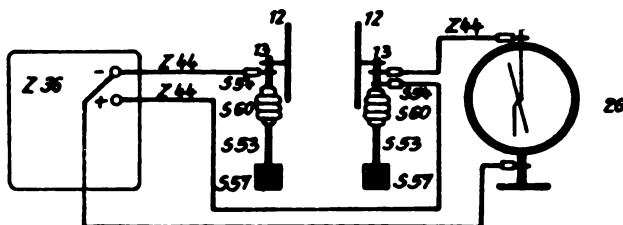
Vorbemerkungen

Wird das elektrische Feld durch eine angelegte konstante Spannung eines Stromversorgungsgerätes erzeugt, dann ändert sich mit dem Abstand der Kondensatorplatten die Feldstärke. Das kann nicht mit einem Elektrometer nachgewiesen werden (Spannungsmeßgerät), sondern macht das Einführen eines Probekörpers in das elektrische Feld erforderlich (vergl. Experiment 6.4.).

Geräte

Anzahl	Benennung
2	Kondensatorplatte (12)
2	Haltestift (13)
1	Elektrometer (26)
1	Stromversorgungsgerät für Mittelspannung (Z 36)
4	Verbindungsleiter (Z 43)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 50)
2	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Die Kondensatorplatten werden so nahe wie möglich gebracht. (eventuell ein Blatt Papier zwischen die Platten bringen)

Durchführung

Die Spannung von 400 V- wird eingeschaltet. Der Plattenabstand wird vergrößert, das Elektrometer beobachtet.

Beobachtung

Nach dem Einschalten der Spannung zeigt das Elektrometer eine Spannung an. Ihr Betrag ändert sich nicht beim Verändern des Plattenabstandes.

Ergebnis

Wird die Spannung zwischen zwei Kondensatorplatten von einer fremden Spannungsquelle geliefert (unselbständiges Feld), so ist sie unabhängig vom Abstand der Kondensatorplatten.

2.2. Ladungstrennung

2.2.1. Ladungstrennung durch Reibung

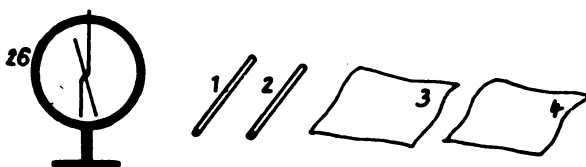
Zielstellung

Nachweis der Ladungstrennung durch Reiben von Stäben mit Reibzeug.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Elektrometer (26)

Aufbau



Durchführung

Der Plastikstab wird mit dem Kunstfasertuch gerieben und danach mit dem Ladungsknopf des Elektrometers in Verbindung gebracht. Nach dem Entladen des Elektrometers wird der Glasstab kräftig mit dem Ledertuch gerieben und ebenfalls mit dem Ladungsknopf des Elektrometers in Berührung gebracht.

Beobachtung

Das Elektrometer zeigt jeweils einen Ausschlag an.

Ergebnis

Die Stäbe sind durch Reiben mit dem Reibzeug jeweils elektrisch geladen worden. Elektrische Ladungen können mit einem Elektrometer nachgewiesen werden.
Hinweis: Zum Nachweis elektrischer Ladungen eignen sich auch gut Doppelpendel aus leichten Körpern (z.B. Holundermarkkugeln) oder Seidenpapierfähnchen.

2.2.2. Nachweis elektrischer Ladungen durch Kraftwirkungen auf ungeladene Körper

Zielstellung

Nachweis der Anziehungskraft, die elektrisch geladene Körper auf ungeladene ausüben.

Vorbemerkungen

Elektrisch geladene Körper bewirken bei Annäherung an ungeladene Körper in diesen eine Ladungsverschiebung (Influenz). In Leitern wandern die Ladungen zur Oberfläche, in Isolatoren kommt es nur zu einer Verschiebung innerhalb der einzelnen Moleküle (Polarisation). Dadurch treten Kräfte zwischen den geladenen und den ungeladenen Körpern auf.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Luftballon, aufgeblasen, an Zwirnsfaden befestigt (B) Papierschnitzel oder Holundermarkkugeln (B)

Durchführung

Der Plaststab wird am Kunstfasertuch gerieben und den Papierschnitzeln /dem Luftballon/ einem dünnen Wasserstrahl genähert. Das Experiment mit Glasstab und Ledertuch wiederholen.

Beobachtung

Elektrisch geladene Körper üben auf ungeladene Kräfte aus. Papierschnitzel, Luftballon und Wasserstrahl werden jeweils von den geriebenen Stäben angezogen.

Ergebnis

Elektrisch geladene Körper üben auf ungeladene Körper Kräfte aus. Damit können elektrische Ladungen nachgewiesen werden.

Hinweis

Zu diesem Experiment bieten sich vielfältige Varianten an: Haare, die durch einen geladenen Kamm angezogen werden, Papierschnitzel, die durch einen geriebenen Füllhalter angezogen werden usw. Ein Luftballon, der an Kunstfasergewebe gerieben wird, zieht ungeladene Körper an. Auf diese Weise kann er sogar an der Zimmerdecke haften.

2.2.3. Bestimmung des Vorzeichens der elektrischen Ladung

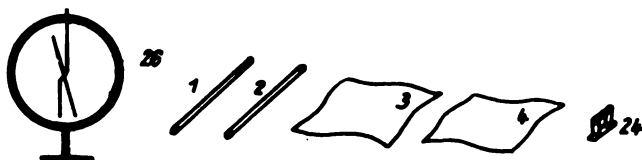
Zielstellung

Nachweis der Existenz unterschiedlicher Ladungen mit einem Elektrometer oder einer Glimmlampe und Bestimmung des Vorzeichens.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Glimmlampe (24)
1	Elektrometer (26)

Aufbau



Durchführung des ersten Teilexperiments

Der Plaststab wird mit dem Kunstfasertuch gerieben und am Elektrometer abgestreift, bis dessen Zeigerausschlag etwa die Hälfte des Vollausschlages beträgt. Der Plaststab wird nochmals gerieben, dem Elektrometer genähert und an diesem abgestreift. Danach wird der am Ledertuch geriebene Glasstab am Elektrometer abgestreift. Das Experiment wird in analoger Weise wiederholt, indem zuerst mit dem geriebenen Glasstab das Elektrometer aufgeladen wird und danach der geriebene Plaststab genähert und abgestreift wird.

Beobachtung

Mit dem geriebenen Plaststab kann das Elektrometer aufgeladen werden. Die Ladung kann durch Wiederholen des Experiments vergrößert werden. Wird danach die Ladung des geriebenen Glasstabes auf das Elektrometer gebracht, geht der Zeigerausschlag zurück.

Analoge Durchführung des Experiments mit vertauschten Stäben ergibt die gleiche Beobachtung.

Ergebnis des ersten Teilexperiments

Die Ladungen des geriebenen Glas- und des geriebenen Plaststabes tragen entgegengesetztes Vorzeichen.

Durchführung des zweiten Teilexperiments

Der am Kunstfasertuch geriebene Plaststab wird einem Kontakt der Glimmlampe genähert, die der Lehrer am anderen Kontakt in der Hand hält. Die Elektroden werden beobachtet.

Das Experiment wird mit dem Glasstab, der am Ledertuch gerieben wurde, wiederholt.

Zur Durchführung des Experiments ist Verdunklung des Raumes zweckmäßig.

Beobachtung

Diejenige Elektrode der Glimmlampe, die mit dem geriebenen Plaststab in Kontakt kommt, leuchtet kurz auf.

Diejenige Elektrode, die dem Glasstab abgewandt ist, leuchtet kurz auf.

Ergebnisse des zweiten Teilexperiments

Mit einer Glimmlampe kann das Vorzeichen elektrischer Ladungen bestimmt werden. Die bei der Entladung aufleuchtende Elektrode kennzeichnet den Minuspol.

2.2.4. Bestimmung der Ladung des Reibzeuges

Zielstellung

Nachweis der Entstehung von Ladungen auf Reibzeug (Kunstfasertuch, Ledertuch) und Bestimmung deren Vorzeichen.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Glimmlampe (24)
1	Elektrometer (26)

Aufbau



Durchführung

Der Plaststab wird am Kunstfasertuch gerieben, dieses wird rasch am Elektrometer abgestreift. Anschließend wird die Ladung des geriebenen Plaststabes auf das Elektrometer gebracht. Das Experiment wird analog mit Glasstab und Ledertuch wiederholt. Da Leder ein relativ guter Elektrizitätsleiter ist, muß das Ledertuch gut isoliert werden, z. B. durch Aufwickeln auf einen Isolierstab.

Beobachtung

Mittels des Reibzeuges kann das Elektrometer aufgeladen werden. Bei Annäherung des geriebenen Stabes geht der Ausschlag des Elektrometers jeweils zurück.

Ergebnis

Reibzeug und Stab erweisen sich als entgegengesetzt geladen.

Variante

Ein Schüler steht auf Isoliermaterial (Isoliertisch, Polystyrolplatte o. dgl.) und berührt mit der Hand ein Elektrometer. Führt ihm der Lehrer wiederholt mit einem Kamm durch das Haar, so zeigt das Elektrometer einen Ausschlag. Der Ausschlag geht zurück, wenn der Kamm am Elektrometer abgestreift wird. Kamm und Elektrometer tragen entgegengesetzte Ladungen.

Hinweis:

Die Bestimmung des Vorzeichens der Ladungen kann in diesem Experiment auch mittels einer Glimmlampe erfolgen (vgl. Exp. 2.2.3.).

2.2.5. Ladungstrennung durch Berührung fester Körper

Zielstellung

Nachweis der Ladungstrennung bei Berührung zweier Platten aus unterschiedlichen isolierenden Stoffen

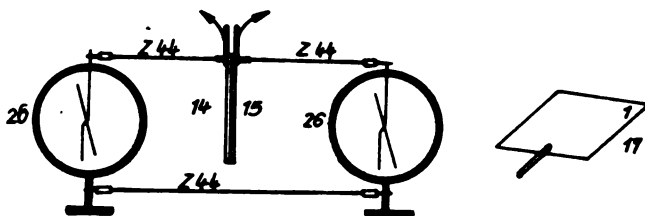
Vorbemerkung

Bei der Berührung zweier Körper aus verschiedenen Stoffen bis auf molekularen Abstand kommt es durch Abgabe von Elektronen des einen Körpers an den anderen zu einem elektrischen Feld in der Grenzschicht zwischen den beiden Körpern (elektrische Doppelschicht). Sind die einander berührenden Körper Isolatoren, so können nach deren Trennung hohe Spannungen zwischen ihnen nachgewiesen werden. Die beiden Körper sind unterschiedlich geladen. Die sog. "Reibungselektrizität" beruht ebenfalls auf der Ladungstrennung durch Berührung.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plastplatte 1 mit Telefonbuchse (14)
1	Plastplatte 2 mit Telefonbuchse (15)
1	Plastplatte 1 (17)
2	Elektrometer (26)
3	Verbindungsleiter (Z 43)

Aufbau



Zwei Platten aus unterschiedlichen Stoffen werden jeweils mit einem Elektrometer verbunden. Die Gehäuse der Elektrometer werden miteinander leitend verbunden. Die Elektrometer müssen gut isoliert aufgestellt werden. Die Verbindungsleiter dürfen die Erde nicht berühren.

Durchführung und Beobachtung

Die Platten werden fest aneinandergedrückt und rasch voneinander entfernt. An beiden Elektroskopen ist ein gleich großer Ausschlag zu erkennen.

Die Platten werden einander wieder genähert, der Ausschlag geht an beiden Elektrometern wieder auf Null zurück.

Das Experiment wird wiederholt, das Vorzeichen der Ladung der Elektrometer wird bestimmt. Beide Elektrometer tragen gleich große Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens.

Das Experiment wird mit zwei Platten des gleichen Stoffes durchgeführt. Dabei ist kein Ausschlag am Elektrometer zu beobachten.

Variante: Das Experiment kann auch mit nur einem Elektrometer durchgeführt werden. Dabei muß das Vorzeichen der Ladung der Platten in zwei aufeinanderfolgenden Experimenten bestimmt werden.

Ergebnis

Bei inniger Berührung unterschiedlicher Stoffe kann Ladungstrennung erfolgen.

2.2.6. Bestimmung des Vorzeichens der bei Berührung von zwei Plastplatten entstehenden Ladung

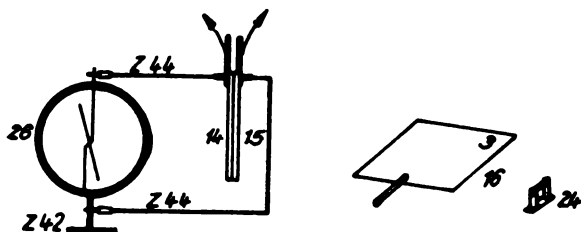
Zielstellung

Bestimmung des Vorzeichens der bei Berührung von Platten aus unterschiedlichen Stoffen entstehenden Spannung, Ermittlung einer elektrostatischen Spannungsreihe

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plastplatte 1 mit Telefonbuchse (14)
1	Plastplatte 2 mit Telefonbuchse (15)
1	Plastplatte 3 mit Telefonbuchse (16)
1	Glimmlampe (24)
1	Elektrometer (26)
1	Isoliertisch (Z 41)
2	Verbindungsleiter (Z 43)

Aufbau



Die Plastplatte 1 mit Telefonbuchse (14) wird durch einen Verbindungsleiter mit dem Ladungsknopf, die Plastplatte 2 mit Telefonbuchse (15) gleichermaßen mit dem Gehäuse des Elektrometers verbunden. Das Elektrometer steht auf einer gut isolierenden Unterlage (Isoliertisch).

Durchführung und Beobachtung

Beide Platten werden zusammengedrückt und wieder auseinandergezogen. Es zeigt sich ein Ausschlag am Elektrometer. Das Vorzeichen der Ladung des Elektrometers wird mit der Glimmlampe oder durch Annäherung des geriebenen Plaststabes bestimmt (s. Experiment 2.2.3.).

Das Experiment wird mit anderen Plattenkombinationen wiederholt.

Ergebnis

Das Vorzeichen der erzeugten Ladung hängt von der Art der einander berührenden Stoffe ab.

mit dem Gehäuse des Elektrometers verbundener Stoff	Ladungsvorzeichen des mit dem Ladungsknopf des Elektrometers verbundenen Stoffes		
	Plast 1	Plast 2	Plast 3
Plast 1		+	+
Plast 2	-		+
Plast 3	-	-	

Es ergibt sich die folgende elektrostatische Spannungsreihe, in der ein links stehender Stoff gegenüber einem rechts von ihm stehenden Stoff stets negativ geladen ist. Der rechte ist dann positiv geladen.

-	Plast 1	Plast 2	Plast 3	+
---	---------	---------	---------	---

2.2.7. Ladungstrennung durch Berührung zwischen einem festen Körper und einer Flüssigkeit

Zielstellung

Nachweis der Ladungstrennung zwischen Paraffin und Wasser

Vorbemerkung

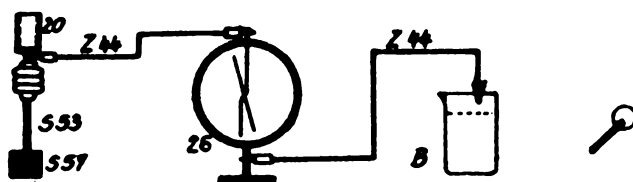
Elektrische Doppelschichten entstehen nicht nur bei starker Annäherung zwischen festen Körpern (s. Experiment 2.5.), sondern auch beim Eintauchen von festen Körpern in Flüssigkeiten.

Wird der eingetauchte Körper aus der Flüssigkeit herausgezogen, so kann eine Spannung zwischen festem Körper und Flüssigkeit nachgewiesen werden.

Geräte

Anzahl	Bezeichnung
1	Paradaybecher (20)
1	Elektrometer (26)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
1	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
1	Rundfuß (S 57)
1	Isolator (S 60)
1	Metallbecher (B)
1	Paraffinkugel mit Isolierstab (B)

Aufbau



Eine Holzkugel wird an einem Stab aus gut isolierendem Material befestigt und durch wiederholtes Eintauchen in flüssiges Paraffin mit einem Paraffinüberzug versehen.

Auf peinliche Sauberkeit des Stabes ist zu achten, ggf. muß dieser mit einem fettlösenden Mittel gereinigt werden. Der Metallbecher wird mit Wasser gefüllt und mittels Krokodilklemme und Verbindungsleiter mit dem Gehäuse des Elektrometers verbunden. Der Paradaybecher wird mit dem Ladungsknopf des Elektrometers verbunden.

Durchführung

Die Paraffinkugel wird in das Wasser eingetaucht und vorsichtig wieder herausgezogen. Anhaftende Wassertröpfchen werden abgeschüttelt. Die Kugel wird in das Innere des Paradaybeckers gebracht. Es ist darauf zu achten, daß keine Wassertröpfchen auf den Isolator gelangen.

Beobachtung

Bei mehrmaliger Wiederholung zeigt das Elektrometer einen Ausschlag.

Ergebnis

Beim Trennen von festen Körpern und Flüssigkeiten kann Ladungstrennung erfolgen.

Varianten

1. Das Experiment gelingt noch besser, wenn statt der Kugel eine mit Paraffin überzogene Platte verwendet wird.
2. Der Paradaybecher wird mit Wasser gefüllt und mit dem Ladungsknopf des Elektrometers verbunden. Beim Herausziehen der in das Wasser eingetauchten Paraffinkugel bzw. -platte wird das Wasser elektrisch geladen, das Elektrometer zeigt einen Ausschlag.

2.3. Kräfte zwischen elektrischen Ladungen

2.3.1. Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern (Variante 1)

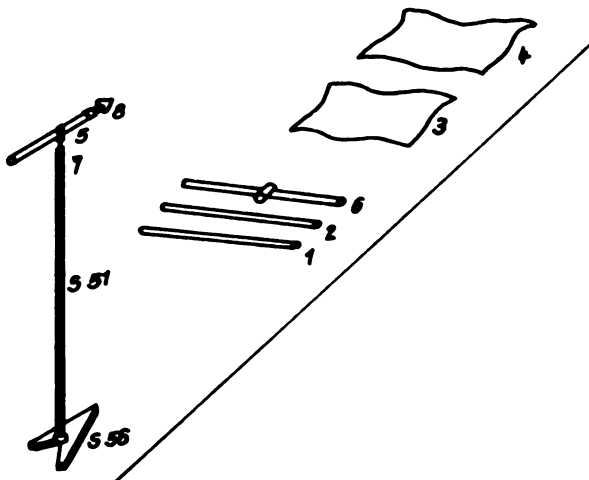
Zielstellung

Nachweis des Auftretens und des Richtungssinns von Kräften zwischen geladenen Körpern mittels geriebener Stäbe

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Plaststab mit Nadellager (5)
1	Glasstab mit Nadellager (6)
1	Nadel mit Fuß (7)
1	Zeiger (8)
1	Stativstab, 500 mm lang (S 51)
1	Kleiner V-Fuß (S 56)

Aufbau



Durchführung des ersten Teilexperiments

Der Plaststab wird durch Reiben am Kunstfasertuch elektrisch negativ aufgeladen und auf die Nadel aufgesteckt. Der andere Plaststab wird ebenfalls elektrisch aufgeladen und dem aufgesteckten Stab genähert. Der Glasstab wird elektrisch positiv aufgeladen und dem aufgesteckten Plaststab genähert.

Beobachtung

Der drehbar gelagerte, geladene Plaststab wird von dem geladenen anderen Plaststab bei Annäherung abgestoßen und von dem geladenen Glasstab bei Annäherung angezogen.

Durchführung des zweiten Teilexperiments

Der Glasstab wird durch Reiben mit dem Ledertuch elektrisch positiv aufgeladen und auf die Nadel aufgesteckt. Der Plaststab wird negativ aufgeladen und dem Glasstab genähert. Der andere Glasstab wird positiv aufgeladen und dem aufgesteckten Stab genähert.

Beobachtung

Der drehbar gelagerte, geladene Glasstab wird von dem geladenen Plaststab bei Annäherung angezogen und von dem geladenen Glasstab bei Annäherung abgestoßen.

Ergebnisse

Zwischen elektrisch geladenen Körpern treten Kräfte auf. Gleichnamig geladene Körper stoßen sich ab, ungleichnamig geladene Körper ziehen einander an.

2.3.2. Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern (Variante 2)

Zielstellung

Nachweis des Auftretens und des Richtungssinns von Kräften zwischen geladenen Körpern mittels elektrisch geladener Kugeln.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
1	Hohlkugel mit 10 mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Aufhängefaden
2	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
1	Stativstab, 500 mm lang (S 51)
1	Stativstab, 250 mm lang (S 52)
1	großer V-Fuß (S 55)
1	kleiner V-Fuß (S 56)
2	Kreuzmuffe (S 58)
1	Parallelmuffe (S 59)

Durchführung

Die Pendelkugel wird mit dem geriebenen Plast- oder Glasstab elektrisch aufgeladen. Anschließend wird die Standkugel gleichartig aufgeladen und der Pendelkugel vorsichtig genähert. Das Experiment wird mit ungleichartigen Ladungen beider Kugeln wiederholt.

Beobachtung

Sind beide Kugeln gleichartig geladen, so stoßen sie einander ab. Sind die Kugeln ungleichartig geladen, so ziehen sie einander an.

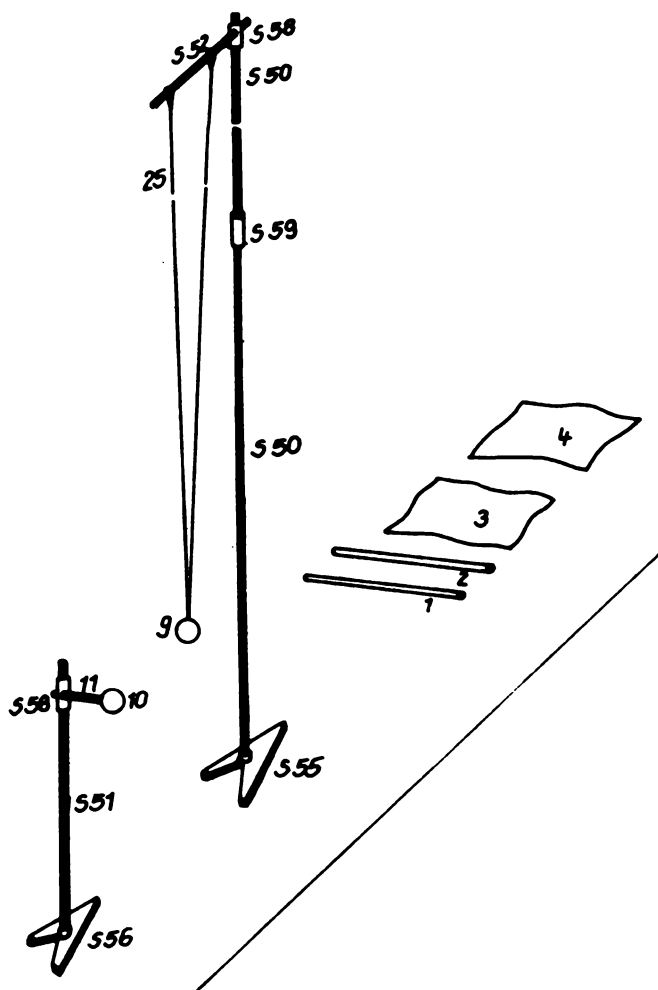
Ergebnis

Zwischen elektrisch geladenen Körpern treten Kräfte auf. Gleichartig geladene Körper stoßen sich ab, ungleichartig geladene Körper ziehen einander an.

Hinweis

Die Bewegung der Pendelkugel unter dem Einfluß der auftretenden Kräfte kann durch Projektion eindeutig sichtbar gemacht werden. Dazu werden die Kugeln in geringer Höhe über der Schreibfläche eines Schreibprojektors angeordnet (vergl. Anordnung bei Experiment 2.3.3.).

Aufbau



Die Hohlkugel mit Aufhängeöse wird mittels eines möglichst langen Aufhängefadens bifilar aufgehängt. Die Hohlkugel mit 10 mm-Bohrung ist auf den Isolierstab aufgesteckt. Der Abstand der beiden Kugeln beträgt zunächst 30 cm. Beide Kugeln befinden sich in gleicher Höhe über dem Boden.

2.3.3. Nachweis des Coulombschen Gesetzes

Zielstellung

Quantitativer Nachweis der Gesetze

$$F \sim \frac{1}{r^2} \quad \text{für } Q_1, Q_2 = \text{konstant}$$

$$\text{und } F \sim Q_1 \cdot Q_2 \quad \text{für } r = \text{konstant}$$

Vorbemerkung

Für die Kräfte, die zwei Punktladungen Q_1 und Q_2 mit dem Abstand r aufeinander ausüben, gilt

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad ; \quad \epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Der experimentelle Nachweis der Gesetze

$$F \sim \frac{1}{r^2} \quad \text{und} \quad F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

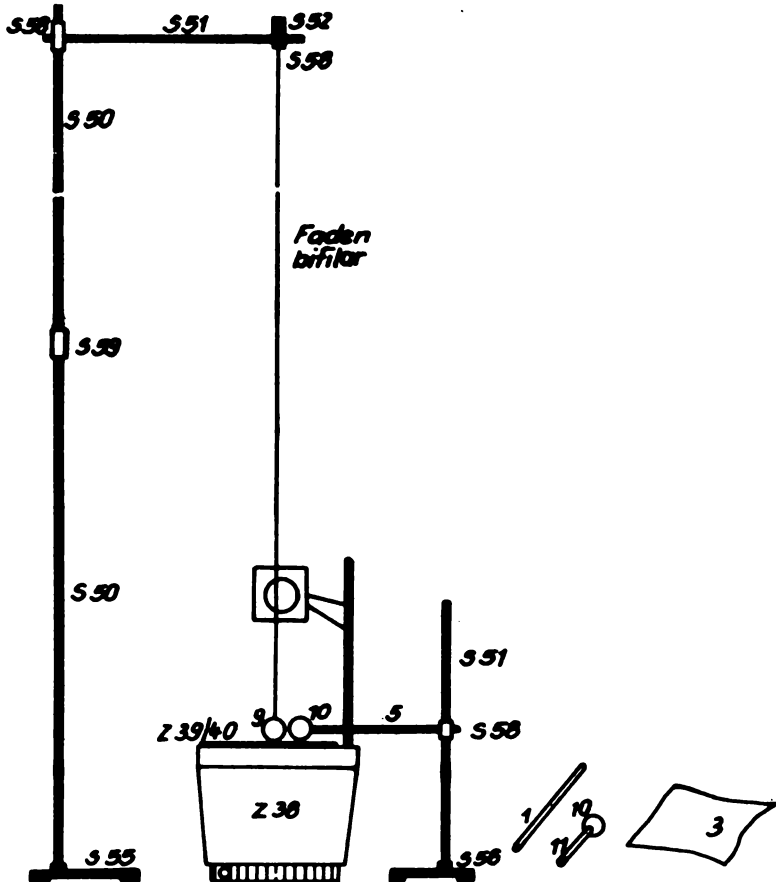
erfolgt über die Bestimmung der Kraft, die eine elektrisch geladene Standkugel und eine elektrisch geladene Pendelkugel aufeinander ausüben. Bei den kleinen Pendelausschlägen, die dabei auftreten, kann die Auslenkung als proportional zur auslenkenden Kraft angesehen werden. Demzufolge ist die Auslenkung ein Maß für die Kraft.

Geräte

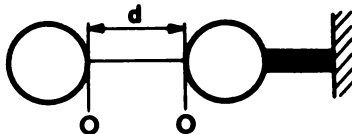
Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Plaststab mit Nadellager (5)
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
2	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Aufhängefaden (25)
1	Schreibprojektor (Z 38)
1	Projektionsfolie
	Quadratraster (Z 39)
	oder Projektionsfolie
	Koordinatensystem (Z 40)
2	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
2	Stativstab, 500 mm lang (S 51)
1	Stativstab, 250 mm lang (S 52)
1	großer V-Fuß (S 55)
1	kleiner V-Fuß (S 56)
3	Kreuzmuffe (S 58)
1	Parallelmuffe (S 59)

Erstes Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Kraft vom Abstand der Ladungen

Aufbau

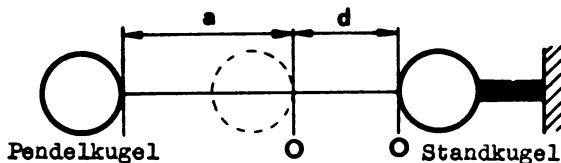


Die Standkugel und die Pendelkugel werden sorgfältig justiert so daß sie sich im Abstand $d = 1 \text{ cm}$ in geringer Höhe über der Schreibfläche des Schreibprojektors gegenüberstehen. Die auf die Schreibfläche aufgelegte Rasterfolie bildet die Skale. Die Nullagen beider Kugeln werden markiert (s. Skizze).



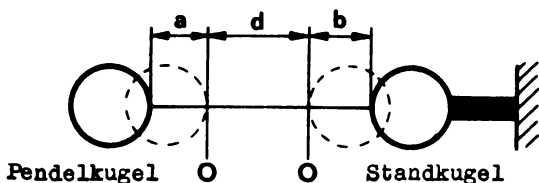
Durchführung

Beide Kugeln werden mit dem geriebenen Plaststab gleichartig aufgeladen. Die Pendelkugel entfernt sich um a von ihrer Nullage (s. Skizze).



Ein zu starkes Pendeln kann durch vorsichtiges Festhalten der Aufhängefäden gedämpft werden. Der Wert für a wird abgelesen und in eine Tabelle eingetragen (s. untenstehendes Beispiel).

Danach wird schrittweise durch vorsichtiges Verschieben der Standkugel um b der Abstand der beiden Kugeln vergrößert (s. Skizze).



Zusammengehörende Werte a und b werden zeilenweise in die Tabelle eingetragen.

Ergebnisse

Die Auslenkung a der Pendelkugel wird als Maß für die auslenkende Kraft betrachtet. Wegen der räumlichen Ausdehnung der Probekörper werden als Sitz der Ladungen jene beiden Punkte der Kugeloberflächen angenommen, die einander am nächsten gegenüberliegen. Bei der Auswertung ist deren Abstand gleich dem Abstand r der Ladungen. Es gilt $r = a + b + d$.

Beispiel einer Meßreihe

d in cm	a in cm	b in cm	r in cm	$a \cdot r^2$ in cm ³
1,0	4,5	0	5,5	136
1,0	4,0	1,0	6,0	144
1,0	3,5	2,0	6,5	148
1,0	3,0	3,0	7,0	147
1,0	2,5	4,0	7,5	141
1,0	2,2	5,0	8,2	148

Das Produkt $a \cdot r^2$ erweist sich angenähert als konstant.
Somit gilt $F \cdot r^2 = \text{konstant}$ oder

$$F \sim \frac{1}{r^2} \quad (\text{für } Q_1, Q_2 = \text{konstant}).$$

Zweites Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Kraft von der Größe der Ladungen Q_1 und Q_2

Aufbau

Die Anordnung ist die gleiche wie beim ersten Teilexperiment. Abstand der beiden ungeladenen Kugeln $d = 1 \text{ cm}$.

Durchführung

Die Kugeln werden mit dem geriebenen Plaststab gleichartig aufgeladen und anschließend kurz zusammengebracht, so daß sich die aufgetragene Ladung gleichmäßig über beide Kugeln verteilt ($Q_1 = Q_2 = Q$). Abstand a ermitteln und in Tabelle eintragen (s. untenstehendes Beispiel).

Danach wird mit der ungeladenen, auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel (10) die Standkugel berührt, deren Ladung dadurch halbiert wird. Der neue kleiner gewordene Abstand a wird abgelesen.

Hohlkugel erden und Ladung der Standkugel nochmals halbieren (auf $\frac{Q}{4}$) usw.

Die Kugeln dürfen sich während der Meßreihe nicht berühren, damit kein Ladungsausgleich erfolgt.

Ergebnisse

Die Ladung der Pendelkugel wird während des Experiments mit $Q = \text{konstant}$ angenommen. Die Ladung der Standkugel ist abgesunken. Die Auslenkung a der Pendelkugel wird als das Maß für die auslenkende Kraft betrachtet. Der Quotient $\frac{a}{Q_1 \cdot Q_2}$ wird ermittelt.

Beispiel einer Meßreihe

Q_1 in Ladungseinheiten	Q_2 in Ladungseinheiten	a in cm	$\frac{a}{Q_1 \cdot Q_2}$ in cm je Ladungseinheit
1	1	4	4
1	0,5	2	4
1	0,25	1	4
1	0,125	0,5	4

Der Quotient in der letzten Spalte erweist sich als konstant. Somit gilt auch

$$\frac{F}{Q_1 \cdot Q_2} = \text{konst. bzw. } F \sim Q_1 \cdot Q_2 \quad (\text{für } r = \text{konst.}).$$

2.4. Ladungsausgleich

2.4.1. Neutralisation von Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens

Zielstellung

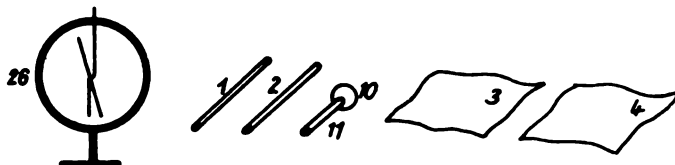
Nachweis der Neutralisation von Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Hohlkugel mit 10 mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	elektrische Gabel (23)
2	Elektrometer (26)

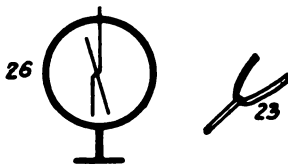
Aufbau

Variante 1:



Variante 2:

Geräte wie Variante 1



Durchführung und Beobachtungen

Variante 1 (mit einem Elektrometer)

Das Elektrometer wird mit dem geriebenen Glasstab positiv aufgeladen. Danach werden mittels der auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel nacheinander kleine Portionen negativer Ladung von dem geriebenen Plaststab auf das Elektrometer übertragen. Der Zeigerausschlag geht nach und nach zurück und erscheint danach wieder, falls die negative Ladung überwiegt. Das Experiment wird mit der entgegengesetzten Ladung analog wiederholt.

Variante 2 (mit 2 Elektrometern)

Beide Elektrometer werden entgegengesetzt auf gleiche Zeigerausschläge aufgeladen und anschließend mit der elektrischen Gabel leitend verbunden. Der Ausschlag geht bei beiden Meßgeräten auf Null zurück. Beide Elektrometer werden entgegengesetzt, aber nicht auf gleiche Zeigerausschläge aufgeladen. Nach dem Ladungsausgleich mit der elektrischen Gabel haben beide Geräte gleiche Zeigerausschläge und zwar mit der Ladungsart des vorher stärker aufgeladenen Elektrometers.

Ergebnisse

Gleich große Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens neutralisieren sich bei Vereinigung. Werden verschiedenen große Ladungen vereinigt, so neutralisiert die kleinere Ladung nur einen Teil der größeren Ladung. Der Ladungsrest hat dann das Vorzeichen der größeren Ladung.

2.4.2. Stufenweiser Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten (unselbständige Entladung)

Zielstellung

Demonstration des stufenweisen, mittels eines Konduktors durchgeführten Ladungsausgleichs zwischen zwei unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten

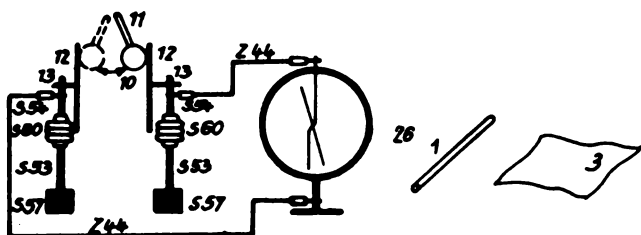
Vorbemerkungen

Durch Transport von Ladungen zwischen den unterschiedlich geladenen Platten eines Kondensators wird der Ladungsunterschied zwischen diesen verringert, das elektrische Feld wird abgebaut. Das erfolgt stufenweise, wenn eine Hohlkugel (Konduktor) zum Ladungstransport verwendet wird. In der hier beschriebenen Anordnung wird die Ladung durch den Lehrer bewegt (unselbständige Entladung).

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Hohlkugel mit 10 mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Elektrometer (26)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Die eine Platte des Kondensators wird mit dem Ladungsknopf, die andere mit dem Gehäuse des Elektrometers verbunden. Die erste Platte wird mit dem geriebenen Plaststab aufgeladen, bis das Elektrometer einen größeren Zeigeraus-
schlag zeigt (eventuell mehrmals Ladungen aufbringen).

Durchführung

Mit der auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel werden abwechselnd in rascher Folge beide Kondensatorplatten berührt.

Beobachtung

Die Spannung, die das Elektrometer anzeigt, geht stufenweise auf Null zurück.

Ergebnis

Die Hohlkugel hat bei Berührung mit einer Platte jeweils Ladung von dieser übernommen und nach und nach auf die andere Platte übertragen. Dabei ist der Ladungsunterschied zwischen beiden Platten stufenweise abgebaut worden. Durch die Bewegung der Hohlkugel ist Ladung transportiert worden.

2.4.3. Stufenweiser Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten (selbständige Entladung)

Zielstellung

Demonstration des stufenweisen Ladungsausgleichs zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten durch Ladungstransport mittels einer Pendelkugel

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	elektrische Gabel (23)
1	Aufhängefaden (25)
1	Elektrometer (26)
1	Influenzmaschine (Z 34)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
1	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
1	Stativstab, 250 mm lang (S 52)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
1	großer V-Fuß (S 55)
2	Rundfuß (S 57)
1	Kreuzmuffe (S 58)
2	Isolator (S 60)

Durchführung

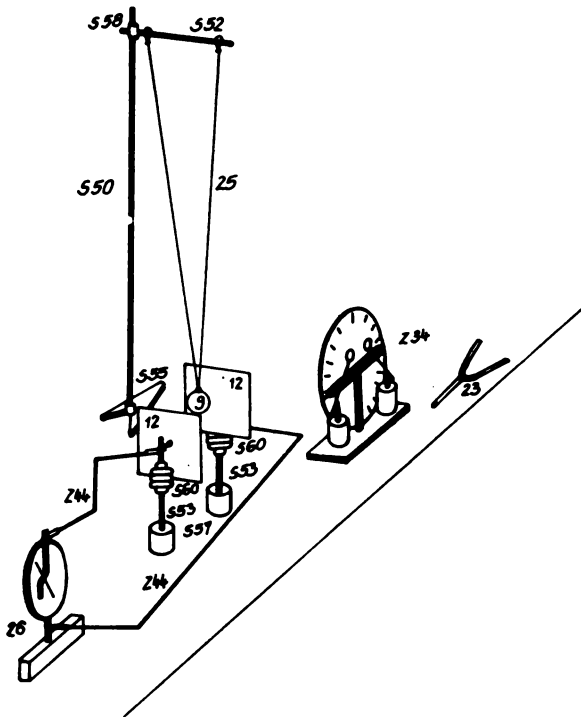
Mittels der Influenzmaschine wird Ladung erzeugt, die durch die elektrische Gabel auf den Kondensator übertragen wird. Da für dieses Experiment größere Ladungsmengen erforderlich sind, ist ein Aufladen mit einem geriebenen Stab nicht ausreichend.

Die aufgehängte Pendelkugel wird zwischen die Platten geschoben und eventuell mit der Hand ein wenig auf eine Kondensatorplatte hin bewegt.

Beobachtung

Die Hohlkugel pendelt zwischen beiden Kondensatorplatten hin und her. Dabei sinkt die Spannung zwischen den Platten allmählich ab. Die Bewegung der Kugel wird immer langsamer. Schließlich erreicht sie die Kondensatorplatten nicht mehr. Nun bleibt die Spannung konstant.

Aufbau



Das Elektrometer sollte auf eine gut isolierende Unterlage gestellt werden. Der Plattenabstand beträgt nicht mehr als 15 cm.

Ergebnis

Die Kugel wird von einer Kondensatorplatte angezogen, übernimmt bei Berührung mit ihr Ladung. Sie wird daraufhin durch die Feldkraft in Richtung der anderen Platte bewegt, gibt dort ihre Ladung ab, übernimmt von dieser Platte Ladung usw. Die Kugel transportiert Ladung zwischen den Platten und wird durch die Feldkraft bewegt (selbständige Entladung). Die Energie des elektrischen Feldes wird in Bewegungsenergie der Kugel umgewandelt. Dabei wird das elektrische Feld stufenweise abgebaut.

Variante

Werden die Kondensatorplatten an die Influenzmaschine angeschlossen, dann kann die Pendelbewegung aufrecht erhalten bleiben. Die ausgetauschte Ladung wird vom Experimentator durch Drehen der Kurbel nachgeliefert.

2.4.4. Entladung eines Plattenkondensators über eine Glimmlampe

Zielstellung

Nachweis des Zusammenbrechens des elektrischen Feldes zwischen zwei Kondensatorplatten bei Ladungsausgleich, Demonstration der Energieumwandlung beim Abbau des elektrischen Feldes

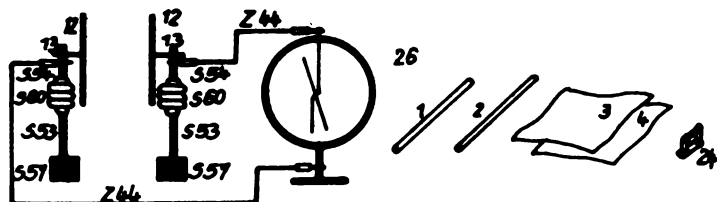
Vorbemerkung

Mit diesem Experiment kann der Übergang von der Elektrostatik zur Elektrodynamik vorbereitet werden.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Glimmlampe (24)
1	Elektrometer (26)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Der Aufbau erfolgt entsprechend der Skizze. Eine Kondensatorplatte wird mit dem Ladungsknopf, die andere mit dem Gehäuse des gut isoliert aufgestellten Elektrometers verbunden. Der Abstand der Kondensatorplatten beträgt 3 cm.

Durchführung

Die Kondensatorplatten werden mittels der geriebenen Stäbe entgegengesetzt aufgeladen. Danach wird die Glimmlampe von oben vorsichtig gleichzeitig auf beide Kondensatorplatten aufgesetzt.

Beobachtung

Die Glimmlampe leuchtet kurz auf, die Spannung, die das Elektrometer anzeigt, geht auf Null zurück.

Ergebnis

Über die Glimmlampe hat ein Ladungsausgleich zwischen den Kondensatorplatten stattgefunden. Das elektrische Feld ist dabei zusammengebrochen. Feldenergie ist teilweise in Licht umgewandelt worden.

Das elektrische Feld ist eine Voraussetzung für das Fließen eines Stromes. Beim Fließen des Stromes wird die Energie des elektrischen Feldes in andere Energieformen umgewandelt.

Durchführung

Das elektrische Leitvermögen der verschiedenen Stäbe aus Metall, Holz, Plast und Glas wird untersucht, indem jeweils die Kondensatorplatten zunächst mittels der geriebenen Stäbe aus Plast und Glas entgegengesetzt aufgeladen werden und anschließend durch die verschiedenen Stäbe überbrückt werden. (Vor dem Auflegen müssen die Stäbe aus Glas und Plast entladen werden.) Das Experiment sollte auch mit einem angefeuchteten Glas- oder Plaststab durchgeführt werden.

Der Zeigerausschlag des Elektrometers wird jeweils beobachtet.

Beobachtung

Der Zeigerausschlag des Elektrometers geht bei Auflegen des Metallstabes rasch zurück, geht durch den Holzstab langsam zurück und bleibt bei Auflegen des Plast- und des Glasstabes längere Zeit erhalten.

Wird der Plaststab angefeuchtet, geht der Zeigerausschlag ebenfalls rasch zurück.

Ergebnis

Elektrische Ladungen werden von verschiedenen Stoffen unterschiedlich gut geleitet. Man bezeichnet Stoffe, die Elektrizität gut leiten, als Leiter. Stoffe, die Elektrizität sehr schlecht leiten, werden Nichtleiter (Isolatoren) genannt. Jeder Isolator besitzt ein, teilweise außerordentlich geringes, elektrisches Leitvermögen. Absolut nichtleitend ist lediglich das Vakuum.

2.4.6. Entladen eines Konduktors über ein Galvanometer

Zielstellung

Nachweis des Ladungstransportes beim Entladen mittels des Stromausschlages eines Galvanometers

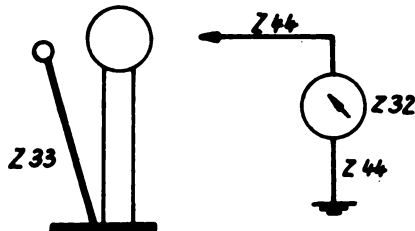
Vorbemerkungen

Der beim Zusammenbruch eines elektrischen Feldes fließende Strom kann mit elektrodynamischen Meßgeräten nachgewiesen werden. Für Demonstrationszwecke ist ein Spiegelgalvanometer gut geeignet. Es zeigen aber auch andere empfindliche Meßgeräte im A-Bereich einen Ausschlag. Durch Verwendung von Kondensatoren größerer Kapazität (Leidener Flasche, Blockkondensator) anstelle des Kugelkonduktors kann die fließende Ladungsmenge erheblich vergrößert werden. Mittels eines geeichten ballistischen Galvanometers können Ladungen gemessen werden.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Drehspul-Spiegelgalvanometer (Z 32)
1	Bandgenerator (Z 33)
2	Verbindungsleiter (Z 44)

Aufbau



Durchführung

Ein Pol des Drehspul-Spiegelgalvanometers wird geerdet, der andere mit dem aufgeladenen Konduktor des Bandgenerators verbunden.

Beobachtung

Bei Verbindung des geerdeten Meßgerätes mit dem Konduktor des Bandgenerators ist ein kurzzeitiger Ausschlag des Spiegelgalvanometers zu beobachten.

Ergebnis

Bei Entladung des Konduktors tritt ein Stromfluß auf. Der ballistische Ausschlag des Galvanometers dauert länger als der nur wenige Tausendstel Sekunden dauernde Stromfluß selbst. Er ist ein Maß für den Stromstoß und damit auch für die Ladungsmenge.

2.5. Ladungsübertragung

2.5.1. Nachweis der Ladungsübertragung mit zwei Elektrometern

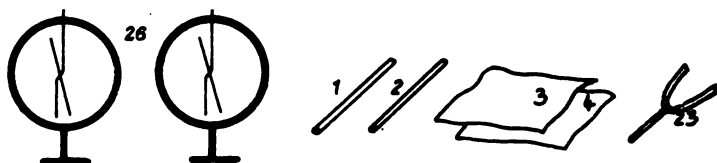
Zielstellung

Einfacher Nachweis der Übertragbarkeit elektrischer Ladungen

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	elektrische Gabel (23)
2	Elektrometer (26)

Aufbau



Durchführung und Beobachtung

Ein Elektrometer wird mittels eines geriebenen Stabes elektrisch geladen. Mit Hilfe der elektrischen Gabel wird danach die Ladung auf das zweite Elektrometer übertragen, das einen Zeigerausschlag zeigt. Das Vorzeichen der Ladung auf dem zweiten Elektrometer wird durch Annäherung eines aufgeladenen Stabes untersucht. Das zweite Elektrometer erweist sich mit Ladung des gleichen Vorzeichens geladen wie das erste.

Das Experiment wird in analoger Weise mit der Ladung des entgegengesetzten Vorzeichens wiederholt. Es werden die gleichen Beobachtungen gemacht.

Ergebnis

Elektrische Ladung kann übertragen werden.

2.5.2. Ladungsübertragung von einem Kugelkonduktor auf ein Elektrometer

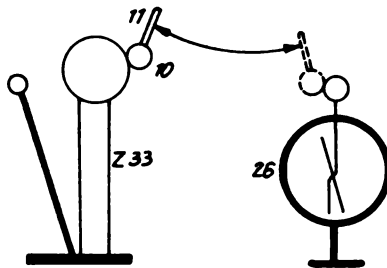
Zielstellung

Nachweis der portionsweisen Übertragung elektrischer Ladungen

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Elektrometer (26)
1	Bandgenerator (Z 33)

Aufbau



Durchführung

Der Bandgenerator wird elektrisch aufgeladen. Mit der auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel werden der Kugelkonduktor des Bandgenerators und anschließend das Elektrometer berührt. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt.

Beobachtung

Das Elektrometer zeigt einen Zeigerausschlag.

Ergebnis

Mittels der Hohlkugel wurde Ladung von dem geladenen Kugelkonduktor auf das Elektrometer übertragen. Elektrische Ladungen können übertragen werden.

2.5.3. Ladungsübertragung von einem Faradaybecher

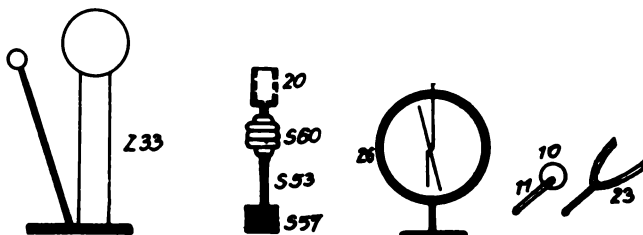
Zielstellung

Nachweis, daß sich elektrische Ladungen an der Außenfläche geladener Hohlkörper befinden und das Innere ladungsfrei bleibt.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Hohlkugel mit 10 mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Faradaybecher (20)
1	elektrische Gabel (23)
1	Elektrometer (26)
1	Bandgenerator (Z 33)
	oder Influenzmaschine (Z 34)
1	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
1	Rundfuß (S 57)
1	Isolator (S 60)

Aufbau



Durchführung

Der isoliert befestigte Faradaybecher wird mittels der elektrischen Gabel am Bandgenerator geladen. Durch Berührung der Außenfläche des Faradaybechers mit der auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel wird Ladung entnommen und auf das Elektrometer übertragen. Danach wird versucht, dem Inneren des Faradaybechers auf die gleiche Weise Ladung zu entnehmen.

Beobachtung

Es ist nur möglich, von der Außenfläche des Faradaybechers elektrische Ladung zu entnehmen und auf das Elektrometer zu übertragen.

Ergebnis

Ladungen befinden sich auf der Außenfläche von Hohlkörpern und Leitern. Die Innenfläche von Hohlkörpern ist frei von Ladungen.

2.5.4. Ladungsübertragung auf einen Faradaybecher

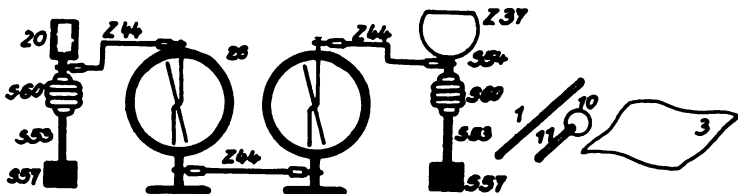
Zielstellung

Nachweis der Entladung einer Probekugel, wenn sie in das Innere eines Hohlkörpers eingeführt wird.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Faradaybecher (20)
2	Elektrometer (26)
1	Kugelkonduktor, von Bandgenerator (Z 37)
3	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
1	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Der Faradaybecher wird isoliert befestigt und mit dem Elektrometer verbunden. Vom Bandgenerator wird die Konduktorkugel abgeschraubt, mittels eines Klemmstabes auf einen Isolator geschraubt und mit einem zweiten Elektrometer leitend verbunden. Die Gehäuse beider Elektrometer werden miteinander verbunden und geerdet.

Durchführung des ersten Teilexperiments

Mittels des geriebenen Plaststabes wird die Konduktorkugel elektrisch aufgeladen (mehrmals Ladungen auftragen), bis ein kleiner Zeigerausschlag am Elektrometer sichtbar ist. Mit der auf den Isolierstab aufgesteckten Hohlkugel wird danach wiederholt Ladung vom Konduktor entnommen und auf die Außenfläche des Faradaybechers gegeben. Der Zeigerausschlag beider Elektrometer wird beobachtet.

Beobachtung

Der Zeigerausschlag des Elektrometers, das mit dem Faradaybecher verbunden ist, steigt allmählich an. Der Zeigerausschlag des anderen Elektrometers sinkt. Nach einiger Zeit zeigen beide Meßgeräte den gleichen Ausschlag des Zeigers, der sich bei Fortführung des Experiments nicht mehr ändert.

Durchführung des zweiten Teilexperiments

Dem geladenen Kugelkonduktor wird wiederholt Ladung entnommen und auf die Innenfläche des Faradaybechers gegeben. Der Zeigerausschlag beider Elektrometer wird beobachtet.

Beobachtung

Der Zeigerausschlag des Elektrometers am Faradaybecher steigt weiter als beim ersten Teilexperiment. Der Zeigerausschlag des anderen Meßgerätes geht nach und nach auf Null zurück.

Ergebnis

Eine elektrisch geladene Probekugel wird entladen, wenn sie in das Innere eines Hohlkörpers eingeführt wird.

2.5.5. Untersuchung der Ladungsdichte auf einem Faradaybecher

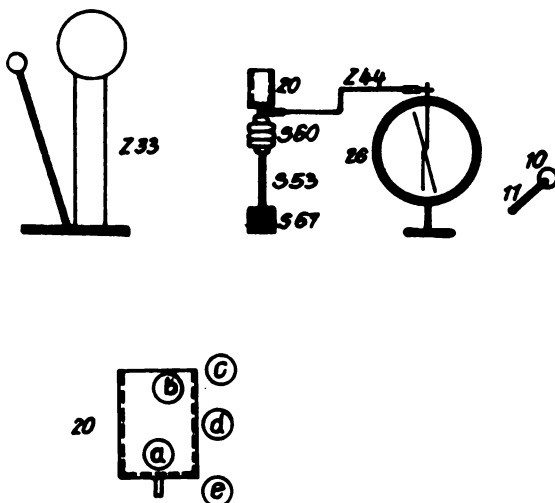
Zielstellung

Nachweis der Abhängigkeit der Ladungsdichte auf einer Fläche von deren Krümmungsradius

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
1	Faradaybecher (20)
1	Elektrometer (26)
1	Bandgenerator (Z 33) oder Hochspannungsgenerator (Z 35)
1	Verbindungsleiter (Z 44)
1	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
1	Rundfuß (S 57)
1	Isolator (S 60)

Aufbau



Der isoliert befestigte Faradaybecher wird mit dem Elektrometer verbunden. Der Faradaybecher wird durch den Bandgenerator bzw. den Hochspannungsgenerator auf eine bestimmte Spannung aufgeladen.

Durchführung

Mit der auf den Isolierstab gesteckten Hohlkugel wird wiederholt von der gleichen Stelle des Faradaybechers Ladung entnommen und zur Erde abgeführt. Es wird die Anzahl der Entladungen ermittelt, die notwendig ist, bis die gleiche Spannung am Elektrometer jeweils auf die Hälfte des Anfangswertes gesunken ist.

Es werden nacheinander folgende Stellen der Becheroberfläche untersucht:

- a - Innenfläche unten
- b - Innenfläche oben
- c - Außenfläche oben
- d - Außenfläche Mitte
- e - Außenkante unten

Beobachtung

Die Anzahl der Entladungen, die erforderlich sind, um die jeweils gleiche Spannung auf die Hälfte zu reduzieren, beträgt

- an der Stelle a: (keine Entnahme von
Ladungen möglich)
- an der Stelle b: 30
- an der Stelle c: 19
- an der Stelle d: 16
- an der Stelle e: 15

Ergebnis

Die Ladungsdichte im Inneren eines Hohlkörpers ist Null. An der Oberfläche ist die Ladungsdichte um so größer, je stärker die Oberfläche an dieser Stelle gekrümmt ist.

2.6. Elektrisches Feld

2.6.1. Kraft auf einen elektrisch geladenen Probekörper im elektrischen Feld

Zielstellung

Qualitativer Nachweis der Kraft auf einen elektrisch geladenen Probekörper im elektrischen Feld

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Aufhängefaden (25)
1	Bandgenerator (Z 33) oder Influenzmaschine (Z 34)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
1	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
1	Stativstab, 250 mm lang (S 52)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
2	Rundfuß (S 57)
1	Kreuzmuffe (S 58)
2	Isolator (S 60)

Durchführung des ersten Teilexperiments

Die Pendelkugel wird zunächst mit dem geriebenen Plaststab negativ aufgeladen. Danach wird durch Drehen an der Kurbel der Spannungsquelle ein elektrisches Feld zwischen den Kondensatorplatten erzeugt. Um lediglich das Auftreten einer Feldkraft zu demonstrieren, sollte die Bewegung der Kugel nicht bis hin zur Kondensatorplatte erfolgen (Einsetzen einer ungedämpften Pendelschwingung). Das Experiment wird mit der positiv aufgeladenen Pendelkugel wiederholt.

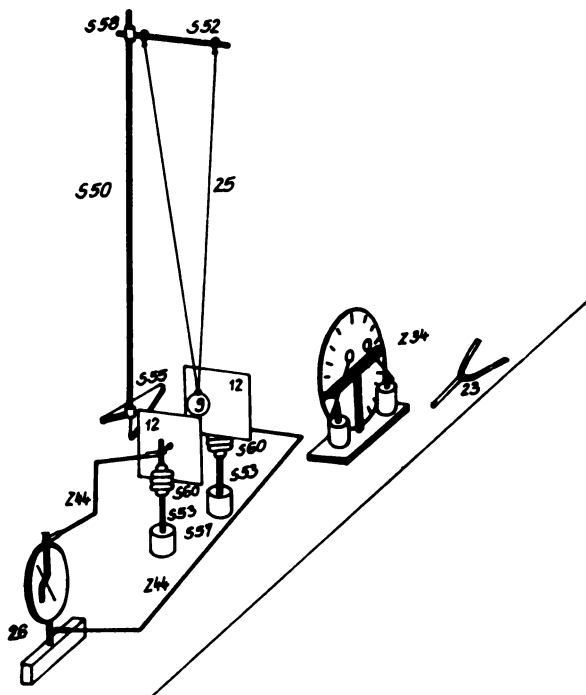
Beobachtung

Die Kugel wird im elektrischen Feld bewegt. Ursache ist eine Kraft, die das elektrische Feld auf die elektrisch geladene Probekugel ausübt.

Ergebnis des ersten Teilexperiments

Elektrisch geladene Probekörper erfahren im elektrischen Feld eine Kraft.

Aufbau



Die Kondensatorplatten befinden sich 30...40 cm voneinander entfernt. Sie sind mit den Polen der Spannungsquelle verbunden.

Durchführung des zweiten Teilexperiments

Die aufgeladene Pendelkugel wird zuerst vorsichtig in Richtung des Feldes, danach senkrecht zur Feldrichtung verschoben. Die Auslenkung des Pendels wird beobachtet. Man vermeide jedoch eine zu starke Annäherung der Kugel an die Kondensatorplatten.

Beobachtung

Die Auslenkung der Pendelkugel aus ihrer Nullage bleibt nahezu unverändert.

Ergebnis des zweiten Teilexperiments

Die Feldkraft ist an allen Stellen des Feldes zwischen zwei Kondensatorplatten nahezu gleich groß.

Hinweis

Man erhält inhomogene Felder, wenn man die eine Kondensatorplatte schräg zur zweiten stellt oder durch einen Kugelleitkonduktor ersetzt.

2.6.2. Richtung der Kraft im elektrischen Feld

Zielstellung

Demonstration der Kraftrichtung im homogenen elektrischen Feld mittels drehbar gelagerter Fähnchen (Feldliniengerät)

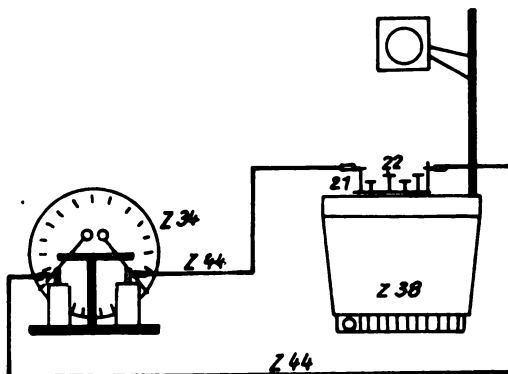
Vorbemerkung

In diesem Experiment wird die Kraftrichtung in verschiedenen Punkten des elektrischen Feldes dargestellt. Damit wird der Feldlinienbegriff vorbereitet. Die Wirkungsweise des Gerätes beruht darauf, daß die auf Nadeln aufgesteckten Fähnchen im elektrischen Feld polarisiert werden und sich in Feldrichtung ausrichten.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Feldliniengerät (Z 21)
16	Fähnchen (Z 22)
1	Influenzmaschine (Z 34)
1	Schreibprojektor (Z 38)
2	Verbindungsleiter (Z 44)

Aufbau



Die Fähnchen werden auf die Nadeln des Feldliniengerätes aufgesteckt. Das Gerät wird auf die Schreibfläche des Schreibprojektors gestellt und mit den Polen der Hochspannungsquelle verbunden.

Durchführung

Zwischen den Platten des Gerätes wird ein elektrisches Feld erzeugt.

Beobachtung

Die Fähnchen drehen sich und stellen sich in Richtung der Feldkräfte ein. Mit Ausnahme der Äußersten weisen alle in die gleiche Richtung. Der räumliche Charakter des Feldes wird wegen der unterschiedlichen Höhe der Fähnchenträger erkannt.

Ergebnis

Im Inneren des elektrischen Feldes eines Plattenkondensators ist die Kraftrichtung an allen Stellen gleich (homogenes Feld). Die Kraftrichtung kann durch Feldlinien dargestellt werden.

Hinweis

Zur Untersuchung der Formen des elektrischen Feldes wird auf die Verwendung des Gerätes Magnetische und elektrische Felder verwiesen.

2.6.3. Zusammenhang zwischen der Feldkraft auf einen geladenen Probekörper und der Größe der Ladung des Probekörpers im homogenen elektrischen Feld

Zielstellung

Quantitativer Nachweis der Gültigkeit von $F \propto Q$ im homogenen elektrischen Feld eines Plattenkondensators

Vorbemerkung

Im homogenen elektrischen Feld gilt

$$E = \frac{F}{Q_p}$$

Q_p Ladung eines Probekörpers
 F Feldkraft auf geladenen Probekörper
 E elektrische Feldstärke

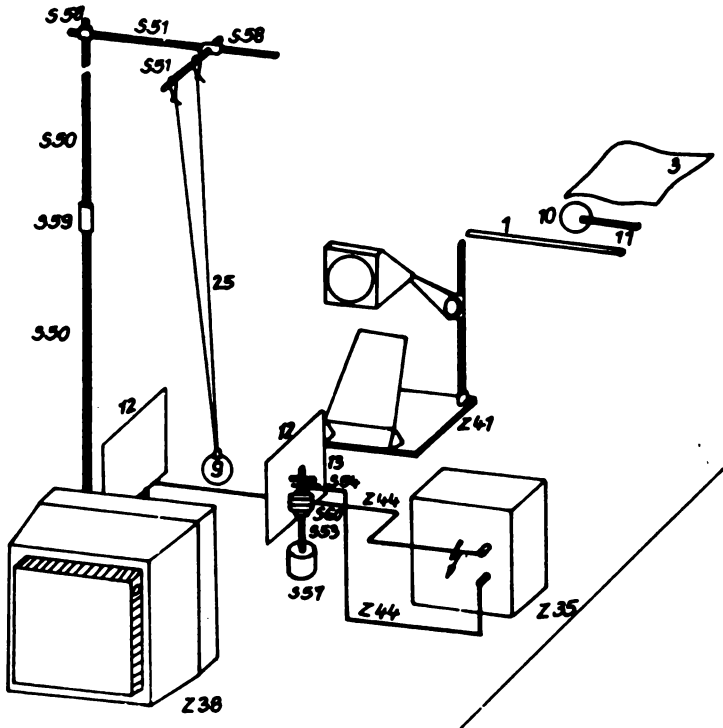
Damit wird der Zusammenhang zwischen der mechanischen Größe Kraft und den elektrischen Größen Feldstärke und Ladung gegeben. Die experimentelle Ermittlung des Gesetzes $F \propto Q$ ist nicht ganz einfach, da der Träger der Ladung keinen Einfluß auf die Gestalt des Feldes haben darf. Das läßt sich mit der vorliegenden Experimentieranordnung nur in grober Annäherung realisieren.

Dieses Experiment ist nur unter Verwendung einer konstanten Hochspannung möglich, die ein Hochspannungsgenerator liefert

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
1	Hohlkugel mit 10mm-Bohrung (10)
1	Isolierstab (11)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Aufhängefaden (25)
1	Hochspannungsgenerator (Z 35)
1	Schreibprojektor (Z 38)
1	Kippanordnung für Schreibprojektor (Z 41)
1	Meßplatte (Z 43)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
2	Stativstab, 500 mm lang (S 51)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
1	großer V-Fuß (S 55)
2	Rundfuß (S 57)
2	Kreuzmuffe (S 58)
1	Parallelmuffe (S 59)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Die Anordnung wird projiziert. Wegen der Größe der Anordnung ist der Einsatz des Schreibprojektors mit Kippanordnung erforderlich. Der Abstand der Kippanordnung vom Schreibprojektor muß mindestens 30 cm betragen, so daß dazwischen die Kondensatorplatten aufgestellt werden können. Der Abstand der Kondensatorplatten beträgt 30 cm. Die Pendelkugel wird bifilar aufgehängt, die Pendellänge beträgt 150 cm. Es ist darauf zu achten, daß sich die Pendelkugel mindestens 10 cm vom Schreibprojektor entfernt befindet, um unerwünschte Wechselwirkungen auszuschließen. Da in dieser Anordnung eine Skale nicht mit projiziert werden kann, muß sie direkt an der Projektionsfläche angebracht werden (Meßplatte). Auf ihr wird die Nulllage der Pendelkugel markiert.

Durchführung

Mit dem geladenen Plaststab wird der Pendelkugel eine bestimmte Ladung Q erteilt. Wenn sich das Pendel wieder in Ruhe befindet, wird die Hochspannung eingeschaltet und allmählich auf etwa 20 kV eingestellt. Die Pendelkugel erfährt eine Kraft und wird in Richtung der positiv geladenen Kondensatorplatte abgelenkt. Die Ablenkung a wird ermittelt

und in eine Tabelle eingetragen (s. untenstehendes Beispiel). Danach wird die Pendelkugel kurz mit der auf den Isolierstab aufgesteckten ungeladenen Hohlkugel berührt. Die Ladung der Pendelkugel wird dadurch halbiert (auf $\frac{Q}{2}$). Die Kraft, die die Pendelkugel erfährt, sinkt, der Ausschlag a geht zurück. Erneut wird mit der inzwischen wieder entladenen Konduktorkugel die Ladung der Pendelkugel halbiert (auf $\frac{Q}{4}$), der neue Ausschlag a ermittelt usw.

Der Hochspannungsgenerator bleibt während der Messung stets eingeschaltet, die Spannung bleibt konstant.

Hinweis: Um keine unkontrollierten Bewegungen der Pendelkugel auftreten zu lassen, empfiehlt es sich, während der Ladungsteilung das Pendel am Aufhängefaden kurz zu fassen und festzuhalten.

Ergebnisse

Bei den kleinen Pendelausschlägen kann a als proportional zur auslenkenden Kraft angesehen werden. Demzufolge gilt bei der Auslenkung a als Maß für die Kraft (vgl. Experiment 3.3.).

Beispiel einer Meßreihe

Q in Ladungseinheiten	a in Skalenteilen	$\frac{a}{Q}$ in Skalenteilen Ladungseinheiten
1	13	13
$\frac{1}{2}$	6	12
$\frac{1}{4}$	3	12
$\frac{1}{8}$	1,5	12

Der Quotient a/Q erweist sich nahezu als konstant.

Somit gilt auch $\frac{F}{Q} = \text{konstant}$, bzw. $F \sim Q$.

Anmerkung

In der beschriebenen Weise sind nur etwa drei Ladungsteilungen möglich. Die Feldstärke sollte durch Einstellen der Hochspannung nur so groß werden, daß keine allzu großen Ausschläge des Pendels auftreten. Meßfehler sind vor allem durch das relativ große Volumen der Pendelkugel gegenüber der Plattenfläche begründet (keine Punktladungen!). Die Fehler werden besonders groß, wenn sich die Kugel der Kondensatorplatte stark annähert.

2.6.4. Zusammenhang zwischen Feldkraft und elektrischer Feldstärke im homogenen elektrischen Feld

Zielstellung

Quantitativer Nachweis des Gesetzes

$$F \sim \frac{U}{d}$$

für das homogene elektrische Feld eines Plattenkondensators

Vorbemerkung

Die elektrische Feldstärke im homogenen elektrischen Feld ist der Quotient aus der Spannung und dem Plattenabstand.

Ihr Betrag ist $E = \frac{U}{d}$.

Für den experimentellen Nachweis wird die Kraft auf einen elektrisch geladenen Probekörper untersucht. Dieses Experiment ist nur unter Verwendung einer konstanten Hochspannung möglich, die ein Hochspannungsgenerator liefert.

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Hohlkugel mit Aufhängeöse (9)
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Aufhängefaden (25)
1	Elektrometer (26)
1	Hochspannungsgenerator (Z 35)
1	Schreibprojektor (Z 38)
1	Kippanordnung für Schreibprojektor (Z 41)
2	Meßplatte (Z 43)
4	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 1000 mm lang (S 50)
2	Stativstab, 500 mm lang (S 51)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
1	großer V-Fuß (S 55)
2	Rundfuß (S 57)
2	Kreuzmuffe (S 58)
1	Parallelmuffe (S 59)
2	Isolator (S 60)

Erstes Teillexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Feldkraft von der Spannung (bei konstanter Ladung und konstantem Plattenabstand)

Aufbau

Analog Experiment 2.6.3. Zusätzlich wird das Elektrometer an die Kondensatorplatten angeschlossen. Die Nullage der Pendelkugel wird im Projektionsbild markiert.

Durchführung

Die Pendelkugel wird mittels des geriebenen Plaststabes negativ aufgeladen. Wenn sich das Pendel wieder in Ruhe befindet, wird eine Spannung von etwa 2 kV angelegt. Durch die Feldkraft wird die Kugel um die Strecke a abgelenkt. Werte für U und a ablesen. Danach wird die Spannung stufenweise erhöht. Das Experiment wird mit möglichst kleinen Pendelausschlägen durchgeführt. Bei größeren Ausschlägen, d.h. zu starker Annäherung der Pendelkugel an die Platte des Kondensators treten Meßfehler auf (Deformation des Feldes durch den nicht punktförmigen Probekörper). Der Fehler kann konstant gehalten werden, wenn der Plattenkondensator jeweils um die Strecke a verschoben wird, so daß sich die Kugel stets an der gleichen Stelle des Feldes befindet.

Ergebnisse

Wie bei den Experimenten 2.3.3. und 2.6.3. kann für kleine Pendelausschläge die Auslenkung a als proportional zur auslenkenden Feldkraft angesehen werden, so daß a als Maß für die Kraft gilt.

Beispiel einer Meßreihe

U in kV	a in Skalenteilen	$\frac{a}{U}$ in <u>Skalenteilen</u> kV
2	1,7	0,85
4	3,5	0,87
6	5,0	0,83
8	6,5	0,81
10	7,5	0,75

Der Quotient $\frac{a}{U}$ erweist sich als angenähert konstant.

Damit gilt auch $\frac{F}{U} = \text{konstant}$ oder $F \sim U$ (für d, ϵ konstant).

Zweites Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Feldkraft vom Abstand der Kondensatorplatten (bei konstanter Ladung und konstanter Spannung)

Aufbau

Gegenüber dem ersten Teilexperiment werden folgende Veränderungen am Aufbau vorgenommen: das Elektrometer wird entfernt, zusätzlich wird eine Meßplatte (Lineal) zwischen den Kondensatorplatten zur Messung des Plattenabstandes angebracht. Dieser beträgt zunächst 30 cm. Die Pendelkugel befindet sich in der Mitte des Kondensators. Die Nullage der Pendelkugel wird im Projektionsbild markiert.

Durchführung

Die Pendelkugel wird mittels des geriebenen Plaststabes negativ aufgeladen. Wenn sich das Pendel wieder in Ruhe befindet, wird die Hochspannung eingeschaltet und auf etwa 10 kV eingestellt. Sie bleibt während des Experiments konstant. Durch die Feldkraft wird die Pendelkugel abgelenkt. Der Betrag der Auslenkung a wird im Projektionsbild abgelesen. Danach wird der Abstand d der Kondensatorplatten schrittweise verringert, zusammengehörende Werte von a und d werden in die gleiche Zeile einer Tabelle eingetragen (s. untenstehendes Beispiel).

Beispiel einer Meßreihe

d in cm	a in Skalenteilen	$a \cdot d$ in Skalenteilen $\cdot$ cm
30	2,3	69
28	2,5	70
26	2,8	73
24	3,0	72
22	3,5	77
20	4,0	80

Das Produkt $a \cdot d$ erweist sich annähernd als konstant. Eine Deformation des Feldes durch den Probekörper, besonders bei geringem Plattenabstand, ist nicht ausgeschlossen.

Somit gilt

$F \cdot d = \text{konstant oder}$

$$F \sim \frac{1}{d} \quad (\text{für } Q, U \text{ konstant})$$

Die Ergebnisse beider Teilerperimente

$$F \sim U \quad \text{und}$$

$$F \sim \frac{1}{d}$$

können zusammengefaßt werden zu

$$F \sim \frac{U}{d}$$

Der Quotient $\frac{U}{d}$ ist die elektrische Feldstärke E . Damit gilt $F \sim E$. (Der Betrag der Feldkraft ist dem Betrag der elektrischen Feldstärke proportional.)

2.7. Kapazität eines Plattenkondensators

2.7.1. Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Plattenfläche, Plattenabstand und Dielektrikum

Zielstellung

Qualitativer Nachweis der Abhängigkeit der Kapazität von Plattenfläche, Plattenabstand und Dielektrikum

Vorbemerkung

Für die Kapazität eines Plattenkondensators mit der Plattenfläche A und dem Plattenabstand d gilt

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

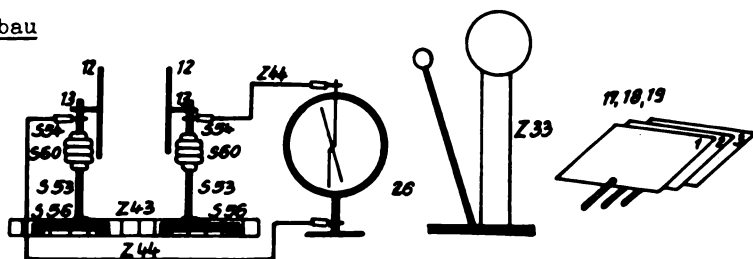
ϵ_r relative Dielektrizitätskonstante

Der Zusammenhang zwischen C und den Größen A, d , wird in drei Teilexperimenten qualitativ nachgewiesen. Da mit einfachen Mitteln keine Kapazitätsbestimmung möglich ist, wird wegen $C \sim \frac{1}{U}$ (bei konstanter Ladung) aus der vom Elektrometer angezeigten Größe der Spannung auf die Kapazität geschlossen.

Geräte

Anzahl	Benennung
2	Kondensatorplatte Alu (12)
2	Haltestift (13)
1	Plastplatte 1 (17)
1	Plastplatte 2 (18)
1	Plastplatte 3 (19)
1	Elektrometer (26) oder Elektroskop (Z 30)
1	Bandgenerator (Z 33) oder Influenzmaschine (Z 34)
1	Meßplatte (Z 43)
2	Verbindungsleiter (Z 44)
2	Stativstab, 100 mm lang (S 53)
2	Klemmstab (S 54)
2	kleiner V-Fuß (S 56)
2	Isolator (S 60)

Aufbau



Erstes Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Kapazität von der Plattenfläche

Aufbau

Das Experiment wird entsprechend der Skizze aufgebaut. Eine Kondensatorplatte wird mit dem Ladungsknopf, die andere mit dem Gehäuse des Elektrometers verbunden. Der Plattenabstand beträgt 1 cm.

Durchführung

Die Platten werden mittels des Bandgenerators aufgeladen, so daß das Elektrometer eine Spannung anzeigt. Danach wird die wirksame Plattenfläche des Kondensators verringert, indem die Platten unter Beibehaltung ihres Abstandes von 1 cm gegeneinander verschoben werden. Der Zeigerausschlag des Elektrometers wird beobachtet.

Beobachtung

Je kleiner die wirksame Plattenfläche des Kondensators wird, desto größer wird die vom Elektrometer angezeigte Spannung, desto kleiner wird die Kapazität des Kondensators.

Ergebnis

Die Kapazität eines Plattenkondensators nimmt mit der Vergrößerung der Plattenfläche zu.

Zweites Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Kapazität vom Abstand der Platten

Aufbau

Der Plattenabstand wird auf 50 cm vergrößert.

Durchführung

Die Kondensatorplatten werden mittels des Bandgenerators aufgeladen, so daß das Elektrometer eine Spannung anzeigt. Der Abstand der Platten wird auf wenige Millimeter verringert. Der Zeigerausschlag des Elektrometers wird beobachtet.

Beobachtung

Je geringer der Plattenabstand wird, desto geringer wird die vom Elektrometer angezeigte Spannung, desto größer wird die Kapazität des Kondensators.

Ergebnis

Die Kapazität eines Plattenkondensators nimmt mit der Verringerung des Plattenabstandes zu.

Drittes Teilexperiment: Untersuchung der Abhängigkeit der Kapazität vom Stoff zwischen den Kondensatorplatten

Aufbau

Der Aufbau bleibt wie beim ersten Teilexperiment, der Plattenabstand wird jetzt auf wenige Millimeter verringert.

Durchführung

Die Kondensatorplatten werden mittels des Bandgenerators aufgeladen, so daß das Elektrometer eine Spannung anzeigt. Nacheinander werden die Plastplatten 1, 2 und 3 vorsichtig in den Zwischenraum zwischen die Kondensatorplatten eingeführt, wobei der Zeigerausschlag des Elektrometers beobachtet wird.

Beobachtung

Beim Einführen der Plastplatten geht die vom Elektrometer angezeigte Spannung mehr oder weniger stark zurück, nimmt die Kapazität des Kondensators zu.

Ergebnis

Die Kapazität eines Kondensators nimmt mit dem Einführen von Isolierstoffen (Dielektrika) zwischen die Platten zu.

2.8. Influenz

2.8.1. Nachweis der Influenz mittels eines Elektrometers

Zielstellung

Einfacher Nachweis der Influenz, Aufladen eines Elektrometers durch Influenz

Geräte

Anzahl	Benennung
1	Plaststab (1)
1	Glasstab (2)
1	Kunstfasertuch (3)
1	Ledertuch (4)
1	Elektrometer (26)

Erstes Teilexperiment: Nachweis der Influenz

Durchführung und Beobachtung

Der Plaststab wird durch Reiben am Kunstfasertuch elektrisch aufgeladen. Er wird dem Elektrometer genähert, das einen Zeigerausschlag zeigt. Der Ausschlag geht wieder zurück, wenn der Stab entfernt wird.

Das Experiment wird analog mit dem am Ledertuch geriebenen Glasstab wiederholt. Die Beobachtung ist die gleiche.

Das Elektrometer wird auf einen kleinen Ausschlag des Zeigers aufgeladen. Bei Annäherung eines geladenen Stabes geht der Ausschlag zurück oder vergrößert sich, je nachdem, ob der Stab entgegengesetzte oder gleichartige Ladung wie das Elektrometer trägt.

Ergebnisse

Bei Annäherung eines geladenen Stabes an das Elektrometer werden in ihm frei bewegliche Elektronen verschoben. Es kommt zu einer Trennung der Ladungen. Die Ladungstrennung verschwindet wieder, wenn der geladene Stab entfernt wird.

Influenz kann angewendet werden, um den Ladungszustand eines Elektrometers zu untersuchen.

Zweites Teilexperiment: Aufladung eines Elektrometers mittels Influenz

Durchführung

Dem Elektrometer wird der elektrisch geladene Plaststab auf geringen Abstand genähert. Die vom Elektrometer angezeigte Ladung wird durch Berühren des Ladungsknopfes mit dem Finger abgeleitet, während der Plaststab unverändert in der Nähe des Elektrometers gehalten wird. Nach dem Loslassen des Elektrometers wird der Stab wieder entfernt.

Beobachtung

Das Elektrometer zeigt nach dem Loslassen eine Ladung an. Durch Annähern mit dem geladenen Plaststab wird festgestellt, daß die Ladung des Elektrometers entgegengesetztes Vorzeichen wie die des Plaststabes besitzt.

Ergebnis

Während der Erdung des Elektrometers durch das Berühren mit dem Finger wird durch den angenäherten Plaststab die ungleichnamige Ladung gebunden. Die gleichnamige Ladung fließt ab. Nach Entfernen des Stabes verbleibt die ungleichnamige Ladung auf dem Elektrometer. Auf diese Weise lassen sich Elektrometer aufladen.

Hersteller:



**VEB Kombinat Polytechnik und
Präzisionsgeräte Karl-Marx-Stadt
Stammbetrieb VEB Polytechnik
Karl-Marx-Stadt**

DDR - 9023 Karl-Marx-Stadt
Melanchthonstraße 4/8, PSF 93
Deutsche Demokratische Republik