

Physikalische Schulversuche

6

Elektrizitätslehre I



Physikalische Schulversuche

Sechster Teil
Elektrizitätslehre I

Brunstein, Fischer, Heise, Paucker

8. Auflage



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1982

Verfaßt von
Wolfgang Brunstein (Kapitel 1, 3 und 4)
Gerhard Heise (Kapitel 2)
Josef Fischer und Heinrich Paucker (Kapitel 5)

Redaktion: Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1979
Die 1. bis 4. Auflage erschien unter den Bestellnummern 02006 und 022106
Lizenz Nr. 203 · 1000/81 (DN 022144-8)
LSV 0645
Einband: Manfred Behrendt
Zeichnungen: Heinrich Linkwitz
Typographie: Atelier vvv
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 5820 Bad Langensalza
Schrift: 9/10 Extended Monotype
Redaktionsschluß: 22. 6. 1981
Bestell-Nr. 7067456
DDR 8,00 M

Inhalt

Einleitung	11
1. Experimentiergeräte und Hilfsmittel zur Elektrizitätslehre	15
1.1. Spannungsquellen .	15
1.1.1. Spannungsstufen	15
1.1.2. Akkumulatoren . .	15
1.1.3. Galvanische Elemente .	17
1.1.4. Stromversorgungsgeräte	17
1.1.5. Netzspannung	20
1.1.6. Schalttafeln . . .	20
1.1.7. Hochspannungsquellen	21
1.2. Einstell- und Meßwiderstände, Kondensatoren	23
1.2.1. Widerstandsmaterial und Festwiderstände	23
1.2.2. Einstellwiderstände	24
1.2.3. Meßwiderstände	25
1.2.4. Kondensatoren .	26
1.3. Meßgeräte	27
1.3.1. Demonstrations-Strom- und Spannungsmesser	27
1.3.2. Spiegelgalvanometer	29
1.3.3. Röhrenvoltmeter	29
1.3.4. Elektrostatische Meß- und Anzeigeräte	29
1.3.5. Vielfachmeßgeräte .	30
1.3.6. Leistungsmesser	31
1.3.7. Geräte zum Messen der elektrischen Arbeit	31
1.4. Gerätesätze und Hilfsmittel .	31
1.4.1. Tafelschaltgerät	31
1.4.2. Aufbaugerätesatz Elektrizitätslehre .	32
1.4.3. Gerätesatz Elektrostatik . . .	32
1.4.4. Geräte mit Aufbaucharakter . .	32
1.4.5. Schülerexperimentiergeräte (SEG)	32
1.4.6. Verbindungen und Verbindungsleiter	33
1.4.7. Herstellen von Schaltungen	35
1.4.8. Elektromotoren als Antriebsmittel .	36



1.5.	Hinweise für die Aufbewahrung und Pflege elektrischer Geräte — Handwerkliche Hinweise	38
1.5.1.	Aufbewahren von Drähten und Folien	38
1.5.2.	Aufbewahren von Magneten	38
1.5.3.	Abisolieren von Drähten . . .	39
1.5.4.	Lötarbeiten an Kupferdrähten	39
1.5.5.	Verarbeiten isolierender Plaste	40
1.5.6.	Reinigen von Kontakten .	40
1.6.	Arbeitsschutz und Unfallverhütung	41
1.6.1.	Gesetzliche Bestimmungen	41
1.6.2.	Vorsichtsmaßnahmen beim Experimentieren	41
1.6.3.	Erste Hilfe bei elektrischen Unfällen .	42
2.	Erscheinungen und Grundbegriffe im elektrischen Stromkreis	43
2.0.	Methodische Bemerkungen	43
2.1.	Die elektrische Stromstärke	45
2.1.1.	Ladungsaustausch zwischen zwei geladenen Körpern .	45
2.1.2.	Untersuchen von Leitern und Isolatoren	47
2.1.3.	Messen der Stromstärke	48
2.1.4.	Nachweis einer Stromrichtung bei Gleichstrom mit einem Meßgerät	49
2.1.5.	Einführung des Begriffes Wechselstrom	50
2.1.6.	Gegenüberstellung der Erscheinungen bei Gleich- und Wechselstrom in einer Stabglühlampe	50
2.2.	Die elektrische Spannung	51
2.2.1.	Einführung des Spannungsbegriffes	51
2.2.2.	Nachweis der Spannung zwischen zwei geladenen Körpern mit dem Elektroskop	53
2.2.3.	Nachweis der Spannung mit der Spannungswaage	54
2.2.4.	Messen der Spannung zwischen verschiedenen Punkten eines einfachen Stromkreises	55
2.2.5.	Untersuchen der Polarität einer Spannungsquelle	56
2.3.	Wirkungen des elektrischen Stromes .	56
2.3.1.	Erwärmen eines Drahtes durch elektrischen Strom .	56
2.3.2.	Glühen eines Drahtes durch elektrischen Strom	58
2.3.3.	Erwärmen einer Kochsalzlösung durch elektrischen Strom	58
2.3.4.	Vergleichen der Leuchtwirkung eines gestreckten und eines gewendelten Glühdrahtes	59
2.3.5.	Modellversuch zur Wirkungsweise einer Schmelzsicherung	60
2.3.6.	Modellversuch zum Unterbrechen eines Stromkreises durch Bimetallstreifen	61
2.3.7.	Elektrolyse angesäuerten Wassers .	62
2.3.8.	Verkupfern eines Gegenstandes	63
2.3.9.	Zusammenstellen galvanischer Elemente .	64
2.4.	Die elektrische Arbeit und Leistung	64
2.4.1.	Bestätigung der Gleichung für die elektrische Arbeit	64

2.4.2.	Ermitteln der elektrischen Arbeit durch Messen von Spannung, Stromstärke und Zeit	65
2.4.3.	Messen der elektrischen Arbeit mit einem Kilowattstundenzähler	66
2.4.4.	Bestätigung der Gleichung für die elektrische Leistung	67
2.4.5.	Ermitteln der elektrischen Leistung durch Messen von Spannung und Stromstärke	68
2.4.6.	Messen der elektrischen Leistung mit dem Leistungsmesser	69
2.4.7.	Bestimmen des Wirkungsgrades bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie	71
2.4.8.	Bestimmen des Wirkungsgrades eines Elektromotors	72
3.	Gesetze im elektrischen Stromkreis	74
3.0.	Methodische Bemerkungen	74
	Der elektrische Widerstand und das Ohmsche Gesetz	76
3.1.1.	Nachweis der Widerstandseigenschaft	76
3.1.2.	Vergleich von Widerständen	77
3.1.3.	Abhängigkeit des Widerstandes metallischer Leiter von der Temperatur	78
3.1.4.	Abhängigkeit des Widerstandes von Halbleitern von der Temperatur	81
3.1.5.	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Glas	82
3.1.6.	Spannung und Stromstärke an konstanten Widerständen — Das Ohmsche Gesetz	83
3.2.	Das Widerstandsgesetz	85
3.2.1.	Die Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters von seiner Länge	85
3.2.2.	Die Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters vom Querschnitt	86
3.2.3.	Die Abhängigkeit des Widerstandes vom Stoff	87
3.2.4.	Bestimmung des spezifischen Widerstandes	88
3.2.5.	Untersuchung des Widerstandes von Flüssigkeiten	89
3.3.	Widerstandsbestimmung	91
3.3.1.	Widerstandsbestimmung durch Spannungs- und Stromstärkemessung	91
3.3.2.	Wirkungsweise eines Widerstandsmessers	92
3.3.3.	Widerstandsbestimmung durch Vergleichswiderstände	93
3.3.4.	Vorversuch zur Wheatstoneschen Meßbrücke	94
3.3.5.	Widerstandsbestimmung mit der Wheatstoneschen Meßbrücke	95
3.3.6.	Widerstandsbestimmung durch Substitution	98
4.	Unverzweigte und verzweigte Stromkreise	100
4.0.	Methodische Bemerkungen	100
4.1.	Spannung, Stromstärke und Widerstand im unverzweigten Stromkreis	101
4.1.1.	Spannungsabfall längs eines homogenen Leiters	101
4.1.2.	Spannungsabfall bei Reihenschaltung von Widerständen	103
4.1.3.	Spannungsverteilung bei Reihenschaltung von Glühlampen	104
4.1.4.	Spannung bei Reihenschaltung von Spannungsquellen	105
4.1.5.	Einfluß eines Strommessers auf das Meßergebnis	106
4.1.6.	Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern	107

4.1.7.	Spannungsabfall in einer Spannungsquelle bei Belastung	108
4.1.8.	Spannungseinstellung durch Vorwiderstand — Wirkungsgrad	109
4.2.	Spannung, Stromstärke und Widerstand im verzweigten Stromkreis	110
4.2.1.	Stromverzweigung in parallelgeschalteten Widerständen	110
4.2.2.	Stromverzweigung in Glühlampen	111
4.2.3.	Modell des Stromkreises einer Wohnung	112
4.2.4.	Einfluß eines Spannungsmessers auf das Meßergebnis	114
4.2.5.	Meßbereichserweiterung von Strommessern	115
4.2.6.	Spannung und Stromstärke in der Spannungsteilerschaltung — Wirkungsgrad	116
5.	Das konstante elektrische Feld	120
5.0.	Methodische Bemerkungen	120
5.1.	Ladung — Spannung	120
5.1.1.	Nachweis der Ladung	122
5.1.2.	Laden und Entladen eines Konduktors	123
5.1.3.	Eichen ballistischer Meßgeräte	124
5.1.4.	Ladungstrennung	128
5.1.5.	Nachweis positiver und negativer Ladung mit einer Glimmlampe	130
5.1.6.	Übertragen einer Ladung an einem Faradaybecher	131
5.1.7.	Nachweis der Spannung	133
5.1.8.	Spannung zwischen zwei geladenen Körpern im selbständigen Feld	135
5.1.9.	Modellversuch zur Entstehung eines Gewitters	136
5.1.10.	Experimente mit einem Isolierschemel	137
5.2.	Kräfte im elektrischen Feld	138
5.2.1.	Kraftwirkungen zwischen geladenen Körpern	138
5.2.2.	Richtung der Kräfte im elektrischen Feld — Darstellung in einer Ebene	140
5.2.3.	Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien	142
5.2.4.	Richtung der Kräfte im elektrischen Feld — Räumliche Darstellung der Feldlinien	144
5.2.5.	Messen der Feldkräfte mit Hilfe von Fadenpendeln	146
5.2.6.	Messen der Feldkräfte mit einer Drehwaage	149
5.2.7.	Bestätigung des Coulombschen Gesetzes mit einer Drehwaage	151
5.2.8.	Unmittelbarer und stufenweiser Aufbau oder Abbau eines elektrischen Feldes	154
5.2.9.	Die Spitzenwirkung an einem elektrisch geladenen Körper	157
5.2.10.	Nachweis des elektrischen Erdfeldes mit einer Flammensonde	159
5.2.11.	Modellversuch zur elektrischen Gasentstaubung	160
5.2.12.	Modellversuch zur Bestimmung der Elementarladung nach dem Schwebeverfahren	161
5.2.13.	Projektionsfolie zur Veranschaulichung der Wirkungsweise eines Linearbeschleunigers	163
5.3.	Die Kapazität — Die Dielektrizitätskonstante	163
5.3.1.	Laden und Entladen eines Kondensators	163
5.3.2.	Laden eines Kondensators auf eine konstante Spannung	165
5.3.3.	Proportionalität zwischen Ladung und Spannung	166
5.3.4.	Bestimmung der Kapazität eines Kondensators mit einem ballistischen Galvanometer	168

5.3.5.	Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von seinen geometrischen Abmessungen	169
5.3.6.	Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators vom Dielektrikum	173
5.3.7.	Bestimmen der elektrischen Feldkonstanten	174
5.3.8.	Bestimmen der relativen Dielektrizitätskonstanten	176
5.3.9.	Ermittlung der Kapazität eines Kondensators	178
5.3.10.	Vergleich der Kapazitäten zweier Kondensatoren mit Hilfe einer Wechselstrom-Meßbrücke	179
5.3.11.	Parallelschaltung und Reihenschaltung von Kondensatoren	181
5.3.12.	Spannungsverlauf beim Laden eines Kondensators	184
5.4.	Die elektrische Influenz	186
5.4.1.	Influenz an einem Plattenpaar im Feld eines Plattenkondensators	186
5.4.2.	Influenz an Metallzylindern	187
5.4.3.	Nachweis der Influenz mit Hilfe einer Funkenstrecke	188
5.4.4.	Aufladen eines Elektroskops durch Influenz	189
Register		191

Einleitung

1. Im 6. Teil der „Physikalischen Schulversuche“ wird die Behandlung der Elektrizitätslehre begonnen, die im 9. Teil fortgesetzt wird. In diesem Buch sind Erläuterungen zu Unterrichtsmitteln und zur Experimentiertechnik in der Elektrizitätslehre und Versuchsbeschreibungen zu den Gebieten elektrischer Strom, elektrische Spannung, Arbeit, Energie und Leistung, zu den Gesetzen im elektrischen Stromkreis sowie zum elektrischen Feld enthalten. Ein großer Teil der Versuchsbeschreibungen kann zur Einführung in die Elektrizitätslehre genutzt werden. Der 9. Teil enthält alle Versuche zum magnetischen Feld, zur Induktion, zu den elektrischen Maschinen, zum Wechselstrom und zu den Leitungsvorgängen. Die Versuche zu den elektromagnetischen Schwingungen und Wellen sind im 10. Teil enthalten.
2. Die bewährten methodischen und experimentellen Gesichtspunkte, nach denen das Gesamtwerk von Anfang an angelegt ist, wurden beibehalten. Vielen Versuchen wurden „Methodische Hinweise“ vorangestellt, die dem Lehrer die unterrichtliche Einordnung der Versuche erleichtern.
Das Buch dient der Förderung der experimentellen Kenntnisse und Fähigkeiten; die physikalischen Kenntnisse werden bei seinen Lesern vorausgesetzt. In besonders gelagerten Fällen, in denen es aus methodischen Gründen geboten erscheint, wird kurz auf die physikalischen Zusammenhänge eingegangen.
Das Buch ist nicht für einen bestimmten Lehrplan oder Schultyp geschrieben. Es sind aber alle für die allgemeinbildende polytechnische Oberschule notwendigen Versuche aufgenommen. Dabei muß der Lehrer eine Auswahl aus den angebotenen Versuchen treffen, die seiner methodischen Konzeption entspricht. So ist weder die Reihenfolge der Abschnitte noch die der einzelnen Versuchsbeschreibungen von methodischen Gesichtspunkten, sondern von fachsystematischen bestimmt. Viele Versuche können in Arbeitsgemeinschaften oder im fakultativen Unterricht durchgeführt werden. Einen Teil von ihnen werden auch Lehrer in der Berufsausbildung und im polytechnischen Unterricht nutzen können.
3. Allgemeine Ausführungen über die Unterrichtsmittel zur Elektrizitätslehre sind im ersten Kapitel zu finden. In den methodischen Bemerkungen zu jedem Kapitel werden am Anfang spezielle Hinweise über die zu dem Stoffgebiet benötigten Geräte gegeben (1.0.0., 2.0.0., usw.). Die Versuchsbeschreibungen sind möglichst so angelegt, daß sie mit Demonstrationsgeräten verschiedener Ausführungen und mit Schülerexperimentiergeräten ausgeführt werden können. Einige Versuche sind an ein bestimmtes Gerät gebunden, z.B. an das Gerät zur Demonstration und Messung in elektrischen und magnetischen Feldern. Aber auch diese Versuchsbeschreibungen sind so allgemein gehalten, daß sie auf ähnliche Geräte

übertragen werden können. Daten und Betriebsvorschriften bestimmter Geräte müssen dabei den jeweiligen Bedienungsanleitungen entnommen werden.

Wie in allen Büchern dieser Reihe sind Selbstbauanleitungen für einzelne kleine Hilfsmittel oder Versuchsgерäte aufgenommen. Dadurch ist es möglich, die Versuche mit industriell gefertigten Unterrichtsmitteln durch Varianten zu ergänzen und eine Anregung für die Tätigkeit in Arbeitsgemeinschaften zu geben.

4. Die folgende Zusammenstellung zu Einzelheiten der Gestaltung des Buches soll dem Leser die Benutzung erleichtern.

- Das Buch ist in fünf Kapitel gegliedert, jedes Kapitel in Abschnitte, jeder Abschnitt in Versuchsbeschreibungen.
- Jedes Kapitel wird durch „Methodische Bemerkungen“ eingeleitet. Diese sind nicht allgemein unterrichtsmethodischer Art. Sie verallgemeinern methodische Gesichtspunkte der einzelnen Abschnitte, die nicht in den „Methodischen Hinweisen“ bei den Versuchsbeschreibungen erfaßt werden können.

Methodische Bemerkungen sind mit 1.0., 2.0. usw. numeriert. Durch die Ziffer 0 an der dritten Stelle sind die Unterrichtsmittelhinweise kenntlich gemacht (z.B. 3.0.0.). Die Ziffern 1, 2, 3 usw. an der dritten Stelle weisen auf die Abschnitte der Versuchsbeschreibungen hin, z.B. gehört 4.0.2. zum Abschnitt 4.2.

Am Ende der „Methodischen Bemerkungen“ stehen mitunter Selbstbauanleitungen, die für das ganze Kapitel oder ganze Abschnitte von Bedeutung sind.

- Jeder Abschnitt ist durch die Ziffer der Kapitelnummer und eine eigene Ziffer zweistellig gekennzeichnet, z.B. ist 5.3. der 3. Abschnitt des 5. Kapitels. Für die einzelnen Versuchsbeschreibungen tritt eine weitere Ziffer an die dritte Stelle, z.B. ist 5.3.7. der 7. Versuch im 3. Abschnitt des 5. Kapitels. Diese Ziffern werden auch bei den zugehörigen Abbildungen verwendet, wobei hinter einem Schrägstrich die laufende Nummer der Abbildung angehängt wird, z.B. ist 5.3.7./2 die 2. Abbildung zum Versuch 5.3.7.
- Teilversuche mit gleicher Zielsetzung unter Verwendung anderer Mittel sind als *Variante a*, *Variante b* usw. bezeichnet. Teilversuche einer Versuchsreihe und Teilversuche mit unterschiedlicher Zielsetzung sind als *Versuch 1*, *Versuch 2* usw. bezeichnet.
- Hinweise werden innerhalb dieses Buches durch folgende Abkürzungen gegeben: auf Methodische Bemerkungen durch z.B. MB 2.0.3., auf Methodische Hinweise durch z.B. MH 3.4.2., auf Versuchsbeschreibungen durch z.B. V 3.4.2., auf Bemerkungen durch z.B. Bem. Nr. 1 V 2.2.2. Die Abkürzung [SE] hinter der Versuchsüberschrift sagt aus, daß dieser Versuch auch als Schülerexperiment oder Praktikumsversuch geeignet ist.
- Die Marken neben den Versuchsüberschriften weisen auf besondere Gefahren hin und sollen zur Vorsicht mahnen.
- Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit einer Stückliste der verwendeten Geräte. Dabei sind solche Teile, die in jeder Physiksammlung in ausreichender Anzahl vorhanden sind oder die bei Verwendung anderer Geräte variiert werden müssen, nicht aufgeführt. Dazu gehören Teile des Stativmaterials, Verbindungsleiter, Schalter, Grundbretter der SEG und ähnliches.

- Wo erforderlich, sind die Nummern oder bei Selbstbauanleitungen die Buchstaben der Stückliste zur Verbesserung der Übersicht in die Abbildungen eingesetzt.
- Selbstbauteile sind durch ® kenntlich gemacht.
- Die Daten der Bauelemente (250 Wdg., 100 k Ω , 2 μ F usw.) sind nicht als verbindlich zu betrachten, sondern geben nur die Größenordnung an. Man kann z.B. an Stelle von Spulen mit 250 Wdg. ohne weiteres Spulen mit 300 Wdg. verwenden.
- Abmessungen in Zeichnungen sind in Millimetern angegeben.
- Die angegebenen Meßreihen sind bei der Versuchserprobung aufgenommen worden. Sie geben Richtwerte für die erzielbare Genauigkeit. Es ist unwahrscheinlich, daß bei einer Wiederholung der Versuche genau die gleichen Werte erreicht werden.
- Bemerkungen im Anschluß an die Versuchsbeschreibungen geben Hinweise zu Varianten und Erweiterungsmöglichkeiten der Versuche.

5. Abschließend sei ausdrücklich auf die Gefahren beim Umgang mit elektrischen Spannungen hingewiesen. Es ist auf die strengste Einhaltung der „Richtlinie für den Arbeits- und Brandschutz im naturwissenschaftlichen Unterricht und in der außerunterrichtlichen Arbeit auf dem Gebiet der Naturwissenschaften“ vom 25. Mai 1967 zu achten.

Schüler dürfen nur mit Schülerstromversorgungsgeräten und den zulässigen Kleinspannungen arbeiten. Bandgeneratoren und Influenzmaschinen bilden durch Schreckreaktionen Gefahren, obwohl sie trotz hoher Spannungen keine lebensgefährlichen Ströme liefern.

Alle Versuchsbeschreibungen sind so angelegt, daß auch die Demonstrationsexperimente möglichst mit Kleinspannungen auszuführen sind. Spannungen in der Größenordnung der Netzspannung und größer soll man nur verwenden, wenn es nicht anders geht, z.B. in Versuchen mit Glimmlampen und Katodenstrahlen.

1. Experimentiergeräte und Hilfsmittel zur Elektrizitätslehre

1.1. Spannungsquellen

1.1.1. Spannungsstufen

Man unterscheidet

<i>Kleinspannungen</i>	0 bis 42 V,
<i>Mittelspannungen</i>	42 V bis 250 V,
<i>Hochspannungen</i>	über 250 V.

In Schulversuchen dürfen Schüler grundsätzlich nur mit Kleinspannungen arbeiten. Die Lehrer sollten in Demonstrationsversuchen aus Sicherheitsgründen nur dann mit Spannungen über 42 V arbeiten, wenn dies unbedingt erforderlich ist. Die Versuchsbeschreibungen in den Physikalischen Schulversuchen sind diesen Grundsätzen entsprechend angelegt.

1.1.2. Akkumulatoren

Akkumulatoren sind Gleichspannungsquellen. Man verwendet sie bei physikalischen Versuchen insbesondere dann, wenn konstante Spannungen bei unterschiedlicher Belastung oder wenn große Stromstärken bei kleiner Spannung notwendig sind. Die maximale Entladungsstromstärke ist in den Betriebsanleitungen der einzelnen Akkumulatortypen angegeben. Man kann einen Akkumulator jedoch kurzzeitig sogar bis zur Kurzschlußstromstärke überlasten, ohne daß Schäden verursacht werden. Doch sollte man trotzdem einen kleinen Widerstand an den Akkumulator anschließen. Man kann sich einen solchen Widerstand behelfsmäßig aus den Kohlestäben einer Monozelle herstellen. Sein Wert liegt in der Größenordnung von 0,5 Ω .

Wichtige Akkumulatorenarten sind die *Bleiakkumulatoren* sowie die *Nickel-Stahl-* und die *Nickel-Cadmium-Akkumulatoren*. Über den Betrieb und die Wartung dieser Akkumulatoren soll hier das Wichtigste angegeben werden.

Bleiakkumulatoren. Das *Laden* der Bleiakkumulatoren erfolgt mit einer Gleichspannungsquelle. Man kann dazu besondere Ladegleichrichter oder auch ein Stromversorgungsgerät benutzen. Vor Beginn des Ladens überzeugt man sich von einer ausreichenden Füllung des Akkumulators mit verdünnter Schwefelsäure und *prüft die Säuredichte mittels eines Aräometers*. Die Säure soll etwa 1 cm hoch über den Platten stehen und im entladenen Zustand eine Dichte von 1,16 g/cm³ bis 1,18 g/cm³ haben. Meist muß etwas destilliertes Wasser nachgefüllt werden.

Während des Ladens müssen die Zellenverschlüsse wegen der Gasentwicklung geöffnet sein.

Der *Pluspol* des *Akkumulators* wird an den *Pluspol* der *Spannungsquelle* angeschlossen. Entsprechend werden die beiden *Minuspole* miteinander verbunden.

Die zum Laden benutzte Spannungsquelle soll nach Möglichkeit mit einer Stellmöglichkeit für die Spannung ausgestattet sein. Ist dies nicht der Fall, so muß man einen besonderen Spannungsteiler parallel zu ihr schalten. Außerdem muß im Ladestromkreis ein Strommesser liegen. Die Ladestromstärke darf den in der Betriebsanleitung des Akkumulators angegebenen Wert nicht überschreiten.

Gleich zu Beginn des Ladevorgangs steigt die Spannung des Akkumulators auf etwa 2,1 V an, so daß eine Vergrößerung der Ladespannung erfolgen kann. Während des mehrstündigen Ladevorgangs steigt die Spannung des Akkumulators nur langsam auf etwa 2,2 V je Zelle an. Eine Kontrolle der Ladestromstärke ist während dieser Zeit nicht nötig. Gegen Ende des Ladevorgangs steigt die Spannung schnell auf etwa 2,7 V je Zelle. Dadurch sinkt die Ladestromstärke ab. Es setzt jetzt eine starke Gasentwicklung ein. Damit ist das Laden beendet.

Achtung! Wegen der Knallgasentwicklung sind Rauchen und offenes Feuer in Räumen, in denen Akkumulatoren geladen werden, verboten.

Nach dem Laden wird die Dichte der Säure gemessen. Sie soll je nach Akkumulatortyp 1,20 g/cm³ bis 1,24 g/cm³ betragen.

Beim Entladen sinkt die Spannung rasch auf etwa 1,95 V je Zelle und nimmt dann langsam weiter ab. Beträgt sie nur noch 1,8 V, so soll keine weitere Stromentnahme erfolgen, damit Plattenschäden vermieden werden.

Bei der *Pflege* sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Durch Überlastung und auch bei längerem Betrieb lösen sich aus den Platten kleine Bleiteilchen, die sich am Boden als Schlamm absetzen. Dadurch kommt es zu einer Selbstentladung. Dieser Schlamm muß bei Erneuern der Elektrolytlösung beseitigt werden. Vor dem Neufüllen wird der Akku mit destilliertem Wasser ausgespült.
- Als Elektrolytlösung darf nur eine Mischung von destilliertem Wasser und reiner Schwefelsäure, die speziell als Akkumulatorensäure geliefert wird, verwendet werden. Unreine Säure und Leitungswasser würden zu Salzbildung auf den Platten führen.
- Steht ein Akkumulator längere Zeit unbenutzt, so bildet sich auf den Platten kristallines Bleisulfat. Dies tritt besonders bei ungeladenen Akkumulatoren ein. Jeder unbenutzte Akkumulator ist deshalb etwa alle vier Wochen aufzuladen, nachdem er vorher entladen worden ist. Dieses Aufladen soll nicht zu frühzeitig abgebrochen werden, sondern immer bis zum „Kochen“ andauern.
- Die Anschlußklemmen sollen zum Schutz gegen das Anfressen durch Säure leicht eingefettet werden. Vor dem Anschließen von Kabeln sind die Verbindungsstellen zu entfetten.

Alkalische Akkumulatoren. Bei den *Nickel-Stahl-Sammlern* und *Nickel-Cadmium-Sammlern* bestehen die Elektroden aus vernickelten Stahlrahmen, in die zur Aufnahme der aktiven Substanz Röhren aus durchlöcherter Stahlblech eingesetzt sind. Die aktive Substanz besteht bei den positiven Platten aus Nickelsalzen, bei den negativen Platten aus Eisen- oder Cadmiumsalzen. Als Elektrolytlösung wird in beiden Sammlern eine 20%ige Kalilauge verwendet.

Infolge ihrer Bauart sind diese Akkumulatoren widerstandsfähiger als Bleiakkumulatoren, sowohl gegen mechanische als auch gegen elektrische Beanspruchung.

Die höchste Ladespannung liegt bei etwa 1,8 V, die mittlere Entladespannung bei 1,2 V je Zelle. Das Entladen soll bei einer Zellenspannung von 1 V abgebrochen werden.

Für die *Wartung und Pflege* dieser Akkumulatoren gelten sinngemäß ähnliche Vorschriften wie für Bleiakkumulatoren. Im einzelnen sind die Betriebswerte den beigegebenen Anleitungen zu entnehmen.

Insbesondere ist die Zusammensetzung der Elektrolytlösung genau zu beachten. Die Dichte der Lösung ändert sich zwischen dem Laden und dem Entladen nur unwesentlich; sie kann demnach nicht als sicheres Maß für den Ladungszustand benutzt werden. Im übrigen ist bei den alkalischen Sammlern nicht dieselbe sorgsame Pflege wie bei Bleisammlern erforderlich. Sie können insbesondere längere Zeit ungeladen stehenbleiben, ohne Schaden zu nehmen.

1.1.3. Galvanische Elemente

Galvanische Elemente mit flüssiger Füllung werden heute kaum noch als Spannungsquellen im Unterricht verwendet. Sie werden im allgemeinen nur als *Unterrichtsgegenstand* behandelt, damit die Schüler die Wirkungsweise der Trockenelemente kennenlernen.

Die Verwendung von Monozellen und Flachbatterien als Spannungsquellen ist bei einigen Versuchen einem Stromversorgungsgerät vorzuziehen, wenn man nämlich kleine Stromstärken bei konstanten Spannungen haben will. Auch im *Werkunterricht* ist es methodisch günstig, die Schüler mit Flachbatterien arbeiten zu lassen, weil dann eine sichtbare Spannungsquelle in den Stromkreisen liegt. In *Arbeitsgemeinschaften* sind Transistorschaltungen gut mit Flachbatterien zu betreiben, denn einfache Stromversorgungsgeräte haben eine verhältnismäßig große Restwelligkeit der Gleichspannung.

1.1.4. Stromversorgungsgeräte

Im Physikunterricht haben sich für die Durchführung der meisten Versuche Stromversorgungsgeräte bewährt. Sie enthalten einen oder mehrere Transformatoren, mit denen die Netzspannung auf die für die Versuche notwendigen Spannungen herab- oder heraufgesetzt wird. Ihr Anschluß ans Netz erfolgt entsprechend den Sicherheitsvorschriften mit Schutzkontakt. Sie sind so konstruiert, daß die Ausgangsspannungen galvanisch vom Netz getrennt sind. In älteren Typen von Stromversorgungsgeräten erfolgt keine Glättung der Gleichspannung im Bereich der Kleinspannung bis 20 V, während in neueren Typen eine einfache Glättungsschaltung durch einen Kondensator (1000 μ F) eingebaut ist.

Ein Spannungsabfall bei Belastung läßt sich bei der möglichst einfachen Konstruktion der Stromversorgungsgeräte nicht vermeiden. Die Geräte sind so gebaut, daß er in möglichst geringen Grenzen gehalten wird. Wenn man Versuche, die konstante Spannungen erfordern, nicht mit der Höchstspannung des Stromversorgungsgerätes beginnt, dann kann man bei einem Spannungsabfall die Spannung nachstellen. Die verschiedenen Spannungen können den Geräten entweder durch Einstellen an einem Stufenschalter oder durch Differenzsteckweise zwischen den Anzapfungen

der Sekundärwicklung des Transformators entnommen werden. Eine Feineinstellung ist bei einigen Geräten durch eingebaute Spannungsteiler möglich. Bei den meisten muß aber eine Spannungsteilerschaltung zwischen Gerät und Versuchsanordnung zusätzlich aufgebaut werden. Für Versuche mit Transistoren in Arbeitsgemeinschaften werden bereits Geräte hergestellt, die eine stufenlose Einstellbarkeit durch Einstelltransformatoren oder elektronische Einstellung mit elektronischer Stabilisierung ermöglichen.

Bei der Versuchsdurchführung bieten die Stromversorgungsgeräte technische und methodische Vorteile gegenüber Schalttafeln und der zentralen Stromversorgung der Schülerplätze. Wenn im Stromversorgungsgerät die Spannung auch nicht erzeugt, sondern nur umgeformt wird, so ist es für die Schüler doch die erkennbare Spannungsquelle, die auf dem Experimentiertisch immer so aufgebaut werden kann, daß eine gute Übersicht über den Versuchsaufbau gewährleistet ist. Darum ist es in einigen Fällen zweckmäßig, für verschiedene Stromkreise eines Versuches getrennte Stromversorgungsgeräte einzusetzen, obwohl es technisch evtl. möglich wäre, alle Stromkreise aus einem Gerät zu speisen.

Schülerstromversorgungsgeräte (Abb. 1.1.4./1). Sie bestehen aus einem Grundgerät und einem durch Steckleiste anzusetzenden Zusatzgerät. Dem Grundgerät können in Differenzsteckweise Gleich- und Wechselspannungen von 1 V bis 10 V mit einer Stromstärke bis zu 2 A entnommen werden. Die Gleichspannung ist geglättet. Im Leerlauf liegen alle Spannungen etwas über dem Nennwert. Es ist eine elektrophysikalische Überstromsicherung eingebaut, die nach Fortfall der Überlastung das Gerät wieder selbsttätig einschaltet. Die Betriebsbereitschaft des Gerätes zeigt eine rote Lampe an. Das Zusatzgerät soll nur angeschlossen werden, wenn die Experimente es erfordern. Es liefert für Versuche mit Transistoren oder als Gitterspannung für Röhren eine Gleichspannung von 0 bis 10 V, die durch einen Drehwiderstand stufenlos einstellbar und durch eine Siebkette geglättet ist. Dieser Anschluß ist bis 1 mA belastbar und kurzschlußfest ausgeführt. Genauso konstruiert ist ein zweiter Anschluß für Gleichspannung von 0 bis 42 V mit einer zulässigen Stromstärke von 20 mA. Vor dem Gleichrichter dieser Schaltung kann die einstellbare Wechselspannung von 0 bis 42 V entnommen werden, die mit Stromstärken bis 100 mA belastbar ist. Diese Spannung ist für Versuche mit Verstärker- und Gleichrichterröhre vorgesehen. Dazu dient auch die Heizspannung mit einer Wechselspannung von 6,3 V. Alle Ausgänge des Gerätes haben zwei Buchsenpaare, so daß ein Spannungsmesser direkt an das Gerät angeschlossen werden kann.

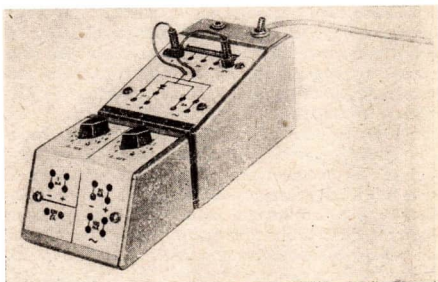


Abb. 1.1.4./1
Schülerstromversorgungsgerät,
Grundgerät mit Zusatzgerät

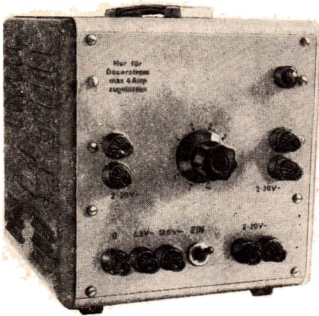


Abb. 1.1.4./2
Stromversorgungsgerät für Niederspannung

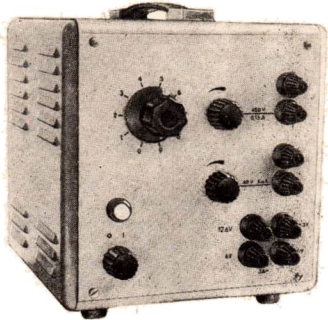


Abb. 1.1.4./3
Stromversorgungsgerät für Mittelspannung

Stromversorgungsgeräte für Niederspannungen (Abb. 1.1.4./2). Diese Geräte liefern in 10 Stufen Gleich- und Wechselspannungen von 0 bis 20 V mit einer maximalen Dauerstromstärke von 4 A. Die Gleichspannung ist geglättet. Kurzzeitig können sie etwas überlastet werden. Die Geräte haben jedoch sekundärseitig keine Sicherung. Darum muß man darauf achten, daß die zulässige Stromstärke der Netzsicherung nicht überschritten wird. Bei zu starker Sicherung werden besonders die Gleichrichter durch zu große Stromstärken gefährdet. Dem Gerät können zusätzlich fest eingestellte Wechselspannungen von 6,3 V und 12,6 V mit Stromstärken bis zu 5 A entnommen werden.

Stromversorgungsgeräte für Mittelspannungen (Abb. 1.1.4./3). Diese Geräte dienen hauptsächlich für den Betrieb von Elektronenröhren. Es können entnommen werden:

- Anodengleichspannung 0...400 V; 0,15 A; in Stufen und innerhalb der Stufen feineinstellbar,
- Gitterspannung 0...50 V; leistungslos über großem Widerstand,
- Heizspannungen 4 V und 6,3 V; 3 A; fest eingestellt.

Stromversorgungsgeräte für Hochspannungen (Abb. 1.1.4./4). Durch Hochspannungstransformatoren und Hochspannungsgleichrichterröhren stellen sie konstante Spannungen zu Messungen in elektrischen Feldern bereit. Vor dem Ausgang liegen große Widerstände, so daß die Stromstärken begrenzt und die Geräte kurz-

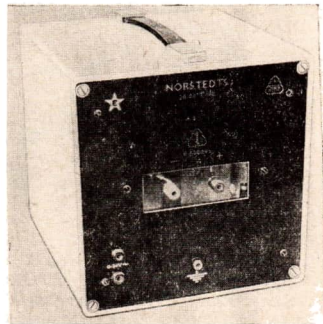


Abb. 1.1.4./4
Stromversorgungsgerät für Hochspannung

schlußfest sind. Die Einstellung der Spannung erfolgt primärseitig. Für diese Einstellungen sind entweder die Beträge der sekundären Hochspannung im Leerlauf angegeben, oder sie müssen mit Röhrenvoltmeter und Hochspannungsmeßspitze gemessen werden.

1.1.5. Netzspannung

Für die Arbeit mit der Netzspannung und höheren Spannungen in Demonstrationsversuchen auf dem Experimentiertisch müssen von dem fachkundigen Experimentator, dem Lehrer, größte Vorsicht und ein Maximum an Sorgfalt gefordert werden. Zur weitgehenden Unterstützung ist für die Arbeit mit der Netzspannung ein Netzanschlußgerät (Netzadapter) entwickelt worden, das zwischen Steckdose und Versuchsaufbau zu schalten ist (Abb. 1.1.5./1). Auf ihm befinden sich ein

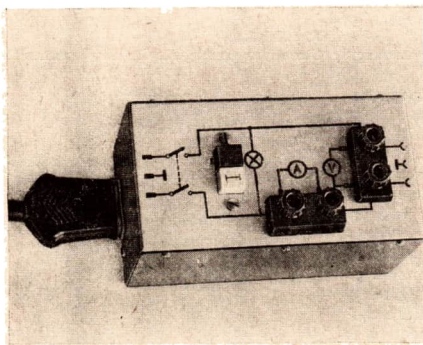


Abb. 1.1.5./1
Netzadapter

zweipoliger Ein-Aus-Schalter, eine Glühlampe, die den Einschaltzustand anzeigt, eine Schutzkontaktsteckdose zum Anschluß der Versuchsgeräte und isolierte Buchsen zum Anschluß von Strom- und Spannungsmesser. Wenn die Stromstärke nicht gemessen werden soll, sind die beiden entsprechenden Buchsen durch einen Verbindungsleiter zu überbrücken.

1.1.6. Schalttafeln

Viele Schulen haben im Physikraum festeingebaute Schalttafeln. Bei diesen ist entweder eine stufenweise oder eine stufenlose Einstellung verschiedener Gleich- und Wechselspannungen möglich.

Bei der Verwendung von Schalttafeln ergeben sich einige methodische Probleme.

- In den Versuchsanordnungen fehlt die deutlich erkennbare Spannungsquelle. Man kann sie behelfsmäßig ersetzen, indem man z.B. zwei Fußklemmen mit Polaritätsschildern aufstellt.

- Das Abwenden des Lehres vom Versuch zum Einstellen an der abseits liegenden Schalttafel lenkt die Aufmerksamkeit der Schüler vom Versuchsaufbau ab.
- Die Meßgeräte auf der Schalttafel haben eine geringe Güteklasse und zeigen andere Werte, als sie im Versuch vorliegen.

Ein Teil dieser Mängel wird vermieden, wenn eine der Schalttafel entsprechende Schaltung in einem Schaltpult untergebracht ist, das fahrbar sein kann. Die Schüler sollen hierbei den Bedienungsteil mit kleinen Kontrollmeßgeräten nicht einsehen können. Nur die Anschlußbuchsen mit der Spannungsbezeichnung sollen an der Oberkante des Pultes für die Schüler sichtbar sein.

Für *Schülerexperimente* benötigt man eine umfangreiche *Verteilertafel*, mit der man den einzelnen Schülerplätzen die für die Versuche notwendigen Spannungen zuschalten kann, die bei Praktikumsversuchen für die einzelnen Plätze unterschiedlich sein können. Dadurch wird schaltungs- und installationstechnisch ein großer Aufwand nötig. Hinzu kommt noch, daß die Transformatoren und Gleichrichter sehr groß sein müssen, damit durch Belastungsänderungen an einigen Schülerplätzen die Spannungen an den anderen Plätzen nicht beeinflusst werden.

Eine *zentral einstellbare Niederspannungsversorgung* ist zweckmäßig zum Betrieb von Optikleuchten und bei solchen Versuchen, bei denen nicht gemessen wird, wie etwa im Werkunterricht. Für den Physikunterricht haben sich jedoch die Stromversorgungsgeräte für Demonstrations- und Schülerexperimente besser bewährt als Schalt- und Verteilertafeln.

1.1.7. Hochspannungsquellen

Bandgeneratoren. Die Bandgeneratoren (Abb. 1.1.7./1) für den Physikunterricht werden mit einer Handkurbel in Betrieb gesetzt. Sie arbeiten nach dem Prinzip des Van-de-Graaff'schen Generators und können Spannungen bis zu 125 kV zwischen der Generatorkugel und der Gegenkugel liefern. Voraussetzung für ein gutes Funktionieren ist jedoch, daß die Teile des Gerätes feuchtigkeits- und staubfrei sind. Beides ist im Schulbetrieb wegen des Kreidestaubs und der erhöhten Luftfeuchtigkeit bei Anwesenheit der Schüler nicht zu erreichen. Die funktionswichtigen Teile des Geräts müssen mit möglichst wasserfreiem Alkohol vom Staub befreit werden, insbesondere das Band. Danach muß das

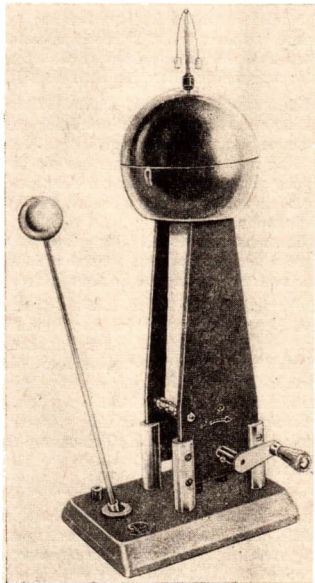


Abb. 1.1.7./1 Bandgenerator

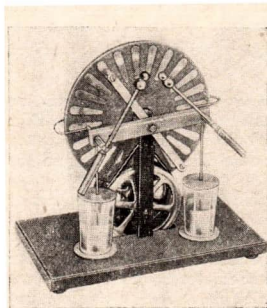


Abb. 1.1.7./2 Influenzmaschine

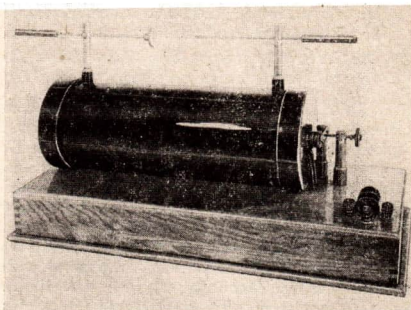


Abb. 1.1.7./3 Funkeninduktor

Gerät in einem staubfreien Raum mit einer Heißluftdusche getrocknet werden. Vor den Versuchen ist es außerdem zweckmäßig, den Bandgenerator mit einem Infrarotstrahler leicht zu erwärmen. Mißerfolge wird man besonders dann erleben, wenn man den Bandgenerator aus einem kalten Vorbereitungsraum holt und ihn sofort vor den Schülern im wärmeren Unterrichtsraum in Betrieb nimmt.

Influenzmaschinen (Abb. 1.1.7./2), deren Wirkungsprinzip den Schülern nicht erklärt zu werden braucht, sind für den Unterricht über das elektrische Feld als Spannungsquelle sehr gut geeignet. Sie sind gegen Staub und Feuchtigkeit weniger anfällig und leistungsfähiger als die kleinen Schulbandgeneratoren. Für die Reinigung gilt das gleiche wie bei Bandgeneratoren. Es ist darauf zu achten, daß man die höchsten Spannungen erhält, wenn die Bügel mit den Metallbürsten senkrecht zueinander stehen.

Influenzmaschinen mit Hartgummischeiben sind vor Licht geschützt in einem Karton aufzubewahren, weil sich durch Lichteinwirkung auf dem Hartgummi eine schlecht isolierende Schicht bildet.

Funkeninduktoren (Abb. 1.1.7./3) werden mit Gleichspannungen bis 20 V betrieben. Der Gleichstrom wird durch einen Wagnerschen Hammer zerhackt und auf eine Hochspannung mit einer Funkenschlagweite bis zu 120 mm herauftransformiert. Durch einen Umschalter kann die Polarität der Sekundärspannungsspitzen vertauscht werden. Die Spannung kann durch Verstellen der Frequenz des Wagnerschen Hammers beeinflusst werden. Funkeninduktoren kann man zur Untersuchung von Funkenüberschlägen in der Luft und zum Betrieb von Geißler-Röhren, Entladungsröhren und Kaltkathodenröhren einsetzen.

Achtung!

Es sind die Strahlungsschutzbestimmungen für Kaltkathodenröhren zu beachten.

Da die Funkeninduktoren bei ihren hohen Betriebsspannungen auch verhältnismäßig große Stromstärken liefern, muß man eine Berührung und auch schon ein Zeigen mit dem Finger auf den Versuchsaufbau unbedingt vermeiden.

Tesla-Transformatoren. Auf Grund der hochfrequenten Schwingungen in den Funkenüberschlägen eines Wagnerschen Hammers liefert ein Tesla-Transformator

sehr große, aber hochfrequente Hochspannungen (Abb. 1.1.7./4). Durch den Skin-Effekt ist die Berührung des Hochspannungsteils vielleicht unangenehm, aber nicht gefährlich.

Der Tesla-Transformator wird durch Gleichspannungen bis 20 V gespeist. Die Sekundärspannung kann vergrößert werden, indem man durch einen verstellbaren Kontakt einen Teil der Primärwindungen ausschaltet. Der Tesla-Transformator ist besonders zum Betrieb der Spektral-Gasentladungsröhren geeignet.

Funkeninduktoren und Tesla-Transformatoren sind starke Funkstörquellen. Sie dürfen nur kurzzeitig in Betrieb gesetzt werden (vgl. Physikalische Schulversuche, 10. Teil).

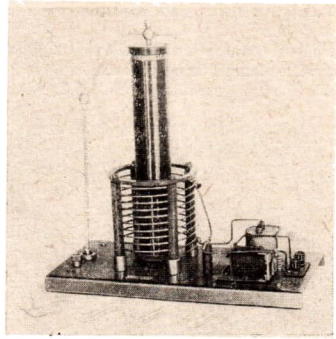


Abb. 1.1.7./4 Tesla-Transformator

1.2. Einstell- und Meßwiderstände, Kondensatoren

1.2.1. Widerstandsmaterial und Festwiderstände

Die wichtigsten Stoffe, aus denen technische Widerstände hergestellt werden, sind *Konstantan*, *Chromnickel* und *Manganin*. Für genaueste Messungen mit kleinen Spannungen müssen Meßwiderstände so gebaut sein, daß an den Verbindungsstellen des Widerstandsdrahtes mit anderen Metallen nur sehr kleine Thermospannungen auftreten. Dazu ist Manganin gut geeignet. Festwiderstände für kleinere Leistungen (0,1 W ... 1 W) sind meist als *Kohleschichtwiderstände* mit einer Graphitschicht auf einem Porzellankörper gefertigt. Sie sind in verschiedene Güteklassen eingeteilt. Widerstände größerer Bauform sind beschriftet. In kleinerer Bauform sind ihre Werte durch farbige Ringe oder Punkte angegeben.

Festwiderstände mit größerer Leistung sind als *Drahtwiderstände* hergestellt, bei denen Widerstandsdraht auf einen Porzellankörper gewickelt ist.

*Farbcode
der
Widerstände*

Farbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
Silber	—	—	10^{-2}	$\pm 10\%$
Gold	—	—	10^{-1}	$\pm 5\%$
Schwarz	—	0	10^0	
Braun	1	1	10^1	$\pm 1\%$
Rot	2	2	10^2	$\pm 2\%$
Orange	3	3	10^3	
Gelb	4	4	10^4	
Grün	5	5	10^5	
Blau	6	6	10^6	
Violett	7	7	10^7	
Grau	8	8	10^8	
Weiß	9	9	10^9	

1.2.2. Einstellwiderstände

Gleitwiderstände sind Drahtwiderstände auf einem Porzellankörper. Sie sind mit zwei Endanschlüssen und einem Anschluß zum Gleitkontakt versehen und durch ein Gehäuse geschützt (Abb. 1.2.2./1).

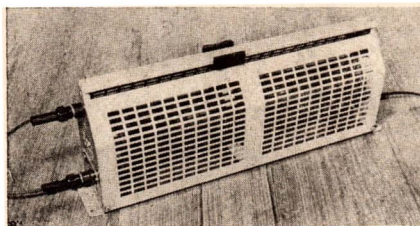


Abb. 1.2.2./1 Gleitwiderstand

Für den Physikunterricht ist ein Satz mit folgenden Werten zu empfehlen:

14,4 Ω ;	5 A
22,7 Ω ;	4 A
140 Ω ;	1,6 A
305 Ω ;	1,0 A
1390 Ω ;	0,4 A
3480 Ω ;	0,3 A

Drehwiderstände für größere Leistungen sind auch als Drahtwiderstände, für kleinere Leistungen als Kohleschichtwiderstände ausgeführt. Sie haben wie die Gleitwiderstände drei Anschlüsse. Zweckmäßig für den Physikunterricht sind:

25 Ω ;	2 A
50 Ω ;	25 W
100 Ω ;	3,5 W
1 k Ω ;	3,5 W

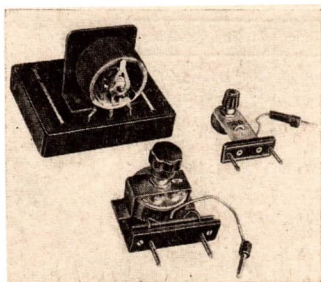
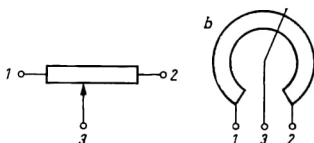


Abb. 1.2.2./2 Drehwiderstände

Abb. 1.2.2./3
Anschlüsse an Einstellwiderständen



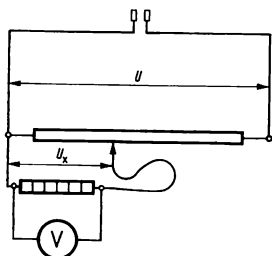


Abb. 1.2.2./4
Einfache Spannungsteilerschaltung

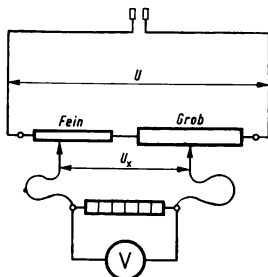


Abb. 1.2.2./5 Spannungsteiler mit Grob- und Feineinstellung

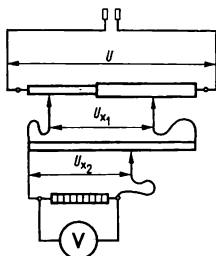


Abb. 1.2.2./6 Spannungsteiler mit Feineinstellung für sehr kleine Spannungen

Außerdem werden Kohleschichtwiderstände verschiedener Widerstandswerte und Leistungen benötigt, wie sie in der Funktechnik üblich sind (Abb. 1.2.2./2). Man kann die Einstellwiderstände als Vorwiderstände oder als Spannungsteiler schalten. In Abb. 1.2.2./3 sind die Anschlußklemmen numeriert. Der Widerstand wirkt beim Anschluß an die Klemmen 1 und 2 als *fester Widerstand*, beim Anschluß an die Klemmen 1 und 3 bzw. 2 und 3 als *veränderlicher Widerstand*.

Legt man an 1 und 2 die Spannungen an und greift sie bei 1 und 3 ab, so liegt eine *Spannungsteilerschaltung* vor. Es ist darauf zu achten, daß beim Gebrauch der außerhalb der Verzweigung liegende Teil des Widerstandes nicht überlastet wird. In den Versuchsbeschreibungen V 4.1.8. und 4.2.6. ist Näheres über Vorschalt- und Spannungsteilerwiderstände ausgeführt. Die Abbildungen 1.2.2./4 bis 6 zeigen Spannungsteilerschaltungen.

1.2.3. Meßwiderstände

Meßwiderstände werden als Einzelwiderstände oder als Widerstandssätze, Rheostaten, geliefert. Diese Widerstände dürfen nur einer höchstens 0,5 W betragenden Dauerleistung ausgesetzt werden. Bei Widerstandssätzen sind die Widerstände meist in Reihe geschaltet und durch Stöpsel kurz geschlossen. Die einzelnen Widerstände werden durch Ziehen der Stöpsel eingeschaltet.

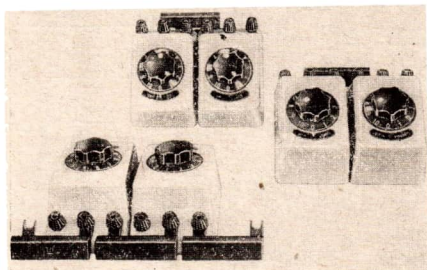


Abb. 1.2.3./1
Dekadenwiderstände

In der Schule haben sich *Dekadenwiderstände* gut bewährt (Abb. 1.2.3./1). Durch einen Drehschalter können die 10 Stufen einer Dekade in Reihe in den Stromkreis geschaltet werden. Zwei oder mehr Dekaden können mit speziellen Verbindungsleisten in Reihe geschaltet werden. So können beliebige Widerstände mit großer Genauigkeit zusammengestellt werden.

Es ist zu beachten, daß die zulässige Höchststromstärke nicht überschritten wird. Es gibt folgende Dekadenwiderstände:

10 ×	0,1 Ω;	2000 mA
10 ×	1,0 Ω;	750 mA
10 ×	10,0 Ω;	250 mA
10 ×	100,0 Ω;	75 mA
10 ×	1000,0 Ω;	25 mA
10 ×	10000,0 Ω;	7,5 mA

Obwohl die Vor- und Nebenwiderstände zu Meßgeräten ebenfalls mit größter Genauigkeit hergestellt sind, sollte man diese nicht zweckentfremdet als Meßwiderstände benutzen. Sie würden schon durch geringe Überlastung für die Meßgeräte unbrauchbar werden.

1.2.4. Kondensatoren

Für den Physikunterricht benötigt man außer verschiedenartigen technischen Kondensatoren auch *Kondensatorplatten*, die isoliert durch Fußklemmen an Stativmaterial zu befestigen sind. Die Platten müssen möglichst eben sein und parallel zueinander stehen. Sie dürfen nicht zu klein sein, damit sie hinreichend große Ladungen aufnehmen können und das elektrische Feld in ihrer Mitte möglichst homogen ist. Um Spitzenentladungen an den Ecken zu vermeiden, ist die Kreisform der quadratischen vorzuziehen. Damit sich die Platten bei naher Stellung zueinander nicht berühren, ist es zweckmäßig, auf die eine Platte an den Rand 3 oder 4 Gummiplättchen zu kleben. Für eine Reihe von Versuchen werden Kondensatoren mit Kapazitäten von 1 µF bis etwa 20 µF benötigt. Dazu werden Metall-Papier-Kondensatoren eingesetzt. Für Versuche mit veränderlicher Kapazität sind Kondensatorbatterien zweckmäßig, an denen man durch Zu- und Abschalten von einzelnen Konden-

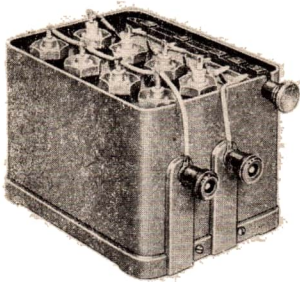


Abb. 1.2.4./1 Kondensatorbatterie

satoren verschiedene Kapazitäten einstellen kann (Abb. 1.2.4./1). Kapazitäten bis zu mehreren Tausend Mikrofarad besitzen Elektrolytkondensatoren. Es ist bei ihnen jedoch auf die meist kleinere zulässige Höchstspannung zu achten und auch darauf, daß sie nur in richtiger Polung an Gleichspannung angeschlossen werden dürfen. Behelfsmäßig kann man einen Elektrolytkondensator kurzzeitig an eine Wechselspannung anschließen, die wesentlich kleiner als die zulässige Spannung ist. Besser ist es aber, in diesem Falle zwei Elektrolytkondensatoren mit ihrer Polung gegeneinander in Reihe zu schalten. Dabei erhält man mit zwei gleichen Kondensatoren die halbe Kapazität eines einzelnen Kondensators.

Kleinere technische Kondensatoren der verschiedensten Bauformen werden im Physikunterricht bei Röhren- und Transistorschaltungen und in Arbeitsgemeinschaften gebraucht. Für ihre Bezeichnung gelten folgende Festlegungen: Die Farben der Kleinkondensatoren bezeichnen das Material. Die Zahlen auf dem Kondensator geben die Kapazität in Picofarad an; nur wenn ein n hinter ihnen steht, bezieht sich der Zahlenwert auf die Einheit Nanofarad. Andere Buchstaben hinter den Zahlen oder hinter dem n geben die Toleranzen und die Höchstspannungen an.

1.3. Meßgeräte

1.3.1. Demonstrations-Strom- und Spannungsmesser

Die Demonstrationsmeßgeräte sind, abgesehen von den auf ein Gestell montierten Schalttafelgeräten, Vielfachmeßgeräte. Ein älterer Typ ist das *Demonstrations-Drehisenmeßgerät* (Abb. 1.3.1./1) mit Wechselpulen für verschiedene Stromstärke- und Spannungsmessbereiche. Es ist für Messungen von Gleich- und Wechselstrom geeignet. Sein Innenwiderstand als Spannungsmesser ist verhältnismäßig klein, so daß man mit Meßfehlern durch den Gerätestrom rechnen muß. Ein weiterer älterer Typ ist das *Demonstrations-Drehspulmeßgerät* (Abb. 1.3.1./2). Da es keine eingebauten Gleichrichter hat, kann es nur für Messungen von Gleichstrom eingesetzt werden. Die Meßbereiche für Spannungen und Stromstärken werden durch Anklebmen

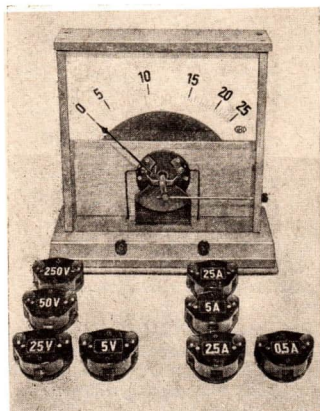


Abb. 1.3.1./1
Demonstrations-Dreheisenmeßgerät

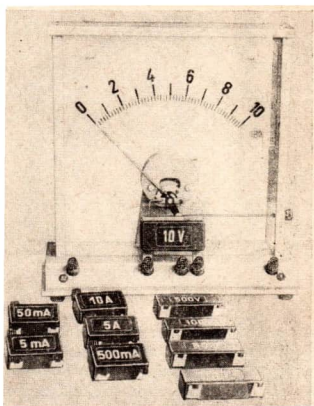
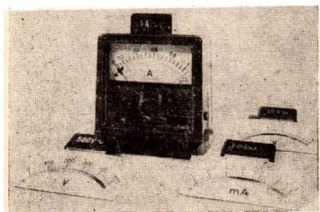


Abb. 1.3.1./2
Demonstrations-Drehspulmeßgerät

von Vor- bzw. Nebenwiderständen geschaltet. Seine Widerstandskonstante ist $500 \Omega/V$, so daß es kleinere Meßfehler als das Dreheisenmeßgerät verursacht. Der Zeiger kann in Nullpunktmittellage gestellt werden.

Moderne *Demonstrations-Vielfachmeßgeräte* (Abb. 1.3.1./3) sind Drehspulgeräte mit eingebautem Meßgleichrichter. Zum Gerät gehören Wechselskalen, mit denen die notwendigen Vor- und Nebenwiderstände für Stromstärke- und Spannungsmessungen in verschiedenen Meßbereichen bei Gleich- und Wechselstrom an das Gerät geschaltet werden. Das Gerät kann durch einen Feinmeßaufsatz ergänzt werden, in dem sich ein Transistormeißverstärker befindet. Dadurch kann man den aufwendigen Einsatz eines Spiegelgalvanometers vermeiden. Bei kurzzeitigen Vorgängen, wie Kondensatoraufladungen und -entladungen, reicht die Schwingungsdauer aller Demonstrationsmeßgeräte aus, um sie als ballistische Meßgeräte zum Vergleich von Strom- und Spannungstößen einzusetzen.



In der weiteren Entwicklung ist zu erwarten, daß auch in der Schule Meßgeräte mit digitaler Ziffernanzeige eingesetzt werden. Zeigermeßgeräte werden im Physikunterricht aber immer dort weiter notwendig sein, wo die Geschwindigkeit der Änderung einer Spannung oder einer Stromstärke von den Schülern erfaßt werden soll.

Abb. 1.3.1./3
Demonstrations-Vielfachmeßgerät

1.3.2. Spiegelgalvanometer

Obleich das Spiegelgalvanometer weitgehend durch Geräte mit Meßverstärker ersetzt werden kann, soll hier noch eine Beschreibung gegeben werden. *Spiegelgalvanometer* sind hochempfindliche Drehspulgeräte, bei denen die Drehspule an einem dünnen Metallband zwischen den Magnetpolen drehbar aufgehängt ist. Als Zeiger dient ein Lichtbündel, das von einem mit der Drehspule fest verbundenen Spiegel reflektiert wird. Ein beleuchteter Spalt oder der Glühfaden einer Einfadlampe wird mittels einer Linse auf eine Skale abgebildet, so daß die Ausschläge von allen Schülern gleichzeitig beobachtet werden können.

Für den Gebrauch eines Spiegelgalvanometers sind maßgebend die *Einstellzeit* des schwingenden Spiegels, die *Konstanz der Einstellung* und die *Empfindlichkeit*. Die Einstellzeit soll möglichst 7 s nicht überschreiten. Für eine hohe Stromempfindlichkeit darf der innere Widerstand nicht zu klein sein. Die meisten Galvanometer haben einen Innenwiderstand von 50 Ω . Die Einstelldauer hängt von dem äußeren Widerstand ab. Ist dieser zu groß, so schwingt das Galvanometer lange Zeit wenig gedämpft. Umgekehrt kriecht bei zu kleinem Außenwiderstand die Lichtmarke auf den Endwert zu. Die besten Bedingungen sind aperiodische Einstellung und annähernde Übereinstimmung des inneren und äußeren Widerstands. Gegebenenfalls wird bei zu großem Außenwiderstand ein Nebenwiderstand parallel an die Galvanometerklemmen gelegt.

Unter der *Stromempfindlichkeit* versteht man die Stromstärke, die bei einem Skalenabstand von 1 m einen Ausschlag von 1 mm hervorruft. Entsprechendes gilt für die *Spannungsempfindlichkeit*. Berechnet man die Spannungsempfindlichkeit aus der Stromempfindlichkeit, so ist als Widerstand nicht der Innenwiderstand, sondern der Gesamtwiderstand des Galvanometerkreises bei aperiodischer Einstellung einzusetzen.

1.3.3. Röhrenvoltmeter

Diese Geräte ermöglichen Präzisionsmessungen von Spannungen (bis zu Hochspannungen), wenn man eine entsprechende Meßspitze verwendet. Durch ihren sehr großen Eingangswiderstand können sie nahezu als stromlos arbeitende Meßgeräte betrachtet werden. Ihre Einsatzmöglichkeit in der Schule ist auf wenige Versuche in der Abiturstufe und in Arbeitsgemeinschaften beschränkt.

1.3.4. Elektrostatische Meß- und Anzeigeräte

Elektrostatische Spannungsmesser sind in der Schule praktisch nicht im Einsatz. Ein *Braunsches Elektroskop* kann man behelfsmäßig als Meßgerät für Hochspannungen von etwa 0,5 kV bis 10 kV benutzen, indem man es an ein Hochspannungsstromversorgungsgerät anschließt und die Zeigerausschläge mit der Anzeige eines anderen Hochspannungsmeßgerätes vergleicht (Abb. 1.3.4./1).

Das *Wulf-Elektroskop* ist ein empfindlicheres Anzeigerät für Spannungen als das soeben beschriebene. Ohne Hilfsspannung zeigt seine Wendel einen Ausschlag bei Spannungen über 50 V, mit angelegter Hilfsspannung bei Spannungen über 1 V.

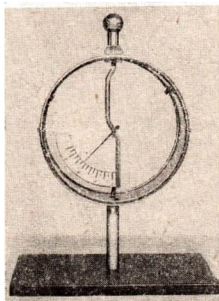


Abb. 1.3.4./1
Braunsch'sches Elektroskop

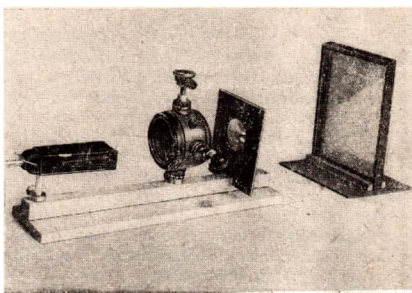


Abb. 1.3.4./2
Wulf-Elektroskop mit Projektionseinrichtung

Es ist notwendig, das Wulf-Elektroskop mit Hilfe einer Leuchte und einer Sammellinse auf einen Transparenzschirm zu projizieren (Abb. 1.3.4./2).

Für Schülerexperimente ist ein einfaches Braunsch'sches Elektroskop ohne Gehäuse zur Anzeige von Spannungen bei Versuchen zur Ladungstrennung geeignet.

1.3.5. Vielfachmeßgeräte

Zwei hochwertige *Vielfachmeßgeräte* gestatten dem Lehrer, gleichzeitig eine genaue Stromstärke- und Spannungsmessung vorzunehmen, um die Anzeigen anderer Geräte zu überprüfen. In Arbeitsgemeinschaften sollen auch die Schüler mit dem Umgang dieser Geräte vertraut gemacht werden.

Für *Schülerexperimente* und das *physikalische Praktikum* genügen einfache Vielfachmeßgeräte (Abb. 1.3.5./1) mit einem Meßfehler bis zu 5%. In Schülerexperimenten kommt es in den meisten Fällen darauf an, daß die Schaltung und das Meßverfahren erfaßt werden. Da die Widerstände und Glühlampen, die auszumessen sind, Toleranzen bis zu 10% ihres Nennwertes haben, können ohnehin bei einer Arbeit in gleicher Front keine exakten Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Gruppen erwartet werden. Es wird empfohlen, alle Schülermeßgeräte einer Schule zu vergleichen und die mit annähernd gleicher Anzeige mit einem bestimmten Farbpunkt zu kennzeichnen. Dann kann man sie in den Versuchen zur Spannungsverteilung und Stromverzweigung zusammen einsetzen und erhält geringere Fehler beim Vergleich der Spannungen und Stromstärken, als es sonst der Fall ist.

Die meisten Vielfachmeßgeräte bieten die Möglichkeit, mit einer eingesetzten Stabzelle (1,5 V) Widerstände zu messen. Das ist auch bei den Schülermeßgeräten der Fall. Die Funktion des Widerstandsmessers ist in V 3.3.2. und die der technischen Meßbrücke in V 3.3.5. erläutert.

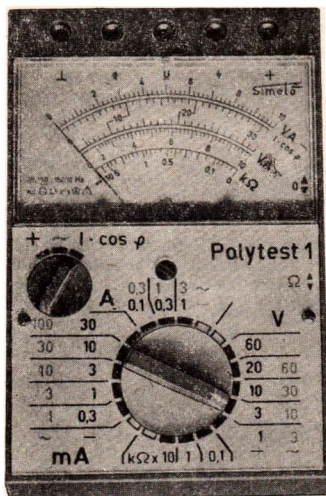


Abb. 1.3.5./1 Schülermeßgerät Polytest 1

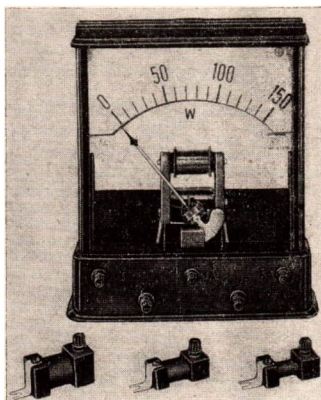


Abb. 1.3.6./1 Leistungsmesser

1.3.6. Leistungsmesser

Leistungsmesser (Abb. 1.3.6./1) sind meist als Demonstrationsgeräte gebaut. Ihre Schaltung ist in V 2.4.6. beschrieben. Ihre Meßgenauigkeit wird durch Blindleistungen (besonders durch induktive) und durch kleine Spannungen (kleiner als die Nennspannung des verwendeten Spannungspfad) stark beeinträchtigt.

1.3.7. Geräte zum Messen der elektrischen Arbeit

Es ist zweckmäßig, sich für einige Versuche, z. B. V 2.4.3., einen Kilowattstunden-zähler auf ein Holzgestell zu montieren und die elektrische Arbeit durch Auszählen der Anzahl der Umdrehungen zu messen.

1.4. Gerätesätze und Hilfsmittel

1.4.1. Tafelschaltgerät

Der vertikale Aufbau von Stromkreisen macht die Versuchsanordnungen für die Schüler wesentlich übersichtlicher. Wenn man die Platten der einzelnen Schalt-

elemente mit dem Schaltzeichen nach vorn einsetzt, kann der Versuchsaufbau weitgehend die Tafelzeichnung ersetzen, besonders wenn man durch magnetisch haftende Applikationen die notwendige Beschriftung vornimmt. Die Verwendungsmöglichkeit des Tafelschaltgerätes für elektronische Versuche ist im 10. Teil der Physikalischen Schulversuche beschrieben.

1.4.2. Aufbaugerätesatz Elektrizitätslehre

Da es schwierig ist, auf einem Tafelschaltgerät Spulen und Transformatoren mit großen Eisenkernen zu befestigen und Modelle von elektrischen Maschinen aufzubauen, sind diese Teile zusammen mit einigen Hilfsmitteln wie Stabmagneten, Kompaßnadel, Polwendeschalter in einem Aufbaugerätesatz zusammengefaßt. Zum Experimentieren mit diesen Teilen kann man aber ebenfalls eine große Übersichtlichkeit erreichen, indem man die Geräte hochstellt oder in einer Stufenanordnung aufbaut.

1.4.3. Gerätesatz Elektrostatik

Auch für elektrostatische Versuche ist ein Tafelschaltgerät nicht geeignet, da die Metallplatte des Gerätes elektrische Fehler erheblich beeinflussen würde. Darum sind diese Versuche in der üblichen Weise auf dem Experimentiertisch auszuführen. Einzelheiten dazu sind in MB 5.0.0. angegeben.

1.4.4. Geräte mit Aufbaucharakter

In der modernen Experimentiertechnik entwickelt sich zunehmend der Einsatz von festen Grundgeräten mit verschiedenen Aufbauvarianten. Hierzu gehören das Gerät zur *Messung in elektrischen und magnetischen Feldern*, das Gerät zum *Nachweis des Induktionsgesetzes* und das *Generator-Motor-Modell*; ihre Einsatzmöglichkeiten sind in zahlreichen Versuchsbeschreibungen — auch im 9. Teil der Physikalischen Schulversuche — beschrieben. Diese Geräte haben große Abmessungen und bieten zusätzlich die Möglichkeit von Schattenprojektion zur noch besseren Beobachtung der Vorgänge.

1.4.5. Schülerexperimentiergeräte (SEG)

Das SEG Elektrik ist ein Teilgerät aus dem System der Schülerexperimentiergeräte (Abb. 1.4.5./1), das alle Bereiche der Schulphysik umfaßt. So werden z.B. zu Experimenten mit dem SEG Elektrik die T-Füße aus dem SEG Optik und die Bimetallstreifen aus dem SEG Kalorik sowie Teile des Glasgerätesatzes benötigt, während fast alle Teile des SEG Elektrik für das SEG Halbleiter-Hochfrequenzelektronik notwendig sind.

Mit dem SEG Elektrik sind alle Versuche mit Ausnahme der Versuche mit Elektromagneten sowie elektrothermischer und chemischer Versuche in der horizontalen

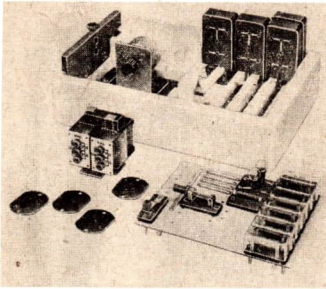


Abb. 1.4.5./1 SEG Elektrik

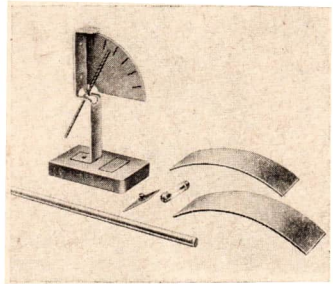


Abb. 1.4.5./2 SEG Elektrostatik

Tischebene aufzubauen. Im Anfangsunterricht werden die Grundbretter mit den notwendigen Schaltelementen auf Steckerbrettern bestückt. Dabei kann man zur besseren Übersicht die drei mittleren Buchsen durch Plastscheiben abdecken. Die so entstandenen Schalter-, Lampen- und Widerstandsbretter können durch kurze Verbindungsleiter zu Stromkreisen verbunden werden. Mit der Weiterentwicklung der experimentellen Fertigkeit können die Grundbretter durch Verbindungsbügel verbunden und die Schaltungen auf engem Raum übersichtlich auf den entstehenden Schaltflächen aufgebaut werden. Besonders im Hinblick auf die Einführung in die elektrischen Vorgänge ist das SEG Elektrik durch ein SEG Elektrostatik ergänzt worden (Abb. 1.4.5./2), mit dem einfache qualitative Versuche möglich sind (siehe dazu Abschnitt 5.1.).

1.4.6. Verbindungen und Verbindungsleiter

In allen Versuchsanordnungen zur Elektrizitätslehre sind Verbindungen zwischen Stromversorgungsgeräten, Schaltelementen, elektrischen Geräten und Meßgeräten herzustellen, die nur sehr kleine Übergangswiderstände haben dürfen und leicht lösbar sein müssen. In den meisten Fällen werden dazu Verbindungsleiter mit Steckern und Buchsen an den Geräten verwendet.

Die einfachste Form ist der geschlitzte Bananenstecker in einer Telefonbuchse. Für Experimentierschaltungen sind jedoch Spezialstecker entwickelt worden, die wieder eine Buchse besitzen, so daß ein weiterer Stecker eingesteckt werden kann. Laborstecker haben einen gebüschelten Stecker und eine querliegende Buchse. Die Verbindungsstecker für Schulversuche sind aus Blech in einer federnden Form gewalzt. Auf ihnen ist in der Längsachse eine Buchse in die Plastisolierung mit eingehüllt, und die Leitung ist seitwärts herausgeführt, so daß sich eine Turmsteckmöglichkeit ergibt (Abb. 1.4.6./1).

Beim Experimentieren soll man immer möglichst kurze Verbindungsleiter benutzen, weil die Schaltungen dadurch übersichtlicher sind. Die Leitungen dürfen aber nicht so kurz gewählt werden, daß Stecker angeknickt werden, weil die Stecker kaum ohne bleibenden Schaden wieder geradegebogen werden können.

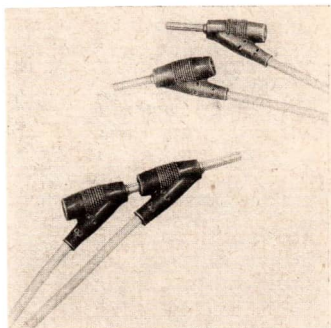


Abb. 1.4.6./1
Stecker für Schulversuche

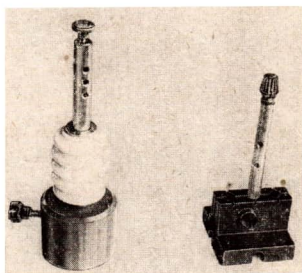


Abb. 1.4.6./2
Fußklemmen; Holzsche Klemme und SEG-Klemme

Vielseitig einsetzbar sind Fußklemmen in verschiedener Ausführung (Abb. 1.4.6./2). Unterhalb einer Klemmschraube bieten sie die Möglichkeit, drei Bananenstecker einzustecken und so Verzweigungen in Stromkreisen zu schaffen. Gegenüber dem Fuß besteht eine hochwertige Isolierung aus Porzellan oder Hartpapier. Der Einsatz kann aus dem Fuß herausgenommen und am Stativmaterial befestigt werden. Verbindungsleiter für Schulversuche werden in verschiedenen Längen von 10 cm bis 200 cm aus plastisolierter Kupferlitze gefertigt und mit Labor- oder Turmstekern ausgerüstet. Zur Kennzeichnung verschiedener Stromkreise ist es zweckmäßig, Verbindungsleiter mit verschiedenfarbiger Isolierung zur Verfügung zu haben.

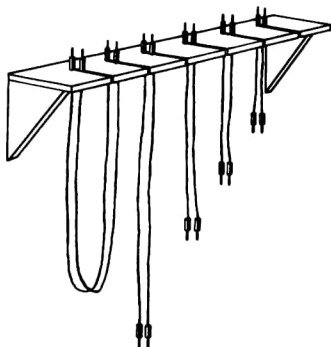


Abb. 1.4.6./3 Konsole zur Aufbewahrung von Verbindungsleitern

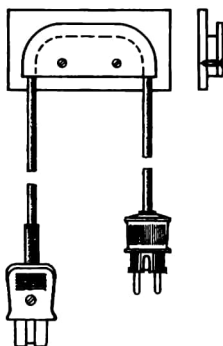


Abb. 1.4.6./4 Vorrichtung zur Aufbewahrung von Anschlußkabeln

Zum Aufbewahren von Verbindungsleitern wird an der Wand in der Nähe des Experimentiertisches eine Konsole befestigt, die aus einem 50 cm langen, 10 cm breiten und 2 cm dicken Brett und zwei dreieckigen Brettchen als Stützen hergestellt wird. Die Konsole wird mit sechs etwa 6 cm tiefen Einschnitten versehen, in welchen die Kabel, nach der Länge geordnet, hängend aufbewahrt werden (Abb. 1.4.6./3). Zum Aufbewahren sehr langer Anschlußkabel und Verbindungsleiter befestigt man auf einem Brett oder an der Innenseite einer Schranktür ein nach beiden Seiten abgerundetes Klötzchen mit überstehendem Deckbrettchen (Abb. 1.4.6./4). Über dieses Klötzchen werden die aufzubewahrenden Kabel gehängt.

Für Schülerexperimente sind stapelbare Aufbewahrungsvorrichtungen entwickelt worden (Abb. 1.4.6./5).

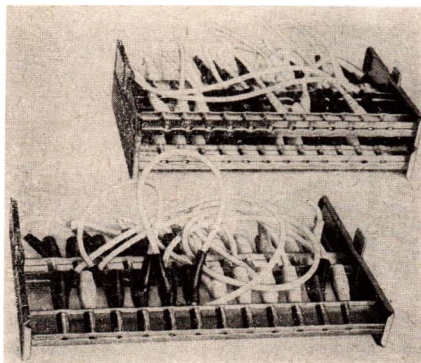


Abb. 1.4.6./5
Vorrichtung
zur Aufbewahrung
von Verbindungsleitern
zum SEG

1.4.7. Herstellen von Schaltungen

Vor dem Aufbau einer Versuchsanordnung ist, insbesondere bei komplizierter Stromführung, stets ein Schaltplan anzufertigen. Hierbei sind genormte Schaltzeichen zu verwenden. Man überprüft zunächst den Schaltplan. Danach wird die Schaltung von nur einer Person vorgenommen. Man geht von einem Pol der Spannungsquelle aus, schließt an diesen einen geöffneten Schalter und daran den Hauptstromkreis. Zum Schluß führt man die Leitung zum anderen Pol der Spannungsquelle zurück. Sodann stellt man die vorgesehenen Verzweigungen her. Ist der Aufbau fertig, so wird er noch einmal an Hand des Schaltplans überprüft. Besonders ist auf den richtigen Anschluß der Meßgeräte zu achten. Bei Verwendung von Gleichstrom sind die mit + bezeichneten Klemmen stets mit dem Pluspol der Spannungsquelle zu verbinden.

Erst danach wird der Stromkreis durch den Schalter geschlossen. Man achtet beim Einschalten besonders darauf, daß die Meßgeräte richtig ausschlagen. Treten Schwankungen der Zeiger auf, so überprüft man die Anlage auf Wackelkontakte.

1.4.8. Elektromotoren als Antriebsmittel

Für den Physikunterricht sind Universalexperimentiermotoren konstruiert worden (Abb. 1.4.8./1). Für den Antrieb leichterer Geräte können sie ohne besondere Befestigung auf den Tisch gestellt werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, sie in verschiedenen Lagen am Stativmaterial zu befestigen. Die Motoren sind auf Rechts- und Linkslauf umschaltbar. Ihre Drehzahl ist über einen Thyristor kontinuierlich von 1000 min^{-1} bis 5000 min^{-1} einstellbar. Die Motorwelle ist direkt herausgeführt, und außerdem ist eine zweite Welle über ein umschaltbares Getriebe 5:1 und 25:1 vorhanden, so daß hier Drehzahlen zwischen 40 min^{-1} und 1000 min^{-1} erzeugt wer-

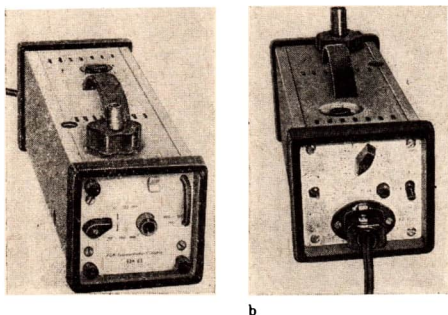


Abb. 1.4.8./1
Experimentiermotor,
a) Vorderansicht,
b) Rückansicht

den können. An die zweite Welle kann immer ein Drehzahlmesser angeschlossen werden. Ältere Experimentiermotoren sind so konstruiert, daß sie an einem Stativ befestigt werden können, wobei die Drehachse in jede beliebige Richtung einstellbar ist. Der Motor ist hochoberig. Ein Heraufsetzen der Drehzahl ist nicht erforderlich. Er ist bei einer Betriebsspannung von 220 V mit Gleichstrom und mit Wechselstrom zu betreiben.

Mit Hilfe eines zugehörigen *Zahnradvorgeleges* kann man drei verschiedene Drehzahlstufen einstellen (Abb. 1.4.8./2). Die Drehzahl läßt sich stufenlos regeln, indem man den Motor über einen als Spannungsteiler geschalteten Gleitwiderstand von 500Ω bis 1000Ω an das Netz anschließt (Abb. 1.4.8./3). Die Drehrichtung ist durch einfaches Umschalten der Anschlüsse am Klemmenbrett zu ändern, wie in Abbildung 1.4.8./4 angegeben wird.

In vielen Fällen befinden sich in den Schulen *technische Elektromotoren*, die ebenfalls als Antriebsmittel bei physikalischen Versuchen verwendet werden können. Im allgemeinen können diese Motoren sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom betrieben werden. Während kleine Motoren in der Regel nur zwei Anschlußklemmen aufweisen, über die sie an die vorgeschriebene Betriebsspannung angeschlossen werden können, befindet sich an größeren Motoren ein Klemmenbrett, auf dem an den einzelnen Klemmen die Enden der Wicklungen des Motors liegen. Diese Klemmen sind entsprechend der Standardisierung mit großen lateinischen

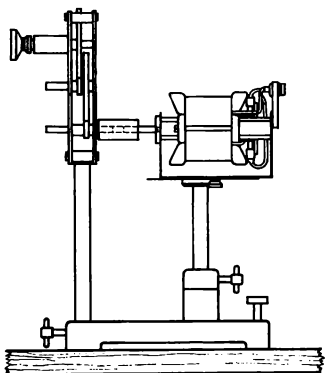


Abb. 1.4.8./2 Experimentiermotor mit Vorgelege

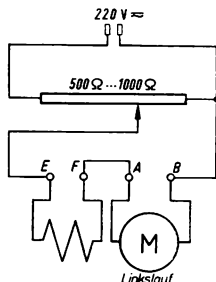
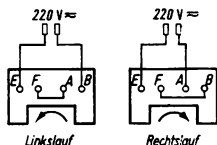


Abb. 1.4.8./3 Anschluß des Experimentiermotors an einen Spannungsteiler

Abb. 1.4.8./4 Anschluß an das Klemmenbrett des Experimentiermotors



Bezeichnung der Klemmen an Gleichstrommotoren

Stromführender Teil	Klemmenbezeichnung
Anker	A—B
Nebenschlußwicklung	C—D
Reihenschlußwicklung	E—F
Wendepole	G—H
Feldwicklung	I—K
Netz	L
Anlasser-Anker	R
Nebenschlußwicklung	M
positiver Leiter	P
negativer Leiter	N

Buchstaben bezeichnet. Die beigefügte Tabelle gibt eine Übersicht über die für den Schulgebrauch wichtigsten Anschlußklemmen.

Vorsicht ist beim Betrieb von größeren *Hauptschlußmotoren* geboten. Läßt man einen Hauptschlußmotor ohne mechanische Belastung laufen, so kann seine Drehzahl in kurzer Zeit so stark anwachsen, daß der Motor beschädigt oder sogar gänzlich zerstört wird. Als Antriebsmittel für Versuche sind am zweckmäßigsten Motoren zu verwenden, die als *Verbund-* oder als *Nebenschlußmotoren* geschaltet werden, da diese bei einer Veränderung der mechanischen Belastung in weiten Grenzen eine nahezu konstante Drehzahl behalten.

Auch das *Motormodell*, das aus Aufbauteilen zusammengesetzt werden kann, läßt sich als Antriebsmotor verwenden. Man schaltet diesen Motor am besten als Nebenschlußmotor, indem man zwei Spulen mit 750 Windungen bzw. 1500 Windungen als Feldwicklungen hintereinanderlegt und α en Trommelanker einsetzt. Das Modell wird mit einer Gleich- oder Wechselspannung von 20 V betrieben.

1.5. Hinweise für die Aufbewahrung und Pflege elektrischer Geräte — Handwerkliche Hinweise

1.5.1. Aufbewahren von Drähten und Folien

Draht. Drähte verschiedener Art werden bei Versuchen zur Elektrizitätslehre sehr häufig gebraucht. *Drahtvorräte* werden auf Holzspulen gewickelt. Für sehr dünnen Draht eignen sich Zwirns spulen. Für dicken Draht werden größere Spulenkörper verwendet, die mit einer Bohrung versehen sind, so daß sie zum Abspulen auf einen Dorn als Achse gesteckt werden können. An der Außenseite des Spulenkörpers wird zum Befestigen des freien Drahtendes eine Schraube eingeschraubt, deren Kopf einige Millimeter übersteht (Abb. 1.5.1./1).

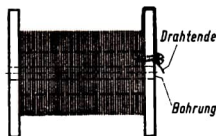


Abb. 1.5.1./1 Holzspule zum Aufbewahren von Drahtvorräten

Folien. Dünne Folien, wie Stanniol, Blattgold, Aluminiumfolie, werden zwischen Seidenpapier in einer Mappe aus dicker Pappe aufbewahrt. Blattgold darf nicht mit den Fingern berührt werden, weil es an der Haut haften bleibt und zerknüllt. Man entnimmt es der Mappe mit den beiden Seidenpapierblättchen, zwischen denen es aufbewahrt wird. Will man eine Folie in schmale Streifen zerschneiden, so legt man sie zweckmäßig ebenfalls zwischen zwei Seidenpapierblätter.

1.5.2. Aufbewahren von Magneten

Magnete behalten nur dann längere Zeit hindurch ihren Magnetismus, wenn sie sachgemäß aufbewahrt werden.

Hufeisenmagnete. Die beiden Pole eines Hufeisenmagneten müssen für die Aufbewahrung durch einen Anker aus Weicheisen überbrückt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß der Anker mindestens den gleichen Querschnitt wie der Magnet hat. Ein Blechstreifen genügt nicht als Anker.

Stabmagnete. Sie werden möglichst paarweise aufbewahrt. Man legt sie parallel nebeneinander so in ein dafür vorgesehenes Kästchen, daß sich ungleichnamige Pole gegenüberliegen, und über-

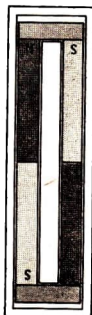


Abb. 1.5.2./1 Aufbewahren von Stabmagneten

brückt die beiden Polpaare durch je einen Anker (Abb. 1.5.2./1). Einzelne Stabmagnete werden in Nord-Süd-Richtung aufbewahrt, so daß der Nordpol nach Norden und der Südpol nach Süden zeigt.

Sind mehrere verschieden lange einzelne Stabmagnete vorhanden, so dürfen sie nicht nebeneinander aufbewahrt werden, damit nicht gleichnamige Pole nebeneinander liegen.

Magnetnadeln. Sie werden frei drehbar auf ihren Füßen aufbewahrt.

Neumagnetisieren eines Magneten. Durch Ausglühen werden Stahlmagnete für immer unbrauchbar. Heftige Erschütterungen der Magnete, hervorgerufen durch Hämmern, Fallenlassen, Stoßen usw., schwächen ihren Magnetismus. Hufeisenmagnete, Stabmagnete und Magnetnadeln, deren Magnetismus schwächer geworden ist, können im Magnetfeld einer von Gleichstrom durchflossenen langen Spule wieder neu magnetisiert werden. Zu diesem Zwecke schließt man hintereinandergeschaltete Spulen des Aufbausatzes an eine Gleichstromquelle an und belastet sie mit der höchstzulässigen Stromstärke. Durch Annähern einer Magnetnadel stellt man die Richtung des Magnetfeldes fest. Der Anzeige der Magnetnadel entsprechend wird der Magnet in die Spule gesteckt, mehrmals hin und her bewegt und wieder aus der Spule entfernt. Leichtes Klopfen gegen den Magneten während des Magnetisierens erhöht die Wirkung.

1.5.3. Abisolieren von Drähten

Beim Abisolieren darf man keinesfalls die Isolierung an der gewünschten Stelle rings um den Draht einschneiden, weil dadurch fast immer der Draht verletzt wird, so daß er leicht bricht. Am vorteilhaftesten bedient man sich zum Abisolieren einer Spezialzange. Sie wird auf die Dicke des Drahtes eingestellt. Nach dem Durchschneiden der Isolierung kann man diese mit Hilfe der Zange leicht abziehen. Eine Isolierung aus Plast kann man dadurch entfernen, daß man die in Frage kommenden Stellen mit der Schneide eines mäßig warmen Lötkolbens wie mit einem Messer umfährt. Die Isolierung läßt sich, nachdem sie vorher über einer Flamme erwärmt wurde, leicht abziehen. Gummiisolierung schneidet man an der Trennstelle vorsichtig ein, etwa so, wie man einen Bleistift ansitzt, und zieht den Gummi in Streifen nach dem Drahtende zu ab. Die einzelnen Drähte einer Litze verdreht man nach dem Abisolieren wieder und verlötet sie.

1.5.4. Lötarbeiten an Kupferdrähten

Man benutzt am besten einen elektrischen Lötkolben von 75 W bis 100 W. Als Flußmittel verwendet man ein säurefreies Löt fett oder noch besser in Spiritus aufgelöstes Kolophonium. Dieses bewahrt man in einer kleinen weithalsigen Flasche auf. Ab und zu muß man die sich bildenden Verbrennungsrückstände vom Kolben entfernen und die Spitze an festem Kolophonium reiben.

Eine dauerhafte Lötstelle erreicht man nur dann, wenn man die zu lötenden Teile zuvor metallisch blank schabt. Grundsätzlich sind beide zu verbindenden Teile getrennt zu verzinnen. Man taucht sie zu diesem Zweck in das aufgelöste Kolophonium oder in das Löt fett und trägt dann mit dem Kolben das Löt zinn auf.

Die zu verbindenden Drahtenden verdreht man, setzt wieder Flußmittel hinzu und lötet die Enden zusammen.

Soll ein Draht an Blech angelötet werden, so bereitet man ihn wie oben vor. Der Draht wird mit einer Federklammer an das Blech geklammert und dann erst angelötet. Bei größeren Blechen verwendet man zum Vermeiden der Wärmeableitung Holz als Unterlage. Hat man mit Lötfett gearbeitet, so wischt man die Lötstelle zuletzt wieder sauber ab. Bei Kolophonium ist das nicht nötig.

Will man Kabelenden verzinnen, so dreht man diese auf, breitet die einzelnen Drähtchen fächerförmig auf einem Hartholzbrettchen aus und reibt sie mit feinstem Schmirgelleinen blank. Nach dem Zusammendrehen der Kabelenden trägt man Kolophonium auf und verzinnt. Hat man viele Kabelenden zu verzinnen, so geht dies schnell, wenn man die zusammengedrehten Enden zuerst in Lötfett und dann in geschmolzenes Lötzinn taucht.

1.5.5. Verarbeiten isolierender Plaste

Es gibt eine Vielzahl isolierender Plaste. Je nach der Herstellung ist das Material homogen, wie PVC, Piacryl, Polystyrol u. a., oder geschichtet, wie die aus imprägniertem Papier hergestellten Schichtpreßstoffe, z. B. Sprelacart.

Alle Plaste lassen sich mit der Reißnadel anreißen. Schichtpreßstoffe kann man mit der Eisensäge sägen. Man muß dabei genau arbeiten, weil eine nachträgliche Bearbeitung selbst mit einer groben Feile schwer ist. Für das Glätten der Kanten kann man grobes Sandpapier verwenden.

Löcher werden nach dem Ankörnen mit dem Spiralbohrer gebohrt. Nur ein ganz scharfer Bohrer gibt saubere Löcher. Man muß dabei das Werkstück ganz fest auf eine Holzunterlage spannen, weil sich sonst die Lochränder auf der Rückseite stark aufwerfen, was mitunter sehr störend wirkt. Außerdem muß man bei dickem Material den Bohrer öfter aus dem Bohrloch nehmen, sonst läuft er sich heiß. Einen unter Umständen entstehenden Grat am Bohrloch kann man durch einen größeren Bohrer beseitigen.

Größere Löcher werden mit der Laubsäge ausgeschnitten. Man muß langsam sägen, sonst erhitzt sich das Blatt infolge mangelnder Wärmeabführung zu sehr und klemmt dann. Am Schluß reibt man die Oberfläche mit Maschinenöl ein. Leichte Schrammen werden so unsichtbar.

Die meisten Plaste lassen sich in dieser Weise bearbeiten. Zum Zusammenkleben einzelner Teile verwendet man einen zum Plast passenden Kleber. Die miteinander zu verbindenden Teile sind vorher an den Verbindungsstellen aufzurauhen.

1.5.6. Reinigen von Kontakten

Es gibt zwei Möglichkeiten des Reinigens, die chemische und die mechanische. Verschmutzte Kontakte werden durch Abreiben mit Tetrachlorkohlenstoff oder Benzin gereinigt. Oxydierte Kontakte darf man nicht mit einer Feile bearbeiten, weil diese zuviel Material wegnimmt. Man verwendet allerfeinstes Schmirgelleinen oder eine Kontaktfeile. Letztere besteht aus einem Stück Uhrfederstahl, das man mit einer Feile kreuzweise aufgeraut hat.

1.6. Arbeitsschutz und Unfallverhütung

1.6.1. Gesetzliche Bestimmungen

Für den Arbeitsschutz im Physikunterricht ist die „Richtlinie für den Arbeits- und Brandschutz im naturwissenschaftlichen Unterricht und in der außerunterrichtlichen Arbeit auf dem Gebiet der Naturwissenschaften vom 25. Mai 1967“ maßgebend. Sie präzisiert die allgemeinen gesetzlichen Vorschriften laut TGL für die Verhältnisse in der Schule und muß nach § 30 in allen Fachunterrichtsräumen vorliegen. Für elektrische Anlagen und für Versuche auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre sind die Bestimmungen in § 6 und § 25 zu finden. Sie sind unbedingt einzuhalten. In § 6.1. heißt es: „Bei elektrischen Versuchsaufbauten kann gegebenenfalls von den vorstehend genannten Vorschriften (TGL) abgewichen werden, wenn Versuche durch einen Lehrer oder Fachmann bzw. unter seiner fachkundigen Aufsicht durchgeführt werden.“

1.6.2. Vorsichtsmaßnahmen beim Experimentieren

Die Auswirkungen von Unfällen durch den elektrischen Strom können verschiedener Art sein. Sie führen von einem leichten Muskelkrampf über Lähmungserscheinungen unter besonders ungünstigen Umständen bis zum Tod. Die tödliche Wirkung des elektrischen Stromes ist in erster Linie vom *elektrischen Körperwiderstand* abhängig. Für die Größe des Widerstandes ist der *Übergangswiderstand* zwischen dem spannungsführenden Gegenstand und der menschlichen Haut maßgebend. Werden Teile des Körpers in gut leitende Verbindung mit einer Spannungsquelle gebracht, so können schon bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen Lähmungserscheinungen auftreten. Von entscheidender Bedeutung dabei ist der Weg, den der Strom durch den menschlichen Körper nimmt. Besonders groß ist die Unfallgefahr, wenn durch den Körper ein Erdschluß hervorgerufen wird.

Aus betriebstechnischen Gründen ist jeder Mp-Leiter eines *Wechselstromnetzes* geerdet, während jeder Phasenleiter Spannung gegenüber der Erde besitzt. Das gleichzeitige Berühren eines Phasenleiters und der Erde über Gas- oder Wasserleitung löst die gleiche Wirkung aus wie das Berühren eines Phasenleiters und des Mp-Leiters. Da der Mp-Leiter geerdet ist, besteht zwischen ihm und der Erde keine Spannung. Ein Berühren des Mp-Leiters allein ist demzufolge gefahrlos.

Besondere Aufmerksamkeit ist den Phasenleitern zu schenken. Da wir durch unseren Körper jederzeit Verbindung mit der Erde haben, ist beim Berühren eines Phasenleiters stets die Gefahr eines elektrischen Schlages gegeben. Es ist deshalb zweckmäßig, die Phasenleiter an sämtlichen Steckdosen der Physikräume zu markieren und die Phasenleiter überall an der gleichen Seite der Steckdosen anzuschließen. Auch das Verbindungskabel, das von dort ausgeht, ist stets in einer bestimmten Farbe, am besten in Rot, zu halten. Den Phasenleiter kann man leicht mit Hilfe einer Glühlampe oder eines Phasenprüfers feststellen. Beim Berühren des Phasenleiters leuchtet die Glühlampe auf.

Für das Experimentieren mit einer 42 V ~ oder 60 V — übersteigenden Spannung sind folgende Hinweise gegeben, deren strikte Einhaltung Unfälle weitgehend ausschließt.

1. Man nehme nie das Zusammenschalten einer Versuchsanordnung unter Spannung vor. Man lege die Spannung erst dann an, wenn die Versuchsanordnung überprüft wurde.
2. In jede Versuchsanordnung muß ein Schalter eingebaut sein. Das Unterbrechen des Stromkreises durch Herausziehen eines Steckers ist unbedingt zu vermeiden.
3. Die Stecker an den Verbindungskabeln dürfen keine seitlichen Befestigungsschrauben haben, sondern müssen vollständig von den Isolierhülsen umgeben sein.
4. Veränderungen des Versuchsaufbaues dürfen nie unter Spannung durchgeführt werden.
5. Spannungsführende Teile dürfen sich nicht in Reichweite von Wasserleitungen, Gasleitungen, Dampfheizungen und Wasserausgüssen befinden, da hier bei unbedachtem Hantieren die Gefahr eines Erdschlusses über den menschlichen Körper besonders groß ist.
6. Spannungsführende Teile sollen nicht am Rande des Experimentiertisches aufgebaut werden, da bei unachtsamem Vorübergehen diese Teile berührt werden können. Aus diesem Grunde soll auch zwischen dem Experimentiertisch und der vordersten Bankreihe ein Abstand von etwa 1,2 m bestehen.
7. Der Erdschluß kann vermieden werden, wenn zwischen dem Wechselstromnetz und dem Versuchsaufbau ein Transformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 geschaltet wird. Dadurch werden Netzstromkreis und Stromkreis der Versuchsanordnung galvanisch getrennt.
8. Es ist angebracht, bei Versuchen mit Hochspannung eine aus Karton geschnittene Warntafel mit einem Blitz-Zeichen aufzustellen.
9. Versuche mit Spannungen über 42 V ~ oder 60 V — sind ausnahmslos vom Lehrer durchzuführen.
10. Von allen Versuchen, bei denen die Netzspannung an nichtisolierten Geräteteilen liegt, sind die Schüler fernzuhalten.

1.6.3. Erste Hilfe bei elektrischen Unfällen

Trotz Beachtens der angeführten Vorsichtsmaßnahmen beim Durchführen elektrischer Versuche ist es möglich, daß durch unglückliche Umstände ein Unfall durch den elektrischen Strom entsteht. Hierbei ist vor allem an solche Unfälle gedacht, die sich auf die Herzmuskulatur auswirken.

Auch der infolge Unfalls durch elektrischen Strom *anscheinend Leblose* bedarf schneller Hilfe; grundsätzlich darf nie sein Tod angenommen werden. Die Hilfeleistung muß überlegt erfolgen, weil Selbstgefährdung durch den Strom besteht.

Die erste Hilfe bei Unfällen durch elektrischen Strom soll möglichst nicht von einem Helfer allein, sondern zu zweit oder von mehreren Personen geleistet werden. Der Verunglückte darf nicht angefaßt werden, solange sein Körper unter Spannung steht! Die Spannung ist sofort abzuschalten! Bei Atemstillstand muß sofort mit der künstlichen Beatmung begonnen werden!

Es ist sofort ärztliche Hilfe zu holen (Notruf: 115). Bei normaler oder einigermaßen regelmäßiger Atmung und Bewußtlosigkeit ist für Atmungs erleichterung durch Entfernen beengender Kleidung und Flachlagerung, zugedeckt an frischer Luft, zu sorgen. Puls und Atmung müssen beobachtet werden!

2. Erscheinungen und Grundbegriffe im elektrischen Stromkreis

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.0. Fast alle Versuche des 2. Kapitels dienen der Einführung in die Grundbegriffe der Elektrizitätslehre. Im wesentlichen werden dabei drei Lehrmittelsätze verwendet:

- das Tafelschaltgerät,
- der Aufbausatz zur Elektrizitätslehre LKO (alte Ausführung) oder der Aufbausatz Elektrizitätslehre (neue Ausführung) und die Ergänzung „Elektrostatik“,
- das SEG Elektrik.

Obwohl die Versuche meist für ein bestimmtes Gerät — z.B. V 2.1.2. für das Tafelschaltgerät — beschrieben sind, kann in den meisten Fällen der gleiche Versuch mit geringen Abwandlungen auch mit Geräten eines anderen Lehrmittelsatzes, z.B. V 2.1.2. mit Geräten des Aufbausatzes zur Elektrizitätslehre oder mit dem SEG Elektrik, durchgeführt werden.

Die in Tabellen angegebenen Werte sind als Richtwerte anzusehen. So ist z.B. im V 2.4.1. für den Grundversuch eine Betriebsspannung von 5 V gewählt worden, um bei der Durchführung als Schülerexperiment mit den Meßbereichen des Polyzet auszukommen. Als Demonstrationsversuch hingegen oder bei Verwendung des Schülermeßgerätes Polytest 1 ist eine Spannung von 6 V...10 V zweckmäßiger.

In einer Reihe von Versuchen, besonders im Abschnitt 2.4., werden handelsübliche Geräte wie Tauchsieder, Heizplatte usw. verwendet. Diese sind mit einem Stecker zum Anschluß an die Netzsteckdose versehen. Dadurch ist das Messen der Leistung, der Stromstärke und der Spannung nicht ohne weiteres möglich. Beim Aufbau sind unbedingt die Richtlinien für den Arbeitsschutz zu beachten, die dazu sinngemäß besagen:

- Das Einführen von einpoligen Steckern (z.B. von Bananensteckern) in unter Spannung stehende Netzsteckdosen ist verboten!
- In Versuchsanordnungen mit Betriebsspannungen über 42 V darf nur eingegriffen werden, wenn diese nicht unter Spannung stehen!

Diese Forderungen können ohne weitere Kontrollmaßnahmen eingehalten werden, wenn ein Netzadapter (Abb. 1.1.5./1) verwendet wird. Dieser gewährleistet durch einen zweipoligen Schalter die vollständige Trennung vom Netz. Behelfsmäßig kann an Stelle des Netzadapters eine handelsübliche Tischsteckdose mit drei Schutzkontaktsteckdosen verwendet werden. Ihr Stecker darf dabei erst dann in die Netzsteckdose eingeführt werden, wenn die Versuchsanordnung vollständig aufgebaut ist. Vor jedem Eingriff in die Versuchsanordnung ist der Stecker aus

der Netzsteckdose zu ziehen. Zum Messen der Stromstärke muß der Stromkreis zum Schaffen der Anschlüsse für den Strommesser unterbrochen werden. Das ist recht umständlich und eine Gefahrenquelle. Deshalb sollte der Gebrauch des Netzadapters vorgezogen werden.

2.0.1. Die Stromstärke I ist als Quotient aus der elektrischen Ladung Q und der Zeit t definiert. Auf die elektrische Ladung wird ausführlich im Kapitel 5 (das elektrische Feld) eingegangen. Im Abschnitt 2.1. wird der Begriff *elektrische Ladung* im V 2.1.1. nur soweit benutzt, wie er zum Einführen der physikalischen Größe *elektrische Stromstärke* erforderlich ist.

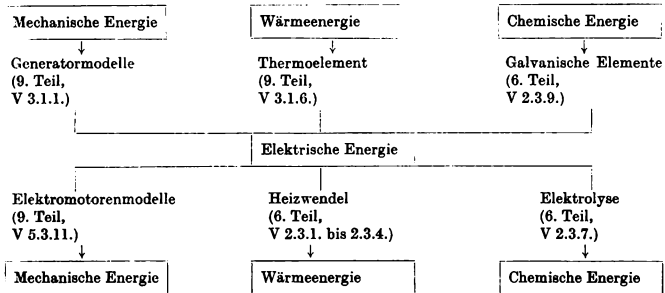
Die Versuche 2.1.3. bis 2.1.5. erweitern die Kenntnisse der Schüler über die elektrische Stromstärke, indem sie Verfahren zum Messen der Stromstärke zeigen und auf die Richtung des elektrischen Stroms Bezug nehmen. Hierbei sollte der Lehrer beachten, daß die Schüler zwischen der gesetzlich festgelegten **elektrischen Stromrichtung** und der **Richtung des Elektronenstroms** unterscheiden lernen. Die **elektrische Stromrichtung** ist im äußeren Stromkreis vom Pluspol zum Minuspol festgelegt. Die Richtung des Elektronenstroms ist jedoch entgegengesetzt zur elektrischen Stromrichtung; die Elektronen fließen vom Minuspol (Elektronenüberschuß) zum Pluspol (Elektronenmangel). Der elektrische *Gleichstrom* kann aber einen Leiter in Abhängigkeit von der Polung der Anschlüsse in dieser oder in jener Richtung durchfließen. In Verbindung mit dem V 2.1.5. kann der Begriff *Wechselstrom* eingeführt werden. Die Unterschiede zwischen den beiden Stromarten zeigt V 2.1.6.

2.0.2. Im Abschnitt 2.2. sind Versuche zur Einführung der physikalischen Größe *elektrische Spannung* beschrieben. Die elektrische Spannung U ist als Quotient aus der Verschiebungsarbeit W und der elektrischen Ladung Q definiert. Das Erfassen dieser Definition wird durch V 2.2.1. unterstützt. Die Versuche V 2.2.2. bis 2.2.4. zeigen Möglichkeiten zum Messen der Spannung, wobei auch ganz einfache Anordnungen zum Nachweis der Spannung aufgenommen worden sind.

Bei der Verwendung des Elektroskops ist zu beachten, daß mit ihm *Spannungen gemessen* und *Ladungen nachgewiesen* werden können.

Bei der Einführung der elektrischen Spannung werden im Unterricht häufig Spannungsquellen vorgestellt und — soweit dies der Stand der Kenntnisse der Schüler zuläßt — auch deren Wirkungsweise erläutert. Besondere Versuchsanleitungen dazu aufzunehmen, erschien nicht als zweckmäßig.

2.0.3. Im Abschnitt 2.3. werden solche Energieumwandlungen beschrieben, die besonders geeignet sind, die Wirkungen des elektrischen Stromes zu veranschaulichen. Dabei sind einige wichtige Anwendungen mit aufgenommen worden (V 2.3.5., 2.3.6., 2.3.7., 2.3.8. und 2.3.9.). Weitere Versuche zur Energieumwandlung können mit Hilfe der folgenden Übersicht schnell ausgewählt werden.



2.0.4. Im Abschnitt 2.4. über die elektrische Arbeit, die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad sind mit V 2.4.1. und V 2.4.4. zwei Versuche zur Darstellung der Zusammenhänge der in den Definitionsgleichungen der Arbeit und Leistung verknüpften Größen enthalten.

Zum Messen der Arbeit und der Leistung bieten sich zwei Wege an:

- die Messung mit einem speziellen Meßgerät (Kilowattstundenzähler bzw. Leistungsmesser),
- die Messung von Spannung, Stromstärke und Zeit zur Berechnung der Arbeit bzw. die Messung von Spannung und Stromstärke zur Berechnung der Leistung.

Vorteilhaft bei der Messung mit einem speziellen Meßgerät ist die Zeitersparnis gegenüber der Berechnung.

Nachteilig beim Kilowattstundenzähler ist die Kleinheit der Ziffern und die lange Versuchsdauer beim Ablesen der Kilowattstunden am Zählwerk. Abhilfe schafft hierbei das Zählen der Umdrehungen der Wirbelstromscheibe. Nachteilig beim Leistungsmesser ist die geringe Anzahl der Meßbereiche (siehe Abschnitt 1.3.). Hierdurch sind unter Umständen große Meßfehler in Kauf zu nehmen. Abschließend sind im Abschnitt 2.4. zwei Versuche zum Bestimmen des Wirkungsgrades aufgenommen, die sich durch den Betrag des erreichten Wirkungsgrades und die Art der Messung unterscheiden.

2.1. Die elektrische Stromstärke

2.1.1. Ladungsaustausch zwischen zwei geladenen Körpern

Zu Versuch 1

1. Bandgenerator
2. 2 Kondensatorplatten
3. 2 Fußklemmen
4. Elektroskop
5. Ladungslöffel

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem
6. Stabglühlampe
7. Kerze

Zu Versuch 3

Geräte 1., 3. und 4., außerdem
8. 2 gleichartige Metallplatten mit Haltestangen (z. B. aus dem Gerät zur Elektrolyse)
9. Petrischale
10. Kupfersulfat

Methodische Hinweise

1. Die Versuche zeigen den Ladungsaustausch unter verschiedenen Bedingungen. Sie können zur Bestätigung von Modellbetrachtungen dienen.
2. Die drei Teilversuche umfassen den Ladungsaustausch durch feste Körper, Flüssigkeiten und Gase.

Versuch 1: Ladungsaustausch durch feste Körper

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.1.1./1 zusammengestellt. Die Kondensatorplatten werden verschiedenartig aufgeladen. Dies kann durch Berühren mit der Haube bzw. der Kugel des Bandgenerators direkt oder über zwei Verbindungsleiter erfolgen. Zur Anzeige des Ladungszustandes dient ein Elektroskop. Berührt man die beiden Kondensatorplatten abwechselnd mit dem Ladungslöffel, so geht der Zeigerausschlag allmählich zurück. Überbrückt man beide Platten mit einem Verbindungsleiter, so geht der Zeigerausschlag plötzlich zurück.

Versuch 2: Ladungsaustausch durch Gase

Die Kondensatorplatten werden, wie unter Versuch 1 beschrieben, aufgeladen. Hält man zwischen beide Kondensatorplatten eine brennende Kerze, so werden durch Ionisation Ladungsträger erzeugt; es erfolgt ein Ladungsaustausch. Der Zeiger des Elektroskops geht allmählich zurück.

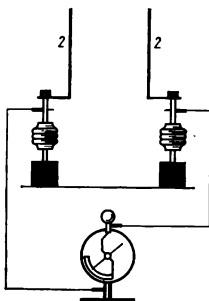


Abb. 2.1.1./1 Versuchsanordnung zum Nachweis des Ladungsaustausches

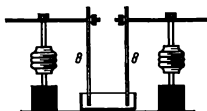


Abb. 2.1.1./2 Anordnung von zwei Metallplatten über einer Glasschale zum Nachweis des Ladungsaustausches in Flüssigkeiten

Überbrückt man die geladenen Platten mit einer Stabglühlampe, so leuchtet diese hell auf. Der Zeigerausschlag geht zurück.

Versuch 3: Ladungsaustausch durch Flüssigkeiten

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.1./2. Man streut in die Petrischale Kupfersulfat und stellt die beiden Metallplatten hinein. Lädt man sie auf, so stellt man fest, daß durch das Salz kein Ladungsausgleich erfolgt. Sobald man jedoch Wasser hinzugibt, in dem sich das Salz löst, geht der Zeigerausschlag des Elektroskops zurück.

Bemerkungen

1. Statt eines Ladungslöffels kann ein geeigneter Metallkörper mit Isolierstiel verwendet werden.
2. Im Versuch 3 können statt des Bandgenerators eine Spannungsquelle (etwa 2 V) und statt des Elektroskops ein Strommesser (Meßbereich etwa 5 mA) verwendet werden.

2.1.2. Untersuchen von Leitern und Isolatoren

Zu Variante a

1. Bandgenerator
2. 2 Kondensatorplatten
3. 2 Fußklemmen
4. Elektroskop
5. verschiedene Proben:
Plastrohr, Wollfaden,
Stahlstab, Kupferdraht,
Aluminiumrohr

Zu Variante b

6. Stromversorgungsgerät (20 V —)
7. Tafelschaltgerät oder
2 Fußklemmen
8. 2 Metallplatten oder Kohlestifte
9. Strommesser (0,5 A) oder
Kleinspannungsglühlampe (0,1 A)
10. Widerstand (50 Ω)
11. Proben wie bei Variante a, außerdem
Benzol, Leitungswasser,
dest. Wasser, wäßrige Lösungen von Schwefelsäure

Methodischer Hinweis

Die beiden Varianten sind jeweils für andere Betrachtungsweisen gedacht. Die Untersuchung der Stoffe zwischen zwei Kondensatorplatten ist angebracht, wenn in die Elektrizitätslehre auf der Grundlage des elektrischen Feldes eingeführt wird. Wird bei der Einführung vom elektrischen Strom und dessen Wirkungen ausgegangen, wählt man den einfachen Stromkreis mit Prüfstrecke und Strommesser.

Variante a

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.1.1./1 aufgebaut. Die Kondensatorplatten werden aufgeladen, bis der Zeiger des Elektroskops voll ausschlägt. Nacheinander werden die Proben über die beiden Kondensatorplatten gelegt, dabei wird der Zeiger des Elektroskops beobachtet. Geht er infolge des Ladungsaustausches auf Null zurück, so ist der untersuchte Stoff als Leiter einzuordnen, andernfalls als Isolator.

Bevor die nächste Probe aufgelegt wird, sind die Kondensatorplatten erneut aufzuladen.

Variante b

Auf dem Tafelschaltgerät oder mit zwei Fußklemmen wird ein einfacher Stromkreis mit Prüfstrecke, Strommesser und Schutzwiderstand ($50\ \Omega$) aufgebaut (Abb. 2.1.2./1). Die Proben von festen Körpern werden nacheinander in die Prüfstrecke eingeklemmt.

Der Ausschlag des Zeigers des Strommessers zeigt an, wenn ein Leiter den Stromkreis schließt. Zur Prüfung der Flüssigkeiten werden an die Anschlußpunkte der Prüfstrecke zwei Metallplatten oder zwei Kohlestifte angeschlossen und in die mit den Prüfstoffen gefüllten Bechergläser gestellt.

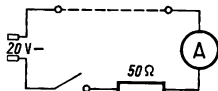


Abb. 2.1.2./1 Einfacher Stromkreis mit Prüfstrecke

2.1.3. Messen der Stromstärke

1. Stromversorgungsgerät (12 V—)
2. Tafelschaltgerät
3. 2 Widerstände ($50\ \Omega$ und $100\ \Omega$) oder 2 Glühlampen (6 V; 2,4 W und 6 V; 0,6 W)
4. Strommesser (1 A)

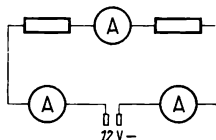


Abb. 2.1.3./1 Einfacher Stromkreis mit drei Applikationen von Strommessern am Tafelschaltgerät

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient zur Einführung der Schaltung eines Strommessers. Mit ihm kann auch die Erkenntnis gewonnen werden, daß die Stromstärke an allen Punkten eines Stromkreises gleich groß ist.

Versuch

Am Tafelschaltgerät wird ein einfacher Stromkreis mit zwei Widerständen oder Glühlampen nach Abbildung 2.1.3./1 aufgebaut. Der Betrag der anzulegenden Spannung und der Meßbereich des Strommessers richten sich nach den verwendeten Bauelementen.

Man schaltet den Strommesser nacheinander an verschiedenen Stellen in den Stromkreis und liest jedesmal die angezeigte Stromstärke ab. Mehrere Messungen zeigen, daß die Stromstärke an verschiedenen Punkten des Stromkreises gleich groß ist.

Bemerkungen

1. Beim Tafelschaltgerät ist zu beachten, daß die Applikationen, an denen zeitweise kein Meßgerät angeschlossen ist, überbrückt werden müssen, da sonst der Stromkreis unterbrochen ist.
2. Der Versuch kann als Schülerexperiment mit Teilen des SEG Elektrik aufgebaut werden.
3. Es empfiehlt sich, die Messungen, wie beschrieben, mit nur einem Meßgerät nacheinander an den verschiedenen Punkten des Stromkreises vorzunehmen. Bei gleichzeitiger Verwendung mehrerer Meßgeräte treten wegen der Gerätefehler teilweise beträchtliche Abweichungen auf.

2.1.4. Nachweis einer Stromrichtung bei Gleichstrom mit einem Meßgerät [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Glühlampe (6 V; 2,4 W)
3. Strommesser (1 A, Nullpunktmittellage)

Methodische Hinweise

1. Die Anschlußbuchsen an Gleichspannungsquellen, Meßgeräten usw. sind mit + und — gekennzeichnet. Verbindet man gleichnamige Buchsen einer Spannungsquelle und eines Meßgerätes miteinander, so schlägt der Zeiger des Meßgerätes nach rechts aus.
2. Je nachdem, welcher Pol der Spannungsquelle an den „Anfang“ des äußeren Stromkreises angelegt wird, fließt der Strom im Uhrzeigersinn oder entgegengesetzt durch den Stromkreis.

Versuch

Am Tafelschaltgerät baut man nach Abbildung 2.1.4./1 einen einfachen Stromkreis auf. Der Zeiger des Strommessers muß sich in Mittellage befinden.

Sind die gleichnamig gekennzeichneten Buchsen der Spannungsquelle und des Meßgerätes miteinander verbunden, so schlägt der Zeiger nach rechts aus. Durch Vertauschen der Anschlüsse an der Spannungsquelle kann die Richtung des Stromes im Stromkreis umgekehrt werden; der Zeiger des Meßgerätes schlägt dann nach links aus. Vertauscht man die Anschlüsse am Meßgerät, so fließt der Strom in umgekehrter Richtung hindurch und bewirkt einen Zeigerausschlag in entgegengesetzter Richtung.

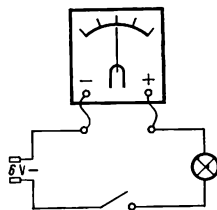


Abb. 2.1.4./1
Einfacher Stromkreis
mit einem Strommesser

Bemerkung

Bei der Durchführung dieses Versuches als Schülerexperiment mit dem Meßgerät „Polyzet IV“ ist der Bodenschalter in die Stellung „Vergleichen“ zum weißen

Punkt hin zu bringen. Der Zeiger wird mit Hilfe der Justiereinrichtung auf den rechts neben der Eins befindlichen Punkt eingestellt. Es ist der Meßbereich 2500 mA zu wählen, da der Zeiger nach links nur wenige Teilstriche ausschlagen kann. Beim Meßgerät Polytest 1 wird der Zeiger elektrisch in Mittelpunktlage gebracht (Bedienungsanleitung).

2.1.5. Einführung des Begriffes Wechselstrom

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)

2. Polwendeschalter

3. Glühlampe (6 V; 2,4 W)

4. Strommesser (1 A; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt, daß der Wechselstrom ständig seine Richtung ändert. Dabei ist den Schülern unbedingt zu sagen, daß in der Technik die Wechsel wesentlich schneller erfolgen.

Versuch

Die Schaltung erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 2.1.5./1. Man zeigt zunächst, daß der Zeiger in entgegengesetzter Richtung ausschlägt, wenn man die Anschlüsse an den Polen der Spannungsquelle vertauscht.

Danach werden das Meßgerät und die Glühlampe an den Polwendeschalter angeschlossen und dieser in Umdrehung versetzt. Der Zeiger des Meßgerätes schwingt periodisch um die Nullpunktmittellage.

Bemerkung

Der Antrieb des Polwendeschalters kann mit der Hand oder durch einen Motor erfolgen. Die Drehzahl ist so zu wählen, daß der Zeiger langsam hin und her bewegt wird.

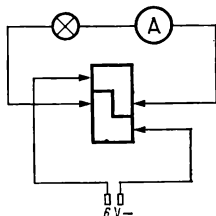


Abb. 2.1.5./1 Einfacher Stromkreis mit Polwendeschalter — schematische Darstellung der Anschlüsse



2.1.6. Gegenüberstellung der Erscheinungen bei Gleich- und Wechselstrom in einer Stabglühlampe

1. Stromversorgungsgerät (150 V —)

2. Netzadapter

3. Demonstrationsglühlampe
oder Stabglühlampe

4. Widerstand (500 kΩ)

5. Drehspiegel

Methodische Hinweise

1. Mit dem Versuch können die Erscheinungen in einer Stabglimmlampe beim Fließen eines Gleich- bzw. Wechselstromes demonstriert werden und damit zur Charakterisierung des Stromverlaufes dienen.
2. Der Versuch kann als Vorversuch notwendig werden, wenn die Gleichrichterwirkung einer Diode veranschaulicht werden soll.

Versuch

Man baut den Versuch nach Abbildung 2.1.6./1 auf und ordnet den Spiegel so an, daß das Spiegelbild der Elektroden von allen Schülern gesehen werden kann.

Legt man eine Gleichspannung an, so leuchtet — je nach Polung — die obere oder die untere Elektrode auf. Im rotierenden Drehspiegel ist ein Lichtband zu sehen. Legt man die Netzwechselspannung an, so hat man den Eindruck, daß beide Elektroden gleichzeitig leuchten. Im rotierenden Drehspiegel erkennt man jedoch zwei unterbrochene Lichtstreifen, die gegeneinander versetzt sind.

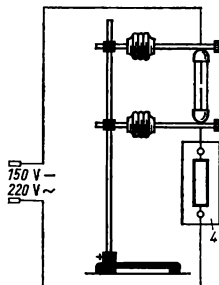


Abb. 2.1.6./1 Versuchsaufbau zur Betrachtung des Lichtbandes einer Stabglimmlampe im Drehspiegel

Bemerkungen

1. Der Antrieb des Drehspiegels kann durch einen Motor oder mit der Hand erfolgen.
2. Die Zündspannung der Stabglimmlampe liegt bei etwa 100 V. Sie muß mit einem Widerstand in Reihe geschaltet werden. Dieser sollte so bemessen sein, daß drei Viertel der Länge der Elektroden vom Glimmsaum überzogen sind.
3. Steht kein Drehspiegel zur Verfügung, so kann die Glimmlampe auch an einem Schwenkstab befestigt und schnell hin und her geschwenkt werden.
4. Vgl. 9. Teil der Physikalischen Schulversuche, V 4.1.3.!

2.2. Die elektrische Spannung

2.2.1. Einführung des Spannungsbegriffes

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. 2 Kondensatorplatten
3. Elektroskop
4. oberflächenversilberte Glaskugel oder graphitierter Tischtennisball
5. 2 Fußklemmen
6. Ladungslöffel
7. pneumatische Wanne
8. Schaumstoff

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist geeignet, die Einführung der Definition der elektrischen Spannung $U = \frac{W}{Q}$ zu unterstützen. Jedoch ist der Versuch für die Schüler nur verständlich, wenn er vorher erläutert wird. Es kann in einem Vorversuch gezeigt werden, daß die Spannung größer wird, wenn mechanische Arbeit — Auseinanderziehen der Kondensatorplatten — verrichtet wird. Umgekehrt wird vom elektrischen Feld mechanische Arbeit bei der Hin- und Herbewegung des Probekörpers verrichtet, und das Elektroskop zeigt an, daß dadurch die Spannung geringer wird.
2. Der Versuch kann in zwei Varianten durchgeführt werden. Die erste, bei der eine Kugel zwischen den Kondensatorplatten aufgehängt wird, ist einfach aufzubauen. Bei der auf einem Stück Schaumstoff schwimmenden Kugel bewegt sich der Körper recht langsam, und der Vorgang kann gut erläutert werden.

Versuch

Der Versuch wird nach Abbildung 2.2.1./1 oder 2.2.1./2 aufgebaut. Dabei ist darauf zu achten, daß die Verbindungsleiter frei hängen und keine Erdberührung haben, weil sonst Elektronen abfließen können. Die beiden Kondensatorplatten werden

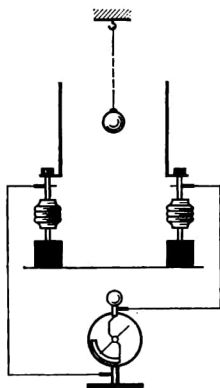


Abb. 2.2.1./1
Kugel als Pendelkörper
zwischen
zwei Kondensatorplatten

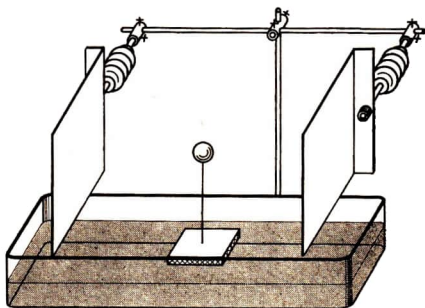


Abb. 2.2.1./2
Kugel auf Schaumstoff in pneumatischer Wanne

mit dem Bandgenerator aufgeladen. Mit einem Ladungslöffel wird auch die Kugel aufgeladen. Sie bewegt sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zu der entgegengesetzt geladenen Platte. Dort gibt sie ihre Ladung ab, wird von der Platte entgegengesetzt aufgeladen und bewegt sich nun zur gegenüberliegenden Platte.

Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die Energie des elektrischen Feldes nicht mehr zur Bewegung des Körpers ausreicht. Dies kann auch am angeschlossenen Elektroskop abgelesen werden, dessen Zeigerausschlag nach jeder Hin- und Herbewegung kleiner wird und damit die geringer werdende Spannung anzeigt.

Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich, einen mit Graphit oder Aluminiumbronze bestrichenen Tischtennisball zu verwenden.
2. Falls die beiden Kondensatorplatten über das Elektroskop zu schnell entladen werden, schließt man nur die Kugel des Elektroskops an eine Platte an.

2.2.2. Nachweis der Spannung zwischen zwei geladenen Körpern mit dem Elektroskop [SE]

1. Bandgenerator oder
Influenzmaschine oder
Glas- und Hartgummistab und Reibzeug
2. 2 Kondensatorplatten
3. Elektroskop
4. versilberte Glaskugel
5. Seidenpapierstreifen und Knetmasse

Methodischer Hinweis

Die meisten Spannungsmesser beruhen auf der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes. Bei der Einführung der Spannung kommt es jedoch darauf an, die Spannung zwischen zwei Punkten nachzuweisen, ohne daß ein Strom fließt.

Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 2.1.1./1. Es ist darauf zu achten, daß die Verbindungsleiter keine anderen Teile berühren. Mit dem Bandgenerator oder den geriebenen Stäben werden die Kondensatorplatten aufgeladen. Dabei kann durch wiederholtes Drehen am Bandgenerator bzw. wiederholtes Abstreichen der geriebenen Stäbe an den Kondensatorplatten die Spannung erhöht werden. Das wird durch das angeschlossene Elektroskop angezeigt.

Bemerkungen

1. Das Schulelektroskop ist unempfindlich und zeigt nur Spannungen von einigen Kilovolt an. Es genügt, eine Verbindung zwischen einem geladenen Körper und dem Anzeigeteil herzustellen, weil dadurch bereits ein Zeigerausschlag bewirkt wird. Der Ausschlag wird jedoch größer, wenn der zweite — entgegengesetzt geladene — Körper mit dem Gehäuse verbunden wird.
2. Behelfsmäßige Elektroskope können sehr einfach aufgebaut werden, z. B. nach Abbildung 2.2.2./1 (Kondensatorplatte mit davor aufgehängter Kugel) oder nach Abbildung 2.2.2./2 (Kondensatorplatte mit daran befestigtem Seidenpapierstreifen).



Abb. 2.2.2./1



Abb. 2.2.2./2

3. Der Zeiger des Elektroskops ist schlecht sichtbar. Darum empfiehlt sich eine Projektion im Schattenwurf oder mit der Kippvorrichtung des Tageslichtschreibprojektors.



2.2.3. Nachweis der Spannung mit der Spannungswaage

1. Stromversorgungsgerät (über 100 V) oder Netzadapter
2. Spannungswaage
3. 3 Fußklemmen
4. Glühlampen (220 V; 15 W)
5. Optikleuchte ohne Kondensor

Methodischer Hinweis

Vergleiche V 2.2.2.!

Versuch

Die Spannungswaage wird nach Abbildung 2.2.3./1 aufgebaut. Der große und der kleine Ausgleichskörper werden auf dem Waagebalken verschoben, bis dieser genau waagerecht steht. Die obere Begrenzungsschraube ist so einzustellen, daß sich die beiden Kondensatorplatten, deren Abstand etwa 1 cm betragen soll, nicht berühren können. Dennoch ist zur Sicherung eine Glühlampe als Schutzwiderstand in den Stromkreis zu schalten. Sie leuchtet auf, sobald die beiden Kondensatorplatten einander berühren.

Der Anschluß erfolgt bei Verwendung eines Stromversorgungsgerätes direkt an dessen Buchsen. Beim Anschluß an die Netzspannung muß ein Netzadapter verwendet werden.

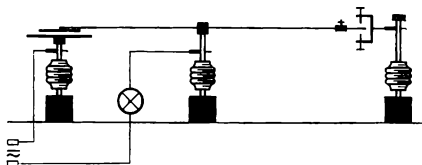


Abb. 2.2.3./1 Aufbau der Spannungswaage zum Nachweis der Netzspannung

Sobald die Spannung anliegt, nähert sich die bewegliche Kondensatorplatte der feststehenden um so mehr, je höher die anliegende Spannung ist. Dies ist bei direkter Beobachtung nicht deutlich zu erkennen. Deshalb sollte das Balkenende zwischen den Begrenzungsschrauben mit der Optikleuchte als Schatten oder mit der Kippvorrichtung des Tageslichtschreibprojektors auf die Tafel projiziert werden.

Bemerkungen

1. Die Spannungswaage ist ein statisches Gerät, mit dem Spannungen ab etwa 100 V nachgewiesen werden können. Sie arbeitet auch beim Anlegen einer Wechselspannung, da sich ja die Polarität an beiden Kondensatorplatten gleichzeitig ändert und damit die anziehende Kraftwirkung erhalten bleibt.
2. Beim Verwenden eines Stromversorgungsgerätes ist darauf zu achten, daß durch das Zusammenkommen der beiden Kondensatorplatten die zulässige Stromstärke (0,1 A) nicht überschritten wird.

2.2.4. Messen der Spannung zwischen verschiedenen Punkten eines einfachen Stromkreises

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (6 V —) | 3. Glühlampe (6 V; 2,4 W) |
| 2. Tafelschaltgerät | 4. Spannungsmesser (10 V) |

Methodische Hinweise

1. Bei diesem Versuch sollten die verschiedenen Möglichkeiten der Schaltung eines Spannungsmessers gefunden und überprüft werden. Dazu ist das Tafelschaltgerät sehr zweckmäßig, da hier die Schaltung durch die vertikale Anordnung sehr gut zu übersehen ist.
2. Dieser Versuch kann auch mit Teilen des SEG aufgebaut werden und dient der Entwicklung von Fähigkeiten zur Spannungsmessung.

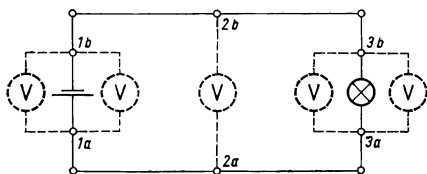


Abb. 2.2.4./1 Einfacher Stromkreis am Tafelschaltgerät zum Messen der Spannung zwischen verschiedenen Punkten

Versuch

Am Tafelschaltgerät wird ein einfacher Stromkreis nach Abbildung 2.2.4./1 aufgebaut. Dabei werden an den gekennzeichneten Stellen Stützpunkte eingesetzt, um dort dann den Spannungsmesser anschließen zu können.

Nun wird der Spannungsmesser an allen eingezeichneten Stellen parallel zur Spannungsquelle bzw. zur Glühlampe geschaltet. Dabei wird nahezu immer der gleiche Wert angezeigt. Schließt man jedoch z.B. an den Punkten 1a und 3a an, so erhält man keinen Ausschlag.

2.2.5. Untersuchen der Polarität einer Spannungsquelle

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (20 V)
2. Polreagenzpapier
3. Glas- oder Plastscheibe
4. Reagenzglashalter

Zu Variante b

5. Stromversorgungsgerät (200 V—)
6. Stabglühlampe in Halterung
7. Widerstand (500 k Ω)

Methodischer Hinweis

Die Versuche zeigen einige Möglichkeiten, die Pole einer Gleichspannungsquelle zu bestimmen, wenn diese nicht gekennzeichnet sind.

Variante a: Benutzen einer Kleinspannung

Die Bananensteckerhülsen von zwei Verbindungsleitern werden in eine geeignete Halterung — z.B. in einen Reagenzglashalter — so eingeklemmt, daß sich die Metallstifte nicht berühren können. An einem Stativ befestigt man senkrecht eine isolierte Platte, auf die ein Stück angefeuchtetes Polreagenzpapier gebracht wird. Man drückt die Halterung mit den Bananensteckern fest auf das Papier. Legt man eine Gleichspannung von 10 V ... 20 V an, so ist um den Bananenstecker, dessen Verbindungsleiter zum negativen Pol führt, eine rötliche Verfärbung zu beobachten.

Variante b: Benutzen einer Mittelspannung

Man schließt die Glühlampe mit in Reihe geschaltetem Widerstand an die Buchsen für Gleichspannung des Stromversorgungsgerätes an und erhöht die Spannung, bis eine Elektrode der Glühlampe leuchtet. Polt man um, so leuchtet die andere Elektrode.

Es leuchtet jeweils die mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbundene Elektrode.

Bemerkung

Die Variante a kann auch als Schülerexperiment mit dem SEG „Elektrik“ durchgeführt werden.

2.3. Wirkungen des elektrischen Stromes

2.3.1. Erwärmen eines Drahtes durch elektrischen Strom [SE]

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (1 V ... 20 V)
2. Heizwendel mit Halter
3. Erlenmeyerkolben, 300 ml
4. Stopfen, einfach durchbohrt
5. Thermometer oder Manometerrohr

Zu Variante b

- Gerät 1., außerdem
6. 2 Klemmstangen
7. dünner Widerstandsdraht
8. Hakenkörper, etwa 0,1 N

Methodische Hinweise

1. Die beiden Varianten unterscheiden sich vor allem in der Art der Nachweisverfahren. Dabei ist die Temperaturanzeige an einem Thermometer von den Schülerplätzen aus schlecht zu sehen. Bei der Verwendung eines Manometerrohrs entfällt dieser Nachteil, da der Anstieg der Manometerflüssigkeit von allen Plätzen aus gut zu sehen ist.
2. Die Heizwendel sollte nur soweit erwärmt werden, daß sie nicht glüht.

Variante a

Der Versuchsaufbau ist aus Abbildung 2.3.1./1 zu ersehen. In den Gummistopfen werden seitlich zwei Kerben eingeschnitten, so daß die Halter der Heizwendel eingeklemmt werden können. Man schließt die herausragenden Halter mit Krokodilklemmen an die Verbindungsleiter an. Beim Schließen des Stromkreises kann man ein Ansteigen der Temperatur beobachten.

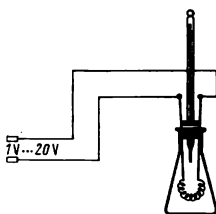


Abb. 2.3.1./1
Erlenmeyerkolben
mit Heizwendel
und Thermometer

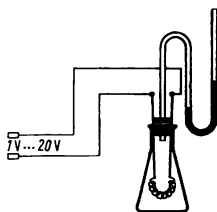


Abb. 2.3.1./2
Erlenmeyerkolben
mit Heizwendel
und Manometer

Ersetzt man das Thermometer durch ein Manometerrohr (Abb. 2.3.1./2), so ist nach Schließen des Stromkreises ein Steigen der Manometerflüssigkeit zu beobachten.

Bemerkung

Die Manometerflüssigkeit ist kräftig zu färben. Als Hintergrund ist ein Stück weißer Karton anzubringen.

Variante b

Beim Nachweis der Erwärmung durch Ausdehnung wird ein dünner Widerstandsdraht zwischen Klemmstangen, die mit Tischklemmen an der Tischkante befestigt sind, eingespannt (Abb. 2.3.1./3). Man hängt einen Hakenkörper an und stellt einen Zeiger zur Höhenmarkierung auf. Nach dem Einschalten

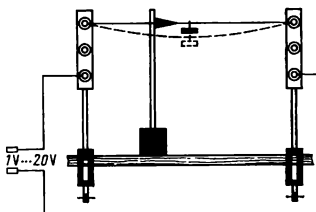


Abb. 2.3.1./3 Horizontal eingespannter
Draht und Hakenkörper

des Stromes verlängert sich der Draht infolge der Erwärmung, und der Hakenkörper senkt sich einige Zentimeter. Unterbricht man den Stromkreis, so geht der Körper in seine ursprüngliche Lage zurück.

Bemerkung

Die Temperaturerhöhung darf nicht zu groß sein, da es sonst zu einer bleibenden Verformung kommt.

2.3.2. Glühen eines Drahtes durch elektrischen Strom

1. Stromversorgungsgrät (20 V)
2. Klemmetange
3. Heizwendel mit Halter
4. Strommesser
5. Becherglas

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt, daß Leiter so stark erwärmt werden können, daß sie zu glühen beginnen. Im Wasser oder in einem Luftstrom wird ein großer Teil der Wärme schnell abgeführt.
2. Der Versuch eignet sich zur Demonstration der Wirkungsweise vieler elektrischer Wärmegeräte.

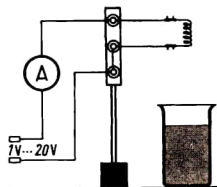


Abb. 2.3.2./1 Klemmetange mit Heizwendel mit Halter

Versuch

Der Versuch wird nach Abbildung 2.3.2./1 zusammengestellt. Man legt eine geringe Spannung an und erhöht diese, bis die Wendel leicht glüht. Dabei zeigt der Strommesser die größer werdende Stromstärke an. Erhöht man die Spannung und damit die Stromstärke weiter, so glüht die Wendel immer heller. Bläst man kräftig gegen die Wendel, so verringert sich deren Helligkeit beträchtlich. Taucht man sie in ein Becherglas mit Wasser, so ist keine Glühwirkung mehr zu sehen.



2.3.3. Erwärmen einer Kochsalzlösung durch elektrischen Strom

1. Stromversorgungsgerät (20 V) oder Netzanschlußgerät
2. Strommesser (5 A)
3. Kohleelektroden mit Halter
4. pneumatische Wanne oder Becherglas
5. Thermometer
6. Kochsalz

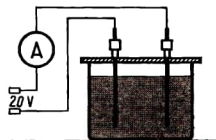


Abb. 2.3.3./1 Versuchsaufbau zum Erwärmen einer Kochsalzlösung

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann als Parallelversuch zu V 2.3.2. betrachtet werden. Er zeigt, daß alle Leiter — also auch leitende Flüssigkeiten — durch elektrischen Strom z. T. beträchtlich erwärmt werden.

Versuch

Man setzt die Elektroden in etwa 50 mm Abstand in die Wanne bzw. in das Becherglas und füllt je nach den Abmessungen des Gefäßes eine kleine Wassermenge ein; denn der Temperaturanstieg soll möglichst schnell erfolgen (Abb. 2.3.3./1). Um die Stromstärke zu begrenzen, gibt man nur wenig Kochsalz hinzu. Man legt eine Spannung an und erhöht diese, bis die Stromstärke etwa 5 A beträgt. Die Temperatur steigt schnell an.

Bemerkung

Wird der Versuch mit Netzspannung durchgeführt, siedet das Wasser infolge der wesentlich größeren Leistung bereits nach kurzer Zeit. Es bestehen hierbei jedoch Gefahren. Die entsprechenden Arbeitsschutzvorschriften sind sorgfältig zu beachten. In die unter Spannung stehende Apparatur darf auf keinen Fall eingegriffen werden!

2.3.4. Vergleichen der Leuchtwirkung eines gestreckten und eines gewendelten Glühdrahtes

1. Stromversorgungsgerät (20 V)
2. Klemmstange
3. Widerstandsdrähte oder Heizwendelstücke (15 cm lang)

Methodischer Hinweis

Bei einem gewendelten Draht ist die Wärmeabgabe an die umgebende Luft infolge der gegenseitigen Aufheizung der Windungen geringer als bei einem gestreckten. Deshalb sind die Glühdrähte von Glühlampen meist zu Wendeln oder Doppelwendeln gewickelt, weil durch die höhere Temperatur auch eine größere Leuchtwirkung erreicht wird.

Die Glühdrähte in Heizgeräten hingegen — die wesentlich dicker und länger sind — werden gewendelt, um sie auf kleinem Raum unterzubringen.

Versuch

Die beiden Drahtstücke, von denen das eine vor den Augen der Schüler zu einer Wendel gewickelt wird, werden nach Abbildung 2.3.4./1 an einer Klemmstange hintereinandergeschaltet. Man legt eine Spannung an und erhöht diese, bis die Wendel stark glüht. Am gestreckten Leiter ist nur eine schwache

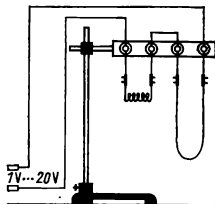


Abb. 2.3.4./1 Klemmstange mit gewendeltm und nicht gewendeltm Widerstandsdraht

Rotglut zu erkennen, obwohl beide Drähte von gleicher Beschaffenheit sind und von gleicher Stromstärke durchflossen werden.

2.3.5. Modellversuch zur Wirkungsweise einer Schmelzsicherung

1. Stromversorgungsgerät (6 V)
2. 3 Fußklemmen
3. Glühlampe (6 V; 0,5 A)
4. Glühlampe (6 V; 5 A)
5. sehr dünnes Drähtchen (50 mm lang)
6. Widerstandsdraht oder Heizwendelstück (30 cm lang)
7. Seidenpapier
8. Papierzeiger

Methodischer Hinweis

Der nachstehende Modellversuch ist stark vereinfacht und frei von allen technischen Einzelheiten. Im Vordergrund steht das physikalische Prinzip.

Versuchsaufbau

Man baut die Versuchsanordnung nach Abbildung 2.3.5./1 auf. Das dünne Drähtchen (5), das die Sicherung darstellt, wird mit zwei Bananensteckern in den Buchsen der Fußklemmen eingeklemmt. Darüber hängt man einen Papierzeiger (8), der

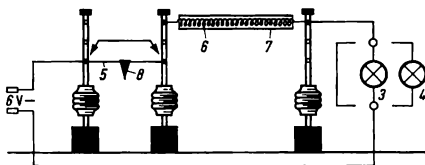


Abb. 2.3.5./1
Versuchsanordnung zur Demonstration der Wirkungsweise einer Schmelzsicherung

beim Durchschmelzen herabfällt. Der Widerstandsdraht (6) wird mit Seidenpapier (7) umwickelt, das die Isolation darstellt. Nacheinander demonstriert man folgende Fälle:

Versuch 1: Normale Belastung eines Stromkreises

Der Stromkreis wird mit der Glühlampe 0,5 A geschlossen. Die Glühlampe leuchtet.

Versuch 2: Überlastung eines Stromkreises

Parallel zur Glühlampe 0,5 A wird die Glühlampe für eine Stromstärke von 5 A geschaltet. Schließt man den Stromkreis, so glüht der Sicherungsdraht hell auf und schmilzt. Der herabgefallene Papierzeiger zeigt, daß der Stromkreis unterbrochen ist.

Versuch 3: Kurzschluß im Stromkreis

Die Glühlampe wird mit einem Verbindungsleiter überbrückt, so daß der Strom — wie beim Kurzschluß — parallel zum elektrischen Gerät fließen kann. Schließt man den Stromkreis, so schmilzt der Sicherungsdraht.

Versuch 4: Geflickte Sicherung

Parallel zum Sicherungsdraht (5) wird ein Verbindungsleiter geschaltet. Die beiden Glühlampen im Stromkreis sind parallel geschaltet. Schließt man den Stromkreis, so fließt ein Strom mit einer Stärke von über 5 A. Da parallel zum Sicherungsdraht ein dickerer Leiter liegt, schmilzt der Sicherungsdraht nicht durch. Hingegen erwärmt sich jetzt der Widerstandsdraht so beträchtlich, daß das Seidenpapier zu verkohlen und schließlich hell zu brennen beginnt.

Bemerkung

Dünnere Draht, der bereits bei einer Stromstärke von etwa 2 A schmilzt, ist im SEG Elektrik enthalten oder kann aus einem Stück Litze herausgezogen werden.

2.3.6. Modellversuch zum Unterbrechen eines Stromkreises durch Bimetallstreifen [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V)
2. 2 Klemmstangen
3. Kontaktschraubenträger
4. Heizwendel mit Halter
5. Glühlampe (6 V; 5 A)
6. Gleitwiderstand (30 Ω)
7. Bimetallstreifen (dick)
8. Bimetallstreifen (dünn)

Methodischer Hinweis

Die Modelle von Bimetallsicherungen sind in diesem Versuch stark vereinfacht und veranschaulichen vor allem das physikalische Prinzip. Die technischen Ausführungen sind meist so kompliziert, daß sie mit schulischen Mitteln nicht nachgestellt werden können. So werden z.B. durch die Krümmung meist mechanische Sperren ausgelöst, die erst mit der Hand eingedrückt werden müssen, bevor der Stromkreis erneut geschlossen werden kann.

Auch wird der Stromkreis meist sprunghaft geöffnet. Dies wird erreicht, indem man dem Bimetallstreifen über eine besondere Formgebung eine Vorspannung gibt. Durch den sprunghaften Übergang wird verhindert, daß sich ein Lichtbogen bildet.

Versuch 1: Indirekte Erwärmung des Bimetalls

Man stellt die Versuchsanordnung nach Abbildung 2.3.6./1 mit dem dicken Bimetallstreifen zusammen und schaltet alle Bauelemente in Reihe. Die Stellschraube des Kontaktschraubenträgers muß leicht auf den Bimetallstreifen drücken, so daß gerade noch Kontakt vorhanden ist. Der Bimetallstreifen ist mit der Seite, deren

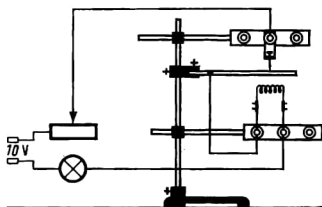


Abb. 2.3.6./1
Versuchsanordnung zur indirekten Erwärmung eines Bimetallstreifens

Metall den größeren Ausdehnungskoeffizienten hat, nach oben einzuspannen. Er krümmt sich dann bei Erwärmung nach unten.

Man legt eine Spannung von etwa 10 V an und verringert den Widerstand langsam, wodurch die Glühlampe immer heller aufleuchtet. Gleichzeitig beginnt auch die Wendel immer stärker zu glühen. Durch die Wärmeeinwirkung wird der darüberliegende Bimetallstreifen erwärmt; er krümmt sich nach unten, und der Stromkreis wird unterbrochen.

Sobald sich der Bimetallstreifen abgekühlt hat und in seine alte Lage zurückgegangen ist, beginnt der Vorgang von neuem.

Versuch 2: Direkte Erwärmung des Bimetalls

Aus dem Versuchsaufbau wird die Heizwendel entfernt und der dicke Bimetallstreifen durch den dünnen ersetzt. Wie im Versuch 1 wird der Widerstand verringert. Mit zunehmender Stromstärke erwärmt sich der Bimetallstreifen und krümmt sich bei einer Stromstärke von etwa 2 A so, daß der Stromkreis unterbrochen wird.

Bemerkung

Bei geeigneter Einstellung der Stromstärke erhält man eine „Blinkanlage“.

2.3.7. Elektrolyse angesäuerten Wassers

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Gerät zur Elektrolyse

Versuch

Das Gerät wird nach Abbildung 2.3.7./1 an einem Stativ befestigt. Man füllt Wasser, dem man etwas Schwefelsäure beigegeben hat, in den Trichter und in

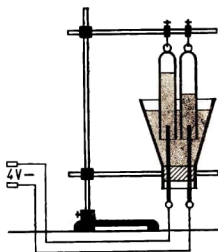


Abb. 2.3.7./1
Gerät zur Elektrolyse angesäuerten Wassers

die beiden Reagenzgläser. Die Reagenzgläser stülpt man über die Elektroden und hängt sie auf.

Legt man eine Gleichspannung von 2 V ... 4 V an, so ist zu beobachten, daß sich an beiden Elektroden Gasblasen bilden.

Nach einiger Zeit haben sich die Gase im oberen Teil der Reagenzgläser angesammelt und das Wasser verdrängt.

An der Anode wurde ein Teil Sauerstoff und an der Kathode wurden zwei Teile Wasserstoff abgeschieden.

Der Nachweis der Gasarten erfolgt in der üblichen Art.

Bemerkung

Das angegebene Verhältnis erreicht man annähernd genau nur mit Platinelektroden. Kohlelektroden absorbieren einen Teil des Gases, besonders den Sauerstoff.

2.3.8. Verkupfern eines Gegenstandes

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Strommesser (50 mA)
3. Gleitwiderstand (30 Ω)
4. Becherglas
5. Kupferelektrode (Blech oder dicker Draht)
6. Nagel
7. Klemmstange
8. Kupfersulfat

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist ein einfaches Beispiel galvanischer Verfahren zur Oberflächenveredlung.
2. An Stelle eines metallischen Gegenstandes kann auch jedes andere Material verwendet werden, wenn es vorher durch Einreiben mit Graphit elektrisch leitend gemacht wurde.

Versuch

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.3.8./1 zusammengestellt. Dabei befestigt man das Kupferblech oder den Draht an der Klemmstange und stellt eine Verbindung zum Pluspol her. Den Nagel schmirgelt man vorher blank und verbindet ihn mit dem Minuspol. In das Gefäß gießt man eine gesättigte Kupfersulfatlösung. Man schließt den Stromkreis und stellt den Widerstand so ein, daß ein Strom mit einer Stärke von etwa 50 mA fließt. Schon nach einer kurzen Zeit kann man am Nagel einen leichten KupfERNiederschlag feststellen.

Bemerkung

Soll der Überzug dauerhaft sein, darf die Stromstärke nur 0,01 A bis 0,02 A betragen.

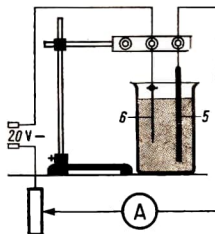


Abb. 2.3.8./1
Versuchsanordnung zum
Verkupfern eines Gegen-
standes

2.3.9. Zusammenstellen galvanischer Elemente

1. Satz Elektroden
2. pneumatische Wanne
3. Spannungsmesser (2 V) oder
4. Glühlampe (1,8 V)
5. Schwefelsäure, verdünnt

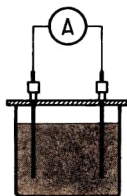


Abb. 2.3.9./1
Galvanisches Element

Versuch

Man wählt aus dem Plattensatz ein Plattenpaar aus, z.B. Kohle und Zink, und stellt es in die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Wanne (Abb. 2.3.9./1). Schließt man die Glühlampe an, so leuchtet diese. Mit einem Meßgerät kann man die Spannung messen und die Polarität ermitteln.

Bemerkungen

1. Es können auch andere Elemente zusammengestellt werden.
2. Stellt man alle Platten nebeneinander in die Wanne und ermittelt paarweise Spannung und Polarität, so kann man die Stoffe zu der galvanischen Spannungsreihe ordnen.

2.4. Die elektrische Arbeit und Leistung

2.4.1. Bestätigung der Gleichung für die elektrische Arbeit

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Doppelheizwendel mit Halter (SEG Kalorik)
3. Strommesser (5 A)
4. Spannungsmesser (10 V)
5. Drehwiderstand (50 Ω)
6. Uhr mit Sekundenzeiger
7. Becherglas (250 ml)
8. Becherglas (100 ml)
9. Kalorimeterdeckel
10. Kalorimereinsatz
11. Rührer
12. Thermometer (100 $^{\circ}\text{C}$)

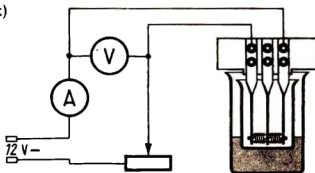


Abb. 2.4.1./1
Schaltung der Doppelheizwendel

Methodischer Hinweis

Zur Bestätigung der Gleichung der elektrischen Arbeit ist es erforderlich, daß die Proportionalität der Größen I , U und t zur Arbeit W nachgewiesen wird. Dazu ist das kalorimetrische Verfahren geeignet, weil die verrichtete Arbeit ($W_{\text{W}} = c \cdot m \cdot \Delta\theta$) exakt gemessen werden kann. Man kommt hierbei mit einem Grundversuch und drei Teilversuchen aus, wenn man nach der Tabelle vorgeht.

Variante a

Die ausgewählten Geräte werden nach Abbildung 2.4.2./1 geschaltet. Der Stromkreis wird für eine vorgegebene Zeit geschlossen. Während dieser Zeit werden die Stromstärke und die Spannung gemessen.

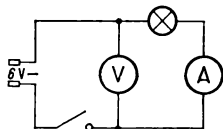


Abb. 2.4.2./1 Schaltplan zum Ermitteln der elektrischen Arbeit

Beispiel für eine Meßreihe

	U in V	I in A	t in s	W in W · s
Glühlampe 6 V; 0,1 A	6	0,1	10	6
Glühlampe 6 V; 0,1 A	6	0,1	40	24
Glühlampe 6 V; 0,4 A	6	0,4	10	24
Glühlampe 6 V; 5 A	6	5,0	10	300

Variante b

Der Anschluß der Geräte für Netzspannung erfolgt mit dem Netzadapter; der Versuchsablauf wie unter Variante a beschrieben.

Bemerkung

Bei der Durchführung der Variante a als Schülerexperiment entfällt die Glühlampe 6 V; 5 A.



2.4.3. Messen der elektrischen Arbeit mit einem Kilowattstundenzähler

1. Kilowattstundenzähler (Arbeitsmesser)
2. Netzadapter
3. Uhr mit Sekundenzeiger
4. Glühlampe (220 V; 100 W)
5. Infrarotstrahler u. ä.

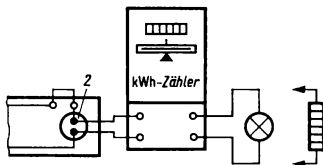
Methodische Hinweise

1. Mit dem Kilowattstundenzähler kann die elektrische Arbeit gemessen werden, ohne daß Rechnungen erforderlich sind.
2. Das Ablesen der Arbeit an den Ziffern des Zählwerkes erfordert eine lange Versuchsdauer. Deshalb zählt man die Anzahl der Umdrehungen der Wirbelstromscheibe. Das Umrechnungsverhältnis, z.B. 800 U/kWh oder 1200 U/kWh, ist auf dem Gehäuse des Zählers angegeben.

Versuch

Der Kilowattstundenzähler wird senkrecht aufgestellt. Die Schaltung erfolgt nach Abbildung 2.4.3./1. Da hierbei mit Netzspannung gearbeitet wird, sind unbedingt

Abb. 2.4.3./1 Messen der elektrischen Arbeit mit einem Kilowattstunden-zähler



die Arbeitsschutzbestimmungen zu beachten. Vor Beginn des Versuchs überprüft man die Funktionstüchtigkeit der Versuchsanordnung und schaltet ab, wenn der rote Strich der Wirbelstromscheibe am Markierungsstrich steht. Man schaltet nacheinander verschiedene Geräte in den Stromkreis und zählt die Anzahl der Umdrehungen in einer bestimmten Zeit. Man kann auch eine Anzahl von Umdrehungen vorgeben und die dazu erforderliche Zeit ermitteln.

Auswertung

Beispiel:

1200 U/kWh;

1 U = 300 W · s

Gerät	Zeit t in s	Anzahl der Umdrehungen	Arbeit W in W · s
Glühlampe, 100 W	60	20	6000
Infrarotstrahler	60	50	15000

Zum Vergleich können zusätzlich Stromstärke- und Spannungsmessungen vorgenommen werden (vgl. V 3.2.2.).

Bemerkung

Der Versuch ist auch als Schüler-Hausversuch geeignet. Der Schüler wird beauftragt, nach dem Ausschalten von dauernd angeschlossenen Geräten (z.B. Kühlschrank) einige Geräte einzuschalten und die Anzahl der Umdrehungen der Wirbelstromscheibe in einer bestimmten Zeit zu ermitteln. Aus den gewonnenen Größen ist dann die verrichtete Arbeit zu errechnen.

2.4.4. Bestätigung der Gleichung für die elektrische Leistung

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Tafelschaltgerät
3. Spannungsmesser (10 V; 25 V)
4. Strommesser (1 A; 2,5 A)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch beruht auf dem Vergleich der Helligkeit von Glühlampen. Er erfordert im Vergleich zu V 2.4.3. nur geringen Zeitaufwand.
2. Vor Versuchsbeginn muß mitgeteilt werden, daß die Leistung von drei Glühlampen gleicher Helligkeit dreimal so groß ist wie die Leistung einer Glühlampe gleicher Helligkeit.

Versuch

Am Tafelschaltgerät wird nach Abbildung 2.4.4./1 eine Parallelschaltung mit drei Glühlampen aufgebaut. Dabei sind gleich die Stützpunkte zum späteren Einsetzen der in Reihe geschalteten Lampen anzubringen. In der Mitte der Tafel wird eine weitere Lampe gleicher Leistungsaufnahme direkt an die Spannungsquelle angeschlossen. Sie dient als Vergleichslampe. Die äußeren Lampen der Parallelschaltung werden so gelockert, daß nur die mittlere Lampe leuchtet. Mit Hilfe des Spannungsteilers werden beide Lampen auf gleiche Helligkeit gebracht. Spannung und Stromstärke werden gemessen und in eine Tabelle eingetragen. Beim Hinzuschalten der weiteren Lampen kommt es durch Belastungsänderung meist zu einer Spannungsänderung, und es muß die ursprüngliche Spannung wieder eingestellt werden. In gleicher Weise wird die Helligkeit von drei in Reihe geschalteten Glühlampen betrachtet. Die Spannung ist beim Einschalten einer weiteren Lampe zu verdoppeln bzw. zu verdreifachen.

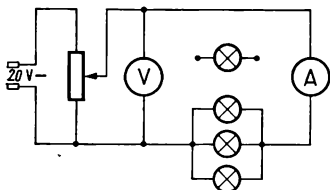


Abb. 2.4.4./1 Schaltung von 3 Glühlampen am Tafelschaltgerät

Beispiel für eine Meßreihe

Anzahl der Lampen	Leistung	Parallelschaltung			Reihenschaltung		
		U in V	I in A	P in W	U in V	I in A	P in W
1	einfach	6	0,4	2,4	6	0,4	2,4
2	doppelt	6	0,8	4,8	12	0,4	4,8
3	dreifach	6	1,2	7,2	18	0,4	7,2



2.4.5. Ermitteln der elektrischen Leistung durch Messen von Spannung und Stromstärke

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Widerstand (50 Ω)
3. Glühlampe (1,8 V; 0,2 A)
4. Glühlampe (6 V; 0,1 A)
5. Glühlampe (6 V; 0,4 A) oder an Stelle von 1. bis 5.
Netzadapter
Glühlampe (220 V; 100 W)
Infrarotstrahler
Stativheizplatte
6. Spannungsmesser
7. Strommesser

Methodischer Hinweis

Mit diesem Versuch wird eine Möglichkeit gezeigt, die auf den Geräten angegebene Leistung zu überprüfen bzw. bei fehlenden Leistungsangaben diese zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, daß die angegebenen Leistungen Toleranzen bis zu 20% haben. Auch tritt bei geringerer Betriebsspannung eine merkliche Leistungsverminderung auf. Beträgt z.B. die Netzspannung nur 210 V (statt 220 V), so sinkt eine Leistung von 1000 W auf etwa 915 W.

Versuch

Die angegebenen Geräte werden in einen einfachen Stromkreis mit Strom- und Spannungsmesser geschaltet. Bei der Arbeit mit Netzspannung sind die Arbeitsschutzbestimmungen zu beachten.

Nacheinander werden bei den einzelnen Geräten Spannung und Stromstärke gemessen. Aus ihnen wird dann jeweils die Leistung berechnet.

Beispiel für eine Meßreihe

	U in V	I in A	P in W		U in V	I in A	P in W
Glühlampe 1	1,8	0,2	0,36	Glühlampe	220	0,45	99
Glühlampe 2	6	3,6	0,6	Heizplatte	220	0,7	154
Glühlampe 3	6	0,4	2,4	Infrarotstrahler	220	1,1	242

Bemerkungen

1. Am Stromversorgungsgerät weichen die Spannungen meist vom Nennwert ab. Zum Vergleich der auf dem Gerät angegebenen Leistungen mit den berechneten müssen die Spannungen genau eingehalten werden. Darum ist ein Spannungsteiler zwischenzuschalten.
2. Bei der Durchführung als Schülerexperiment dürfen nur Geräte für Kleinspannung verwendet werden.

2.4.6. Messen der elektrischen Leistung mit dem Leistungsmesser

1. Leistungsmesser
2. Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V)
3. Netzadapter
4. elektrische Geräte
(siehe Tabelle)

Methodischer Hinweis

Bei Leistungsmessern ist darauf zu achten, daß die Arbeitsspannung etwa im Bereich der Nennspannung der Meßbereiche liegt, da sonst besonders bei induktiven Widerständen beträchtliche Abweichungen vom wirklichen Wert auftreten können. Die vorgegebenen Meßbereiche erfordern eine Auswahl der zu untersuchenden elektrischen Geräte und Meßgeräte.

Der Leistungsmesser *System Bähler* nach Abbildung 2.4.6./1a, b ist für Gleich- und Wechselspannung geeignet und verfügt über die Meßbereiche 25 V; 100 W und 250 V; 1000 W. Eine Glühlampe (220 V; 40 W) ist für dieses Gerät nicht geeignet, weil ihre Leistung im Meßbereich 250 V; 1000 W gemessen werden müßte. Der Zeigerausschlag würde dabei 4 von 100 Skalenteilen betragen. Bei der Güteklasse 2,5 würde der relative Fehler dann etwa 60% betragen.

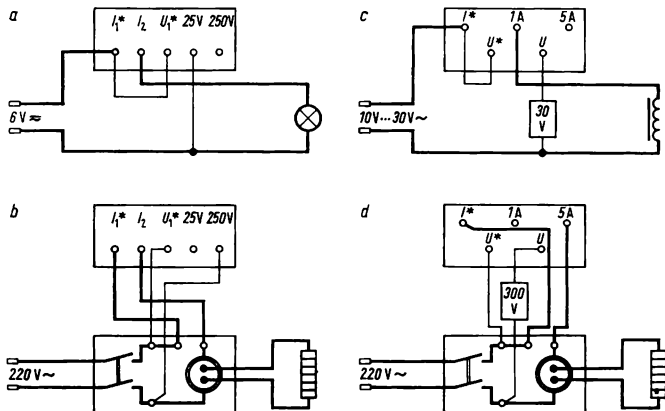


Abb. 2.4.6./1 Schaltung zum Messen der elektrischen Leistung, a) und b) mit dem Leistungsmesser „System Bähler“, c) und d) mit dem Leistungsmesser „Import UdSSR“

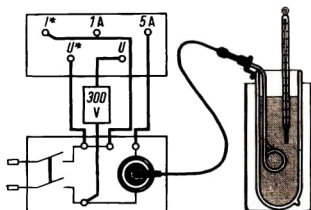
Der Leistungsmesser *Import UdSSR* nach Abbildung 2.4.6./1c, d ist nur für Wechselspannung geeignet und verfügt über sechs Meßbereiche, die durch drei Vorwiderstände und zwei Wahlbuchsen für unterschiedliche Stromstärken erreicht werden. Für jeden Meßbereich ist eine Einsteckskale vorhanden. Die genannte Glühlampe könnte mit diesem Leistungsmesser gerade noch untersucht werden. Besser geeignet ist eine solche von 100 W oder 200 W.

Betriebsspannung	Meßbereiche	
	bei 1 A	bei 5 A
30 V	30 W	150 W
150 V	150 W	750 W
300 V	300 W	1500 W

Versuch

Vorstehend sind vier Schaltungen schematisch dargestellt. Es ist immer zuerst der Strompfad zu schalten. Die Verbindung I_1^* , U_1^* bzw. I^* , U^* ist nicht im Meßgerät vorhanden, sie muß im äußeren Teil der Schaltung vorgenommen werden.

Abb. 2.4.6./2 Beispiel der Schaltung des Tauchsieders

**Beispiel für eine Meßreihe**

elektrisches Gerät	Meßbereich			gemessen
	U in V	I in A	P in W	P in W
Glühlampe (6 V; 5 A)	25	—	100	30
Heizplatte (220 V; 500 W)	250	—	1000	480
Drosselspule aus Aufbauteilen	30	1	30	24
Tauchsieder (220 V; 1000 W)	300	5	1500	970

Die erhaltenen Meßwerte können mit den Leistungsangaben auf dem Gerät oder — sofern es sich nicht um induktive Widerstände handelt (Drosselspule) — mit den nach V 2.4.5. ermittelten Werten verglichen werden.



2.4.7. Bestimmen des Wirkungsgrades bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Heizwendel mit Halter
3. Strommesser (2,5 A)
4. Spannungsmesser (10-V)
5. Stoppuhr
6. Bechergläser ineinanderpassend mit Kalorimeterdeckel
7. Thermometer (100 °C)

Zu Variante b

- Geräte bis 5. bis 7., außerdem
8. Netzadapter
 9. Tauchsieder
 10. Strommesser (5 A)
 11. Spannungsmesser (250 V)

Methodischer Hinweis

Bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie wird mit einem Tauchsieder ein verhältnismäßig großer Wirkungsgrad erreicht. Dementsprechend sollte auch das Versuchsergebnis sein. Deshalb ist besonders zu beachten, daß der Wärmeaustausch mit der Umgebung gering bleibt und daß die Masse des Gefäßes im Verhältnis zur Wassermasse klein ist, da sonst durch die große Wärmekapazität des Gefäßes der Wirkungsgrad wesentlich geringer wird.

Variante a

Das Gefäß wird zu etwa zwei Drittel mit Wasser gefüllt. Aufbau und Schaltung des Versuchs erfolgen nach Abbildung 2.4.1./1. Der Stromkreis wird für eine vorgegebene Zeit geschlossen. Dabei werden Stromstärke und Spannung gemessen. Nach dem Ausschalten wird die Temperaturdifferenz ermittelt. Alle Werte werden in einer Tabelle erfaßt.

Variante b

Die Schaltung erfolgt unter Verwendung des Netzadapters, der Versuchsablauf wie unter Variante a beschrieben.

Beispiel für eine Meßreihe

Gerät	Elektrische Energie				Wärmeenergie			Wirkungsgrad η
	U in V	I in A	t in s	W in W · s	m in g	$\Delta\theta$ in K	W in W · s	
Heizwendel	10	2,5	200	5000	80	13	4360	0,87
Tauchsieder 300 W	220	1,4	100	30800	300	21	26400	0,86
Tauchsieder 1000 W	220	4,5	100	99000	500	41	85900	0,87

Bemerkung

Die Variante a ist auch als Schülerexperiment geeignet.



2.4.8. Bestimmen des Wirkungsgrades eines Elektromotors

1. Netzadapter
2. Experimentiermotor
3. Leistungsmesser (300 V; 1 A; 300 W)
4. Stoppuhr
5. Wägestück (5 kg)
6. Maßstab (1 m)

Methodische Hinweise

1. Der Versuchsaufbau ist einfach. Die Auswertung erfordert durch die Beziehung $1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ wenig Zeit.
2. Zur Begründung des verhältnismäßig geringen Wirkungsgrades ist vor allem auf die beträchtliche Erwärmung des Motors hinzuweisen.

Versuch

Man befestigt den Motor mit einer Tischklemme nach Abbildung 2.4.8./1 fest am Experimentiertisch, so daß er sich etwa 1,3 m über dem Fußboden befindet. In das Bohrfutter des Motors spannt man einen kurzen Stativstab und klemmt dabei

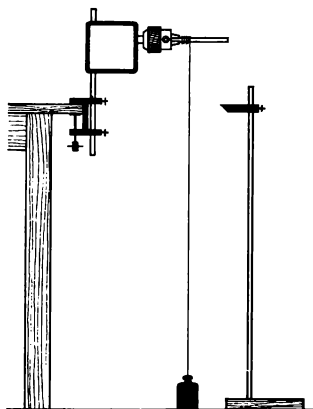


Abb. 2.4.8./1 Versuchsaufbau zum Heben eines Körpers mit dem Universalexperimentiermotor

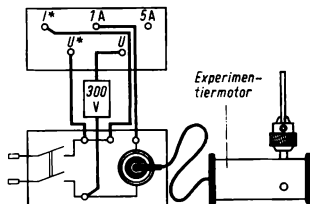


Abb. 2.4.8./2 Anschluß des Experimentiermotors und des Leistungsmessers an das Netzanschlußgerät

eine Schnur von etwa 2 m Länge mit ein, an der das Wägestück festgebunden wird. Die Schaltung des Leistungsmessers erfolgt mit Hilfe des Netzadapter (Abb. 2.4.8./2).

Setzt man den Motor in Betrieb, so wickelt sich die Schnur um die Welle, und das Wägestück wird gehoben. Man läßt den Motor mit unterschiedlichen Drehzahlen laufen und hebt dabei das Wägestück jedes Mal einen Meter hoch. Dabei werden die Leistungsaufnahme des Motors und die Zeit gemessen.

Beispiel für eine Meßreihe

Aufgenommene elektrische Arbeit			verrichtete mechanische Arbeit			
P in W	t in s	W in W · s	F in N	s in m	W in N · m	η
40	9	360	50	1	50	0,14
20	19	380	50	1	50	0,13
10	35	350	50	1	50	0,14

Bemerkung

Der Versuch kann auch mit anderen Motorentypen durchgeführt werden. Nach Möglichkeit sollte jedoch ein Rädervorgelege zur Herabsetzung der Drehzahl davorgesetzt werden. Das Wägestück sollte so bemessen sein, daß der Motor stark belastet wird.

3. Gesetze im elektrischen Stromkreis

3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. Zur Durchführung der meisten Versuche dieses Kapitels sind das Tafelschaltgerät zur Vertikaldemonstration und das SEG Elektrik erforderlich. Für die Versuche in Flüssigkeiten werden Kohleelektroden, Salzlösungen und Glasgefäße benötigt. Einige kleine Selbstbauteile sind in den Versuchsbeschreibungen angegeben. Nur der Versuch V 3.1.5. muß mit Netzspannung ausgeführt werden. Alle anderen Versuche erfordern nur Kleinspannungen und können, wenn es methodisch zweckmäßig erscheint, von Schülern durchgeführt werden.

3.0.1. Im Abschnitt 3.1. sind die Versuche zusammengefaßt, die der Einführung der physikalischen Größe elektrischer Widerstand, dem Nachweis der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes und der Behandlung des Ohmschen Gesetzes dienen, weil sie in engem Zusammenhang stehen. Für die Behandlung im Unterricht sind zwei methodische Wege möglich. Man macht die Schüler in beiden Fällen zunächst damit vertraut, daß durch verschiedene Leiter bei gleicher Spannung Ströme mit unterschiedlichen Stromstärken fließen. Jeder Leiter muß also eine innere Eigenschaft besitzen, die als Widerstand bezeichnet wird. V 3.1.1. erfüllt diese Aufgabe. Den Schülern wird danach die Definitionsgleichung für die Größe elektrischer

Widerstand gegeben, $R = \frac{U}{I}$. Im Versuch V 3.1.2. werden Meßreihen von Spannungen und Stromstärken an verschiedenen Leitern aufgenommen, um die Zweckmäßigkeit der Widerstandsdefinition plausibel zu machen. Das ist besonders mit Hilfe solcher Leiter möglich, deren Widerstand annähernd konstant bleibt. Die

Bedeutung der Gleichung $R = \frac{U}{I}$ als Definitionsgleichung für die Größe Widerstand kann man den Schülern aber gerade an Widerständen klarmachen, die sich mit der Temperatur verändern, denn ein Leiter hat bei jeder Temperatur einen bestimmten Widerstand. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes wird dann genauer in den folgenden Versuchen für Metalle und Halbleiter untersucht. Mit V 3.1.6. greift man auf die Vorversuche mit konstanten Widerständen zurück und zeigt, daß an konstanten Widerständen ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen Spannung, Stromstärke und Widerstand besteht, das Ohmsche Gesetz, $I \sim U$. Als konstante Widerstände kann man Widerstände aus entsprechenden Legierungen (Konstantan, Nickelin) betrachten oder jeden metallischen Leiter, der von Strömen so kleiner Stromstärke durchflossen wird, daß sich seine Temperatur praktisch nicht ändert. Damit wird der Gültigkeitsbereich des Ohmschen Gesetzes festgelegt. Mit den Teilversuchen im V 3.1.6. sollen die Anwendungsmöglichkeiten des Ohmschen Gesetzes weiter vertieft werden, indem bei konstantem spezifischem Widerstand ($R = \text{konst.}$) der Widerstand unterschiedlich gewählt und die Ab-

hängigkeit der Stromstärke und der Spannung vom Widerstand untersucht wird. Der andere methodische Weg ergibt sich, indem man sich im V 3.1.2. auf die Teilversuche mit konstanten Widerständen orientiert und danach mit V 3.1.6. das Ohmsche Gesetz entwickelt und erläutert. Anschließend untersucht man dann seinen Gültigkeitsbereich mit temperaturabhängigen Widerständen nach V 3.1.2. bis 3.1.5.

3.0.2. Durch die Versuche des Abschnitts 3.2. wird die Abhängigkeit des Widerstandes von den Abmessungen und von dem Stoff der Leiter untersucht. Wenn das Widerstandsgesetz vor der Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen behandelt wird, kann man mit V 3.2.1. und 3.2.2. die Abhängigkeit von Länge und Querschnitt nur induktiv herleiten und das Teilchenmodell der Metallbindung zur Erläuterung heranziehen. Mit diesem Modell kann man auch Erläuterungen zu V 3.2.3. über die Abhängigkeit vom Stoff geben, aus dem die Leiter bestehen. Die Bestimmung spezifischer Widerstände im V 3.2.4. dient der Zusammenfassung zum Widerstandsgesetz und kann auch bei Wiederholungen und im Praktikum eingesetzt werden. Die Temperaturabhängigkeit der Widerstände kann man nach der Bemerkung 2 zu V 3.2.4. wiederholen und begründen, indem man nachweist, daß sie auf der Änderung des spezifischen Widerstandes beruht. Dazu kann wieder das Teilchenmodell metallischer Leiter herangezogen werden.

Ein anderer methodisch günstiger Weg ist es, nach der Einführung des Widerstandes und des Ohmschen Gesetzes mit Hilfe der Versuche aus den Abschnitten 4.1. und 4.2. zuerst die Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen zu erklären und dann die Abhängigkeit von Länge und Querschnitt deduktiv herzuleiten und mit V 3.2.1. und 3.2.2. zu bestätigen.

Mit V 3.2.5. werden die Abhängigkeitsbeziehungen des Widerstandes in Flüssigkeiten demonstriert. Durch diese zu den Versuchen mit metallischen Leitern analogen Versuche kann man im Unterricht eine wesentliche Festigung der Kenntnisse erreichen.

3.0.3. Im Abschnitt 3.3. sind alle Versuche zusammengefaßt, die der Bestimmung von Widerständen dienen, obwohl sie im Unterricht nicht unbedingt geschlossen hintereinander durchgeführt werden sollen. Sie setzen verschiedene Stufen der Kenntnisse über den elektrischen Widerstand voraus. V 3.3.1. und 3.3.6. erfordern nur die Kenntnis der Definitionsgleichung, 3.3.2. aber die des Ohmschen Gesetzes. Für die in den Versuchen 3.3.2. bis 3.3.5. beschriebenen Verfahren sind die Kenntnisse über den unverzweigten und verzweigten Stromkreis nach den Abschnitten 4.1. und 4.2. notwendig. So ist es zweckmäßig, diese Versuche nach dem erreichten Kenntnisstand der Schüler im Unterricht einzusetzen. Es ist aber auch denkbar, eine Gesamtwiederholung der Gesetze im elektrischen Stromkreis auf der Grundlage einer vergleichenden Betrachtung der verschiedenen Methoden zur Widerstandsbestimmung durchzuführen.

3.1. Der elektrische Widerstand und das Ohmsche Gesetz

3.1.1. Nachweis der Widerstandseigenschaft [SE]

- | | |
|---|--|
| 1. Stromversorgungsgerät (10 V —) | 6. Heizwendel |
| 2. Gleitwiderstand oder Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W) | 7. Widerstände (verschiedene Werte) |
| 3. Spannungsmesser (10 V —) | 8. Becherglas |
| 4. Strommesser (100 mA ... 2,5 A) | 9. Elektrodenhalter |
| 5. Glühlampen (6 V, verschiedene Leistungen) | 10. 2 Kohleelektroden |
| | 11. konzentrierte Natriumchloridlösung |

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient der Einführung der Größe elektrischer Widerstand. Er soll dem Schüler zeigen, daß in verschiedenen elektrischen Leitern bei gleicher Ursache (Spannung) unterschiedliche Wirkungen (Stromstärken) auftreten. Daraus ist zu schließen, daß die Leiter eine Eigenschaft besitzen, die man elektrischen Widerstand nennt, und daß es notwendig ist, eine physikalische Größe zur Messung dieser Eigenschaft der Leiter einzuführen.

Versuch

Der Versuch wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.1./1 als Demonstrationsversuch auf dem Tafelschaltgerät (Abb. 3.1.1./3) oder als Schülerexperiment mit

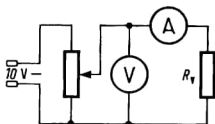


Abb. 3.1.1./1 Schaltplan zum Nachweis des Widerstandes eines Leiters

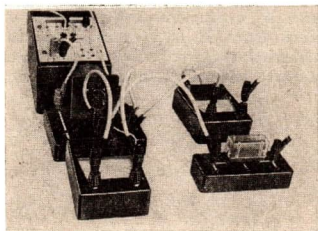


Abb. 3.1.1./2 Versuchsaufbau mit dem SEG Elektrik

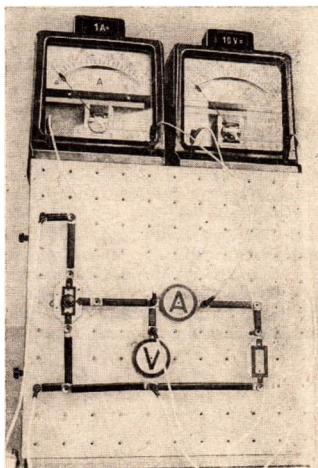


Abb. 3.1.1./3 Versuchsaufbau auf dem Tafelschaltgerät

Teilen des SEG Elektrik (Abb. 3.1.1./2) aufgebaut. Der Einstellwiderstand wird als Spannungsteiler geschaltet und vor jedem Teilversuch so eingestellt, daß am Versuchswiderstand keine Spannung liegt. In den einzelnen Teilversuchen werden als Versuchswiderstand verschiedene Glühlampen (6 V), verschiedene Widerstände und ein Becherglas mit zwei Elektroden und Leitungswasser eingesetzt. Den Widerstand der Flüssigkeit setzt man stufenweise herab, indem man jeweils etwas von der konzentrierten Natriumchloridlösung hinzugibt. In jedem Teilversuch stellt man die Spannung auf 6 V ein und mißt jeweils die Stromstärke. Die Meßbereiche des Strommessers sind den Versuchswiderständen entsprechend zu wählen. Die Versuchsergebnisse werden in einer Tabelle erfaßt.

Beispiel für eine Meßreihe

Leiter	U in V	I in A	Reihenfolge der Widerstände vom kleinsten zum größten
Glühlampe 1	6	0,36	6.
Glühlampe 2	6	0,10	8.
Glühlampe 3	6	0,80	3.
Heizwendel 1	6	0,66	4.
Heizwendel 2	6	1,40	1.
Drahtwicklung 1	6	0,65	5.
Drahtwicklung 2	6	1,20	2.
Natriumchloridlösung 1	6	0,076	9.
Natriumchloridlösung 2	6	0,12	7.
Leitungswasser	6	0,0068	10.

3.1.2. Vergleich von Widerständen

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (10 V —) | 6. Heizwendel |
| 2. Gleitwiderstand oder Drehwiderstand
(50 Ω ; 25 W) | 7. Widerstand (100 Ω) |
| 3. Spannungsmesser (10 V) | 8. Becherglas |
| 4. Strommesser (100 mA; 500 mA) | 9. 2 Elektrodenhalter |
| 5. Glühlampe (6 V; 2 W) | 10. 2 Kohleelektroden |
| | 11. Natriumchloridlösung |

Methodischer Hinweis

- Nach der Einführung des Widerstandes als Eigenschaft der Leiter mit V 3.1.1. soll dieser Versuch zeigen, daß es zweckmäßig ist, die Größe elektrischer Widerstand als Quotient $\frac{U}{I}$ zu definieren, weil dieser Quotient bei einigen Versuchswiderständen bei veränderlicher Spannung und Stromstärke annähernd konstant bleibt.
- Daß dieser Widerstand bei einigen Versuchswiderständen, z.B. Glühlampe, nicht konstant bleibt, kann zur Motivation für die Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur (V 3.1.3. bis 3.1.5.) benutzt werden. Man kann daraus die Problemstellung entwickeln, worin die Ursache dafür zu suchen ist.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt wie im V 3.1.1. (Abb. 3.1.1./1). Man führt wieder Teilversuche mit verschiedenen Widerständen durch (Glühlampe, Heizwendel, Widerstand, Elektrolytlösung). Für jeden dieser Widerstände wird in einer Meßreihe Spannung und Stromstärke aufgenommen, indem man die Spannung stufenweise um 1 V von 1 V bis 6 V vergrößert. In den Meßtabellen wird jeweils der Quotient $\frac{U}{I}$ berechnet.

Beispiele für Meßreihen

Widerstand (100 Ω)		
U in V	I in A	$\frac{U}{I}$ in Ω
1	0,0105	95
2	0,0215	93
3	0,0320	94
4	0,0420	95
5	0,0530	94
6	0,0640	94

Glühlampe (6 V; 2 W)		
U in V	I in A	$\frac{U}{I}$ in Ω
1	0,140	7,1
2	0,210	9,5
3	0,265	11,3
4	0,310	12,9
5	0,350	14,3
6	0,390	15,4

3.1.3. Abhängigkeit des Widerstandes metallischer Leiter von der Temperatur [SE]

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (2 V —)
2. Drahtwendel aus Eisendraht und Konstantdraht (\varnothing 0,2 mm; 400 mm lang)
3. Strommesser (5 A)
4. Bunsenbrenner

Zu Variante b

5. Stromversorgungsgerät (1 V; 14 V —)
6. Glühlampe (14 V; 3 W)
7. Spannungsmesser (1 V; 20 V)
8. Strommesser (500 mA)

Zu Variante c

- | | |
|--|---------------------------|
| 9. Stromversorgungsgerät (1 V —) | 12. Strommesser (500 mA) |
| 10. Eisendraht und Konstantdraht
(\varnothing 0,3 mm; 1 m lang) auf Porzellankörper
(SEG-Teil ohne Schutzkappe) | 13. Spannungsmesser (1 V) |
| 11. Schaltbrett aus Hartpapier ⑤ | 14. Becherglas |
| | 15. Maschinenöl (50 ml) |
| | 16. Stativheizplatte |
| | 17. Thermometer |

Methodische Hinweise

1. Die Versuche können entweder vor einer Erläuterung der Widerstandsvergrößerung mit Hilfe des Teilchenmodells der Metallbindung oder auch danach durchgeführt werden.
2. Die Varianten a und b zeigen die Widerstandsänderung qualitativ, Variante a mit einer Erwärmung von außen, Variante b mit einer Erwärmung durch den elektrischen Strom. Die Variante c ermöglicht es, den funktionalen Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand quantitativ zu erfassen. Sie ist als Praktikumsversuch geeignet.

Variante a

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 3.1.3./1. Zunächst mißt man die Stromstärke bei kalter Drahtwendel. Dann zündet man die Gasflamme an und erkennt an der abnehmenden Stromstärke, daß der Widerstand größer wird.

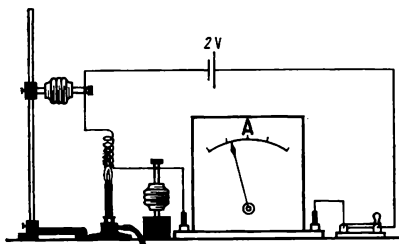


Abb. 3.1.3./1 Versuchsaufbau zum Ermitteln der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes einer Drahtwendel

Variante b

Aus Spannungs- und Stromstärkemessungen wird der Widerstand bei verschiedenen Temperaturen der Glühlampenwendel berechnet. Die Temperaturen sind dabei nicht meßbar. Nur durch Vergleichen der Helligkeit sind Temperaturänderungen erkennbar. Vergleicht man den Widerstand bei sehr geringer Stromstärke, die die Glühlampe kaum erwärmt, mit dem Widerstand im Betriebszustand der Glühlampe (14 V), so ist er etwa auf den 10fachen Betrag angewachsen.

Variante c

Der Versuch wird nach Abbildung 3.1.3./2 aufgebaut. Dazu ist nach Abbildung 3.1.3./3 aus Hartpapier ein Schaltbrett zu fertigen. Wegen der kleinen Versuchswiderstände muß der Spannungsmesser für spannungsrichtige Messung eingesetzt werden. Man mißt Spannung und Stromstärke jeweils, wenn die Temperatur um 5 °C gestiegen ist. Im Schülerexperiment läßt man die Heizplatte bei 60 °C abschalten. Die Temperatur steigt durch die Wärmekapazität der Platte noch weiter bis auf etwa 70 °C. Im Demonstrationsversuch kann man mit Temperaturschritten von 10 °C arbeiten und das Öl bis auf 100 °C erwärmen. Bei höheren Temperaturen wirkt die Qualmentwicklung störend. Die Meßergebnisse werden in Tabellen erfaßt. Danach wird ein Diagramm (Abb. 3.1.3./4) gezeichnet.

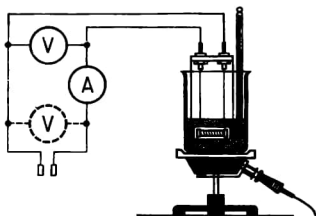


Abb. 3.1.3./2 Versuchsaufbau zum Ermitteln der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes einer Heizwendel

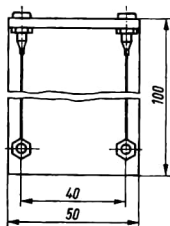


Abb. 3.1.3./3 Schaltbrett

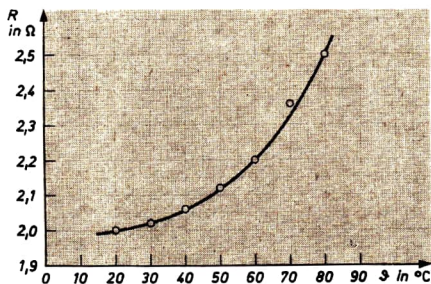


Abb. 3.1.3./4 Widerstand-Temperatur-Diagramm eines Eisendrahtes

Beispiel für eine Meßreihe

θ in $^{\circ}\text{C}$	U in V	I in A	R in Ω
20	0,440	0,220	2,00
30	0,441	0,218	2,02
40	0,445	0,216	2,06
50	0,452	0,213	2,12
60	0,463	0,210	2,20
70	0,485	0,205	2,36
80	0,500	0,200	2,50

3.1.4. Abhängigkeit des Widerstandes von Halbleitern von der Temperatur [SE]

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Bleistiftmine
3. Strommesser (5 A)
4. Bunsenbrenner

Zu Variante b

Gerät 1., außerdem

- | | |
|---|-------------------------|
| 5. Halbleiterwiderstand | 9. Becherglas |
| 6. Schaltbrett aus Hartpapier nach V 3.1.3. ⑧ | 10. Maschinenöl (50 ml) |
| 7. Spannungsmesser (10 V) | 11. Stativheizplatte |
| 8. Strommesser (10 mA) | 12. Thermometer |

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sollen das Verhalten von Halbleitern deutlich werden lassen, das dem Verhalten der Metalle entgegengesetzt ist.
2. Variante a kann bei der Einführung des Begriffs Halbleiter benutzt werden. Hier werden die Vorgänge qualitativ betrachtet.
3. Variante b ergibt quantitative Ergebnisse und ist als Praktikumsversuch geeignet.

Variante a

Eine lange Bleistiftmine wird zwischen zwei Fußklemmen eingespannt (Abb. 3.1.4./1) und nach Abbildung 3.1.1./1 in einen Stromkreis geschaltet. Erwärmt man die Bleistiftmine mit der Flamme des Bunsenbrenners, so wird die Stromstärke mit wachsender Temperatur größer. Der Widerstand wird durch die Freisetzung von Ladungsträgern kleiner, Graphit ist ein Halbleiter.

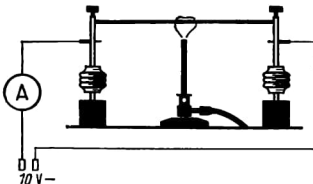


Abb. 3.1.4./1 Versuchsaufbau zum Ermitteln der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes einer Bleistiftmine

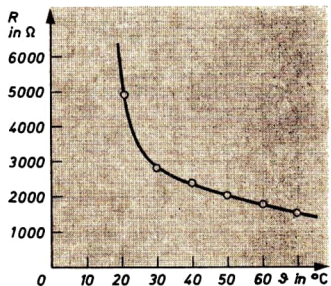


Abb. 3.1.4./2 Widerstand-Temperatur-Diagramm eines Halbleiters

Variante b

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 3.1.3./2. Da der Heißeiter einen großen Widerstand hat, ist der Spannungsmesser für eine stromrichtige Messung zu schalten (gestrichelt eingezeichnet). Die Versuchsdurchführung und die Auswertung entsprechen V 3.1.3., Variante c.

Beispiel für eine Meßreihe

ϑ in °C	U in V	I in mA	R in Ω
20	8,4	1,7	4900
30	8,4	3,0	2800
40	8,4	3,5	2400
50	8,4	4,2	2000
60	8,4	4,7	1800
70	8,4	5,3	1600

Bemerkungen

1. In Variante a kann man anstelle des Strommessers eine Glühlampe (6 V; 5 A) verwenden, die durch ihre wachsende Helligkeit die größer werdende Stromstärke anzeigt.
2. Falls eine Kohlenfadenlampe zur Verfügung steht, kann man auch einen Versuch entsprechend V 3.1.3. b ausführen. Der Widerstand der Kohlefadenlampe sinkt zwischen dem kalten Zustand und dem Betriebszustand mit der Netzspannung der Lampe etwa auf den halben Betrag.
3. Die Variante b eignet sich als Modell eines elektronischen Temperaturfühlers, indem man die Skale des Strommessers mit Papier abdeckt und darauf eine Temperaturskala anfertigt, auf der man die Zeigerstellungen in Abständen von 5 °C markiert.



3.1.5. Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Glas

1. 2 lange dünne Nägel
2. Glasröhrchen (\varnothing 5 mm; 7 cm lang)
3. Bunsenbrenner
4. Glühlampe (220 V; 100 W)
5. Schale mit Sand

Methodischer Hinweis

Es soll gezeigt werden, daß auch ein Isolator bei hohen Temperaturen zu einem Leiter werden kann. Das ruft bei den Schülern Überraschung hervor. Man sollte bei der Auswertung aber nicht versäumen, darauf hinzuweisen, daß hier ein Beispiel vorliegt, wie die Eigenschaften der Stoffe von den äußeren Bedingungen abhängen.

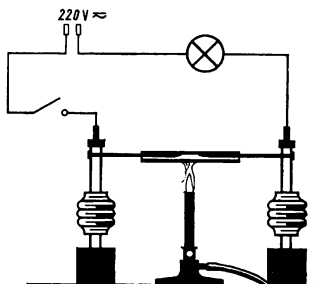


Abb. 3.1.5./1 Nachweis der Leitfähigkeit von Glas bei hoher Temperatur

Versuch

In zwei Fußklemmen spannt man nach Abbildung 3.1.5./1 die beiden Nägel ein und schiebt das Glasröhrchen darüber. Der Abstand der Nagelspitzen beträgt etwa 5 mm...7 mm. Diese Anordnung schaltet man in dem Stromkreis mit der Glühlampe in Reihe. Die Lampe leuchtet nicht, weil das Glas isoliert. Erhitzt man das Glas mit der Bunsenflamme bis zur Rotglut, so fließt ein Strom mit wachsender Stromstärke, und die Glühlampe beginnt zu leuchten. Nun kann man den Brenner entfernen. Der Strom erzeugt in dem Glas so viel Wärme, daß es weiter glühend bleibt. Zur Sicherheit gegen eventuell herabtropfendes Glas stellt man eine flache Schale mit Sand darunter.

Bemerkung

Die Glühlampe kann man durch einen Strommesser (5 A) mit einem Gleitwiderstand (22 Ω ; 5 A) als Vorwiderstand ersetzen, um die langsam anwachsende Stromstärke zu beobachten. Um größere Stromstärken zu erreichen, durch die das Glas auf jeden Fall schmilzt, muß man den Widerstand kleiner einstellen.

3.1.6. Spannung und Stromstärke an konstanten Widerständen — Das Ohmsche Gesetz [SE]

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Widerstand (1 k Ω)
3. Strommesser (100 mA; 500 mA)
4. Spannungsmesser (10 V)

Zu Versuch 2 und 3

Geräte 1., 3. und 4., außerdem

5. Dekadenwiderstand (10 \times 1000 Ω) oder 5 Widerstände (1 k Ω)
6. Gleitwiderstand oder Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)

Methodische Hinweise

1. Obgleich der Versuch 1 im Aufbau und in der Durchführung V 3.1.1. und 3.1.2 nahezu gleich ist, bestehen wesentliche Unterschiede in der Zielsetzung. Während dort die Widerstandseigenschaft und die Größe Widerstand eingeführt werden, wird hier der konstante Widerstand vorausgesetzt und der gesetzmäßige funktionale Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke — das Ohmsche Gesetz — experimentell bestätigt.
2. In den Versuchen 2 und 3 wird das Ohmsche Gesetz unter den Bedingungen konstanter Spannung bzw. Stromstärke bei veränderlichen Widerständen mit konstantem spezifischen Widerstand untersucht. Damit werden seine Bedeutung und seine Anwendungsmöglichkeiten demonstriert.

Vorbemerkung

In allen Teilversuchen arbeitet man am besten mit großen Widerständen und kleinen Stromstärken, damit die Temperatur der Widerstände sich nicht wesentlich ändert.

Versuch 1: Bestätigung des Ohmschen Gesetzes

Der Versuch kann nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.6./1 auf dem Tafelschaltgerät oder mit Teilen des SEG Elektrik aufgebaut werden. Man mißt bei den verschiedenen Spannungsstufen des Stromversorgungsgerätes jeweils Spannung und Stromstärke, in der Meßtabelle berechnet man den Quotienten $\frac{U}{I}$. Er ist nahezu

konstant. Daraus folgt: An einem konstanten Widerstand ist die Stromstärke der Spannung proportional. Da man aus einer Versuchsreihe nicht auf die Allgemeingültigkeit einer Aussage schließen kann, wiederholt man den Versuch mit anderen Widerständen.

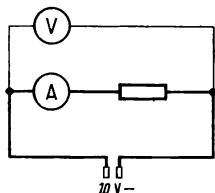


Abb. 3.1.6./1 Schaltplan zur Bestätigung des Ohmschen Gesetzes

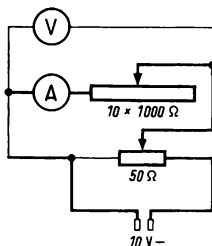


Abb. 3.1.6./2 Nachweis der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes bei konstanter Spannung

Versuch 2: Das Ohmsche Gesetz bei konstanter Spannung

Im Schaltplan (Abb. 3.1.6./2) ist der Aufbau gezeigt. Als Versuchswiderstand benutzt man einen Dekadenwiderstand, den man stufenweise von 1 kΩ bis 10 kΩ verändern kann, oder man schaltet an seiner Stelle Widerstände (1 kΩ) von 1 kΩ

bis 5 k Ω in Reihe. Mit Hilfe des Spannungsteilers hält man die Spannung für alle Widerstandsstufen konstant und mißt jeweils die Stromstärke, nach dem man den Spannungsmesser ausgeschaltet hat, um Fehler durch den Gerätestrom zu vermeiden. In der Meßtabelle berechnet man jeweils das Produkt aus Stromstärke und Widerstand. Da es nahezu konstant ist, kann man folgern, daß die Stromstärke bei konstanter Temperatur und Spannung dem Widerstand umgekehrt proportional ist.

Beispiel für eine Meßreihe

R in k Ω	I in mA	$I \cdot R$ in V
1,0	10	10
2,0	5,0	10
3,0	3,3	9,9
4,0	2,5	10
5,0	2,0	10

Versuch 3: Das Ohmsche Gesetz bei konstanter Stromstärke

Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie zu Versuch 2. Man stellt aber bei der Durchführung für die verschiedenen Widerstandsstufen die gleiche Stromstärke ein und mißt jeweils die am Widerstand auftretende Spannung. In einer Meßtabelle berechnet man den Quotienten aus Spannung und Widerstand. Weil er nahezu konstant ist, kann man erkennen, daß bei konstanter Temperatur und Stromstärke die Spannung dem Widerstand proportional ist.

3.2. Das Widerstandsgesetz

3.2.1. Die Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters von seiner Länge

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω)
3. Konstantendraht (\varnothing 0,2 mm; 3 m lang)
4. 2 Fußklemmen
5. Spannungsmesser (10 V)
6. Strommesser (0,5 A)
7. Meterstab

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll als Demonstrationsversuch ausgeführt werden. Die veränderliche Länge wird den Schülern durch den lang ausgespannten Widerstandsdraht deutlich sichtbar gezeigt.

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.2.1./1. Der Widerstandsdraht wird zwischen zwei Fußklemmen ausgespannt. Er liegt im Stromkreis in Reihe mit dem Strommesser, einem Vorwiderstand und der Spannungsquelle. Der

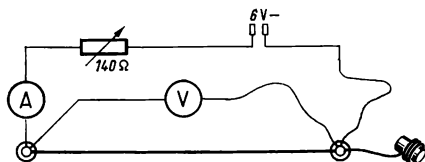


Abb. 3.2.1./1
Nachweis der Abhängigkeit
des Widerstandes von der
Länge eines Leiters

Spannungsmesser ist parallel zum Widerstandsdraht geschaltet. Für verschiedene Längen des Widerstandsdrahtes soll aus den gemessenen Stromstärken und Spannungen der Widerstand bestimmt werden. Um dabei die Temperatur annähernd konstant zu halten, wird empfohlen, durch den Vorwiderstand bei den verschiedenen Längen des Widerstandsdrahtes eine konstante Stromstärke von etwa 0,1 A einzustellen. Das jeweils frei hängende Ende des Widerstandsdrahtes wickelt man am besten auf einen Spulenkörper. Die Meßergebnisse trägt man in eine Tabelle ein und errechnet die Widerstände und die Quotienten $\frac{R}{l}$. Diese sind nahezu konstant und lassen so erkennen, daß der Widerstand der Länge proportional ist.

Beispiel für eine Meßreihe

l in m	I in A	U in V	R in Ω	$\frac{R}{l}$ in $\frac{\Omega}{m}$
0,5	0,1	0,8	8	16
1,0	0,1	1,6	16	16
1,5	0,1	2,4	24	16
2,0	0,1	3,2	32	16
2,5	0,1	4,0	40	16
3,0	0,1	4,8	48	16

Bemerkung

Als Schülerexperiment kann man den Versuch durchführen lassen, indem man an Stelle des langen Widerstandsdrahtes zunächst einen Konstantandraht (\varnothing 0,3 mm; 1 m lang; 8 Ω) verwendet und dann zwei, drei und mehr Drähte in Reihe schaltet.

3.2.2. Die Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters vom Querschnitt

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω)
3. Konstantandrahte (1 m lang; verschiedene Durchmesser)
4. 2 Fußklemmen
5. Feinmeßschraube
6. Spannungsmesser (10 V)
7. Strommesser (0,5 A)
8. Meterstab

Methodischer Hinweis

Da man kaum mehr als drei Konstantandrähte verschiedenen Querschnitts zur Verfügung hat, kann man aus den wenigen Messungen die umgekehrte Proportionalität nicht herleiten, sondern nur bestätigen. Man kann die Verhältnisse für die Schüler anschaulicher machen, wenn man erläutert, daß in einem Leiter größere Querschnitte mehrere Strombahnen ergeben; der Widerstand wird so im umgekehrten Verhältnis zum Flächeninhalt der Querschnittsfläche kleiner.

Versuch

Der Versuch wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.2.2./1 aufgebaut. Die Widerstandsdrähte verschiedenen Querschnitts werden nacheinander mit gleicher Länge von 1 m zwischen den Fußklemmen ausgespannt. Ihr Durchmesser wird mit der Feinmeßschraube gemessen. Man mißt Spannung und Stromstärke. Damit die Temperatur etwa konstant bleibt, muß die Stromstärke in dünneren Drähten möglichst klein gehalten werden. Das erreicht man, indem man in den Teilversuchen mit der gleichen Spannung arbeitet, die man mit dem Spannungsteiler einstellt. Die Meßergebnisse trägt man in die Tabelle ein und errechnet den Flächeninhalt der Querschnittsfläche A , den Widerstand R und das Produkt $R \cdot A$. Es ist nahezu konstant und bestätigt die umgekehrte Proportionalität zwischen Widerstand und Flächeninhalt.

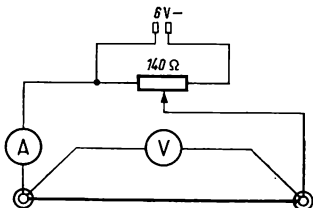


Abb. 3.2.2./1 Nachweis der Abhängigkeit des Widerstandes vom Querschnitt eines Leiters

Beispiel für eine Meßreihe

d in mm	A in mm ²	U in V	I in A	R in Ω	$R \cdot A$ in $\Omega \cdot \text{mm}^2$
0,1	0,0078	4,0	0,12	33	0,26
0,2	0,031	4,0	0,47	8,5	0,26
0,3	0,071	4,0	1,1	3,7	0,26

3.2.3. Die Abhängigkeit des Widerstandes vom Stoff

1. Stromversorgungsgerät (2 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω) oder Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
3. Drähte (\varnothing 0,3 mm; 1 m lang aus Kupfer, Eisen und Konstantan)
4. Spannungsmesser (5 V; 1 V)
5. Strommesser (1 A; 500 mA)
6. Meterstab

Methodische Hinweise

1. Der Versuch schließt sich an V 3.2.1. und 3.2.2. an und zeigt, daß verschiedene Stoffe bei gleicher Länge und gleichem Querschnitt verschieden große Widerstände haben. Man kann die Vermutung aussprechen, daß Stoffkonstanten die verschiedenen Widerstände bestimmen. Diese Stoffkonstanten können mit V 3.2.4. ermittelt werden.
2. Man kann aber auch aus V 3.2.1. und 3.2.2. deduktiv herleiten, daß ein stoffabhängiger Proportionalitätsfaktor zwischen dem Widerstand R und dem Quotienten $\frac{l}{A}$ bestehen muß, und diesen für die verschiedenen Stoffe berechnen. Dann sollte man an einem Stoff nach V 3.2.4. bestätigen, daß es sich wirklich um eine Stoffkonstante handelt.

Versuch

Der Versuch wird wie V 3.2.2. nach Abbildung 3.2.2./1 aufgebaut. Bei der Versuchsdurchführung werden nacheinander ein Konstantan-, ein Eisen- und ein Kupferdraht gleichen Querschnitts und gleicher Länge benutzt. Für jeden Draht wird der Widerstand aus gemessener Stromstärke und Spannung berechnet. Alle Werte werden in eine Meßtabelle eingetragen.

Beispiel für die Meßreihe

$l = 1 \text{ m}$

Stoff	d in mm	A in mm ²	I in A	U in V	R in Ω	$\frac{R \cdot A}{l}$ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Konstantan	0,30	0,071	0,28	2,0	7,1	0,50
Eisen	0,30	0,071	0,28	0,51	1,8	0,13
Kupfer	0,30	0,071	0,28	0,066	0,26	0,018

Es ist zweckmäßig, in allen Teilversuchen die gleiche Stromstärke einzustellen.

3.2.4. Bestimmung des spezifischen Widerstandes [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω) oder Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
3. Drähte aus Konstantan, Nickel, Eisen, Aluminium jeweils mit verschiedenen Querschnittsflächen und verschiedenen Längen
4. Spannungsmesser
5. Strommesser
6. Meterstab
7. Feinmeßschraube

Methodische Hinweise

1. Siehe MH V 3.2.3.!
2. Man kann den Schülern zur Übung die Aufgabe stellen, festzustellen, ob ein Draht aus Eisen oder aus Konstantan besteht. Das ist äußerlich nicht feststellbar.

Versuch

Der Schaltplan für den Versuchsaufbau ist der gleiche wie für V 3.2.2. und 3.2.3. in Abbildung 3.2.2./1. Hier werden drei Drähte aus dem gleichen Stoff mit verschiedener Länge und verschiedenen Querschnittsflächen eingespannt. Länge und Flächeninhalt werden gemessen bzw. berechnet. Aus Spannungs- und Stromstärkemessung wird erst der Widerstand und schließlich der spezifische Widerstand berechnet. Der gleiche Versuch wird für Drähte aus verschiedenen Stoffen durchgeführt.

Muster des Kopfes einer Meßtabelle

Stoff: Konstantan						
l in m	d in mm	A in mm ²	U in V	I in A	R in Ω	ρ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Bemerkungen

1. Die spezifischen Widerstände können nicht nur auf Grund von Meßfehlern, sondern auch wegen unterschiedlicher Legierung differieren.
2. Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes kann man nach V 3.1.3. untersuchen, wenn man dort mit Wendeln aus Drähten bekannter Länge und bekannten Querschnitts arbeitet.

3.2.5. Untersuchung des Widerstandes von Flüssigkeiten

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Drehwiderstand (50 Ω)
3. Gerät zur Elektrolyse (2 Blei- oder Kohleelektroden)
4. Strommesser (10 mA ... 100 mA)
5. Spannungsmesser (10 V)
6. Meterstab
7. konzentrierte Lösung von Natriumchlorid
8. kleiner Tauchsieder
9. Thermometer

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sollen zeigen, daß für die Widerstände von Flüssigkeiten die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie für metallische Leiter gelten.
2. In der Versuchsdurchführung treten jedoch Vorgänge auf, die einen quantitativen Nachweis von proportionalen Abhängigkeiten des Widerstandes un-

möglich werden lassen. Es ist dies offensichtlich besonders eine Polarisierung der Elektroden durch kaum zu beobachtende Überzüge mit Gasbläschen.

3. Es wird empfohlen, diese Versuche zur Festigung einzusetzen, weil sie die Modellvorstellungen wesentlich unterstützen können.

Versuch 1: Abhängigkeit des Widerstandes von der Fläche

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.2.5./1.

Die Elektroden werden mit dünnen Kreidestrichen parallel zu ihrer unteren Kante in Abständen von 20 mm markiert und in den Trog mit einem Abstand von 20 cm eingehängt. Mit Leitungswasser füllt man den Trog zunächst bis zur untersten

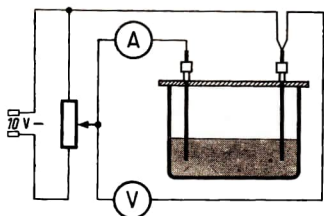


Abb. 3.2.5./1 Versuchsaufbau zur Untersuchung des Widerstandes von Flüssigkeiten

Markierung, schließt den Stromkreis und mißt Spannung und Stromstärke. Schrittweise vergrößert man die eingetauchten Elektrodenstücke durch Zugießen von Leitungswasser. Hält man die Spannung konstant und mißt die zugehörigen Stromstärkenwerte, kann man den Widerstand errechnen. Er wird kleiner, wenn die Fläche größer wird.

Versuch 2: Abhängigkeit des Widerstandes vom Elektrodenabstand

Nach Abschluß des Versuchs 1 verringert man den Elektrodenabstand schrittweise um je 5 mm, hält wieder die Spannung konstant und berechnet aus Spannung und Stromstärke den Widerstand. Er wird mit geringerem Elektrodenabstand kleiner.

Versuch 3: Abhängigkeit des Widerstandes von der Konzentration einer elektrolytischen Lösung

Im Anschluß an Versuch 2 erhöht man die Konzentration der elektrolytischen Lösung, indem man mit einer Meßpipette jeweils 1 ml von der konzentrierten Kochsalzlösung zusetzt und mit einem Glasrührer gut vermischt. Bei konstant gehaltener Spannung ist ein Anwachsen der Stromstärke und damit die Verkleinerung des Widerstandes festzustellen.

Versuch 4: Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

Man unterbricht den Stromkreis und hängt einen Tauchsieder in den Trog. Immer wenn die Temperatur um 10 °C gestiegen ist, schaltet man den Tauchsieder aus, nimmt ihn aus dem Trog heraus und mißt Spannung und Stromstärke.

3.3. Widerstandsbestimmung

3.3.1. Widerstandsbestimmung durch Spannungs- und Stromstärkemessung

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Stromversorgungsgerät (6 V —) | 4. Widerstand ($10\ \Omega \dots 20\ \Omega$) |
| 2. Spannungsmesser (5 V —) | 5. Widerstand (5 k Ω) |
| 3. Strommesser (10 mA; 100 mA) | |

Methodische Hinweise

1. Die Unterschiede zwischen spannungs- und stromrichtiger Messung können von den Schülern erst nach der Behandlung des verzweigten Stromkreises verstanden werden.
2. Für die praktische Arbeit bei der Bestimmung von Widerständen ist es notwendig, daß diese Versuche mit großer Klarheit durchgeführt, ausgewertet und verglichen werden.

Versuch 1: Bestimmung kleiner Widerstände in spannungsrichtiger Schaltung

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.1./1. Durch den Strommesser fließt die Summe aus den Zweigströmen im zu bestimmenden Widerstand und im Spannungsmesser. Die Spannung am Widerstand wird, da man den Widerstand der Zuleitungen zum Spannungsmesser vernachlässigen kann, richtig gemessen.

Man führt jetzt 2 Teilversuche vor. Zunächst setzt man als unbekannten Widerstand einen großen Widerstand mit etwa 5 k Ω ein (Spannung etwa 5 V, Stromstärkenmeßbereich 10 mA). Man liest Spannungs- und Stromstärkenanzeige ab. Löst man die Verbindung zum Spannungsmesser, so sinkt die Stromstärke erheblich ab, weil der Zweigstrom durch den Spannungsmesser nicht mehr fließt. Die Schaltung ist für die Bestimmung großer Widerstände ungeeignet.

Im zweiten Teilversuch ersetzt man das Bauelement mit großem Widerstand durch ein solches mit einem kleinen Widerstand von etwa $10\ \Omega \dots 20\ \Omega$ (Spannung 1 V, Stromstärkenmeßbereich 100 mA). Löst man jetzt die eine Verbindung zum Spannungsmesser, so ist die Verkleinerung der Stromstärke am Strommesser nicht mehr beobachtbar. Die Meßfehler sind bei kleinen Widerständen zu vernachlässigen.

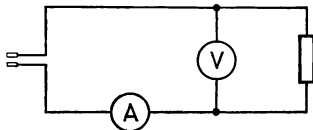


Abb. 3.3.1./1 Bestimmung von Widerständen mit spannungsrichtiger Schaltung

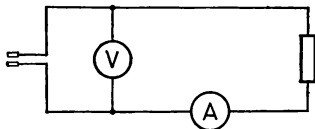


Abb. 3.3.1./2 Bestimmung von Widerständen mit stromrichtiger Schaltung

Versuch 2: Bestimmung großer Widerstände in stromrichtiger Schaltung

Man baut den Versuch nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.1./2 auf. Zunächst setzt man als unbekannten Widerstand ein Bauelement mit einem kleinen Widerstand von etwa $20\ \Omega$ ein (Spannung 1 V, Meßbereich der Stromstärke 100 mA).

Schließt man die Anschlußbuchsen des Strommessers durch eine Verbindungsleitung kurz, so tritt an ihm kein Spannungsabfall mehr auf, und der Spannungsmesser zeigt eine kleinere Spannung an. Diese Schaltung ist also für kleine Widerstände ungeeignet. Wiederholt man den Versuch mit einem großen Widerstand von etwa 5 k Ω , so ist die Verkleinerung der Spannung so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

Bemerkungen

1. Die Begriffe „großer und kleiner“ Widerstand sind relativ in Beziehung zu den Innenwiderständen der Meßgeräte. Moderne Vielfachmeßgeräte haben eine Widerstandskonstante von mindestens $1000 \frac{\Omega}{V}$, so daß bei Vollausschlag Stromstärken von 1 mA oder weniger auftreten. In den Meßbereichen für kleine Stromstärken haben diese Geräte verhältnismäßig große Innenwiderstände und verursachen entsprechend große Spannungsabfälle.
2. Bei einem unbekannten Widerstand verfährt man so, daß man die Schaltung spannungsrichtig aufbaut und einschaltet und danach den Stecker zum Spannungsmesser zwischen Strommesser und Widerstand abzieht. Falls dadurch die Stromstärke kleiner wird, muß man zur stromrichtigen Schaltung übergehen und die Zuleitung zum Spannungsmesser vor dem Strommesser anschließen.

3.3.2. Wirkungsweise eines Widerstandsmessers

1. Stromversorgungsgerät (2 V —) oder Monozelle
2. Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
3. Spannungsmesser (1 V —)
4. 2 Dekadenwiderstände (10 \times 100,0 Ω ; 10 \times 1000,0 Ω)
5. verschiedene Widerstände (100 Ω ... 5 k Ω)
6. Zeichenpapier

Methodischer Hinweis

Eine Reihe von Vielfachmeßgeräten ermöglicht Widerstandsmessungen mit Hilfe einer eingebauten Monozelle. Da solche Messungen besonders in Arbeitsgemeinschaften notwendig sind, sollte man den Schülern die Wirkungsweise des Widerstandsmessers mit diesem Versuch vor der Benutzung des Gerätes erläutern.

Versuch 1: Anfertigen einer Widerstandsskala

Aus Zeichenpapier schneidet man ein Stück heraus, mit dem man die Geräteskala so weit verdeckt, daß die Zeigerstellung noch zu sehen ist, und markiert auf dem Deckblatt die Zeigerstellung bei Vollausschlag. Den Spannungsmesser schließt man nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.2./1 an. Zunächst werden die Punkte A und B durch einen Verbindungsleiter verbunden. Mit Hilfe des Drehwiderstandes stellt man den Zeiger auf Vollausschlag ein und beschriftet die Marke auf dem Deckblatt mit 0. Den Verbindungsleiter zwischen A und B ersetzt man durch die Dekadenwiderstände (Abb. 3.3.2./1 b). Man vergrößert den Widerstand in Stufen von 100 Ω und markiert den jeweiligen Zeigerausschlag durch einen Strich auf dem Deckblatt und notiert den Zahlenwert des Widerstandes dazu. Um Fehler durch Schwan-

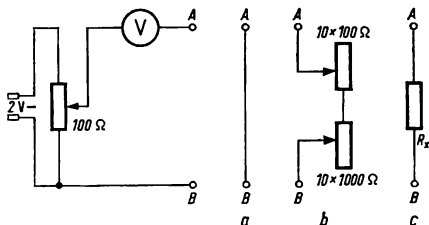


Abb. 3.3.2./1
Schaltpläne zur Eichung
einer Widerstandsskala

kungen der Netzspannung zu vermeiden, kontrolliert man die Skale durch die Wiederholung des Versuchs oder verwendet als Spannungsquelle eine Monozelle.

Versuch 2: Messung von Widerständen

Zunächst schließt man durch einen Verbindungsleiter die Schalterpunkte A und B kurz. Mit Hilfe des Drehwiderstandes wird der Zeiger auf den Nullpunkt der Widerstandsskala eingestellt (Abb. 3.3.2./1 a). Dann setzt man das Bauelement ein, dessen Widerstand R_x man bestimmen will (Abb. 3.3.2./1 c), und liest seinen Widerstand auf der Skale ab.

3.3.3. Widerstandsbestimmung durch Vergleichswiderstände

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. 2 Spannungsmesser (5 V —)
3. Dekadenwiderstand ($10 \times 100,0 \Omega$)
4. Widerstand ($100 \Omega \dots 500 \Omega$)

Zu Versuch 2

- Gerät 1., außerdem
5. 2 Strommesser (10 mA)
 6. Dekadenwiderstand ($10 \times 1000,0 \Omega$)
 7. Widerstand (1 k $\Omega \dots 10$ k Ω)

Methodischer Hinweis

Die Versuche setzen die Kenntnisse über Spannungsverteilung bzw. Stromverteilung nach V 4.1.1. und 4.2.1. voraus und können nach diesen als eine technische Anwendung zur Festigung der Kenntnisse genutzt werden.

Versuch 1: Bestimmung kleiner Widerstände durch Reihenschaltung mit Vergleichswiderstand

Der Versuch wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.3./1 aufgebaut. Die Widerstandsbestimmung erfolgt nach dem Kirchhoffschen Spannungsverteilungsgesetz

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{U_x}{U_v}; \quad R_x = \frac{U_x}{U_v} \cdot R_v.$$

Die systematischen Fehler werden um so kleiner, je kleiner der Vergleichswiderstand R_v und der unbekannte Widerstand R_x sind, weil dann die Zweigstromstärken durch den Spannungsmesser klein sind gegenüber den Stromstärken durch die Widerstände. Die Fehler werden auch kleiner, wenn der Vergleichswiderstand etwa gleich dem unbekannten Widerstand ist. Als Vergleichswiderstand wird ein Dekadenwiderstand benutzt. Ihn schaltet man so, daß die Teilspannungen etwa gleich sind.

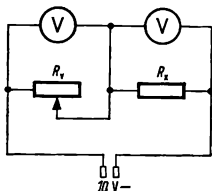


Abb. 3.3.3./1 Vergleich von Widerständen in Reihenschaltung

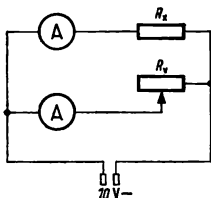


Abb. 3.3.3./2 Vergleich von Widerständen in Parallelschaltung

Versuch 2: Bestimmung großer Widerstände durch Parallelschaltung mit Vergleichswiderstand

Den Schaltplan für den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3.3.3./2. Große Widerstände kann man nach dem Kirchhoffschen Stromverzweigungsgesetz bestimmen.

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{I_v}{I_x}; \quad R_x = \frac{I_v}{I_x} \cdot R_v.$$

Die beiden Widerstände müssen hierbei möglichst groß gegenüber den Gerätewiderständen der Strommesser sein. Der Dekadenwiderstand als Vergleichswiderstand muß so eingestellt werden, daß die beiden Stromstärken etwa gleich sind.

3.3.4. Vorversuch zur Wheatstoneschen Meßbrücke

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω)
3. Gleitwiderstand (300 Ω)
4. Spannungsmesser (20 V; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll das Prinzip der Brückenschaltung erläutern. Nach der deduktiven Herleitung der Bedingungen für das Brückengleichgewicht sollte man mit dem Versuch für verschiedene Einstellungen eines der Widerstände das Brückengleichgewicht herstellen und damit die Voraussetzung für das Verständnis der Wheatstoneschen Meßbrücke schaffen.

Versuch

Den Schaltplan zeigt Abbildung 3.3.4./1. Die Gleitwiderstände werden parallel zueinander aufgebaut (Abb. 3.3.4./2.). Bei einer beliebigen, gegeneinander versetzten Stellung der Gleitkontakte der beiden Widerstände schaltet man ein. Man verändert die Stellung des einen Gleitkontaktes so lange, bis der Spannungsmesser

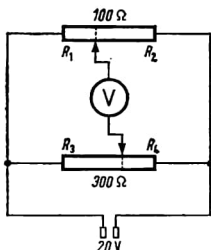


Abb. 3.3.4./1 Schaltplan für Brückenschaltung

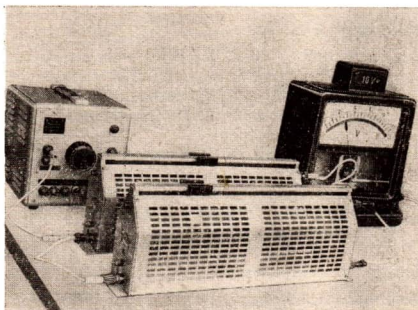


Abb. 3.3.4./2 Aufbau einer Brückenschaltung

keine Spannung mehr anzeigt. Diesen Versuch wiederholt man für verschiedene Einstellungen der Gleitkontakte. Wenn die Gleitwiderstände die gleiche Wicklungslänge haben, besteht das Brückengleichgewicht immer dann, wenn beide Gleitkontakte die gleiche Stellung haben, also wenn die Verhältnisisgleichung $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ erfüllt ist.

Bemerkung

Stehen nur Gleitwiderstände unterschiedlicher Wicklungslänge zur Verfügung, so kann man die Widerstandsverhältnisse annähernd ermitteln, indem man die Längen von den Wicklungsenden bis zur Mitte der Gleitkontakte mißt.

3.3.5. Widerstandsbestimmung mit der Wheatstoneschen Meßbrücke

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (1 V —)
2. Spannungsmesser (1 V; Nullpunktmittellage)
3. Wheatstonescher Brückendraht mit Gleitkontakt auf Grundbrett oder Konstantandraht (105 mm lang)
4. Dekadenwiderstand ($10 \times 100,0 \Omega$)
5. Widerstände ($50 \Omega \dots 2000 \Omega$)
6. Meterstab

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 4. und 5., außerdem

7. Drehwiderstand (30 Ω)
8. Skale zu 7. ③
9. Widerstand (30 Ω)
10. Widerstände (100 Ω ; 1 k Ω ; 10 k Ω ; 100 k Ω)

Methodische Hinweise

1. Nachdem mit V 3.3.4. das Prinzip der Brückenschaltung dargelegt worden ist, folgen hier zwei Varianten zur Widerstandsbestimmung.
2. Mit der Variante a zeigt man mehr das physikalische Grundprinzip der Meßbrücke und kann mit verhältnismäßig großer Genauigkeit Widerstände bestimmen.
3. In der Variante b erreicht man eine geringere Genauigkeit, weil die verwendeten technischen Widerstände zu große Toleranzen haben. Der Wert dieses Versuches liegt darin, daß die Grundschaltung eines technischen Brückenmeßgerätes aufgebaut und im Betrieb gezeigt wird. Er sollte vorwiegend in Arbeitsgemeinschaften genutzt werden.

Variante a: Brückenschaltung mit Meßdraht

Die Brückenschaltung wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.5./1 aufgebaut. Falls kein Brückendraht auf Grundbrett zur Verfügung steht, spannt man einen Konstantandraht zwischen zwei Fußklemmen an Tischklemmen mit 1 m Länge ein

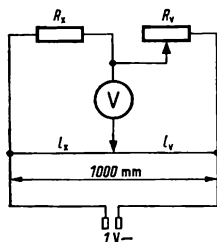


Abb. 3.3.5./1 Brückenschaltung mit Meßdraht

und benutzt als Gleitkontakt darauf eine Krokodilklemme. Der Dekadenwiderstand dient als Vergleichswiderstand R_v . Der unbekannte Widerstand R_x wird mit ihm in Reihe geschaltet.

Man stellt das Brückengleichgewicht durch Verschieben des Gleitkontaktes her. Erreicht man dieses erst, wenn die Länge l_v sehr klein wird, so muß man einen größeren Vergleichswiderstand wählen. Einen kleineren wählt man, wenn die Länge l_x sehr klein wird. Die größte Meßgenauigkeit erreicht man, wenn das Brückengleichgewicht bei annähernder Mittelstellung des Gleitkontaktes besteht ($R_v \approx R_x$).

Die Meßgenauigkeit kann vergrößert werden, indem man nach der Einstellung des Gleichgewichts die Spannung so weit heraufsetzt, wie das der Meßdraht zuläßt,

ohne sich zu stark zu erwärmen, und dann die Einstellung korrigiert. Dazu kann man auch den Meßbereich des Spannungsmessers herabsetzen.

Die Drahtlängen sind den Widerständen proportional. So ergibt sich als Beispiel folgende Berechnung:

Gegeben:

$$R_v = 1000 \, \Omega$$

$$l_x = 448 \, \text{mm}$$

$$l_v = 1000 \, \text{mm} - l_x$$

$$l_v = 552 \, \text{mm}$$

Gesucht:

$$R_x$$

Lösung:

$$\frac{R_x}{R_v} = \frac{l_x}{l_v}$$

$$R_x = \frac{l_x}{l_v} \cdot R_v$$

$$R_x = \frac{448 \, \text{mm}}{552 \, \text{mm}} \cdot 1000 \, \Omega$$

$$\underline{\underline{R_x = 812 \, \Omega}}$$

Variante b: Modell einer technischen Meßbrücke

Das Modell der Schaltung eines Brückenmeßgerätes wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.5./2 auf dem Tafelschaltgerät aufgebaut. Zu dem Drehwiderstand fertigt man aus Zeichenkarton eine Skale, auf der man den Drehbereich (270°)

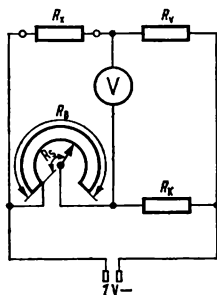


Abb. 3.3.5./2 Prinzipialschaltplan einer Meßbrücke

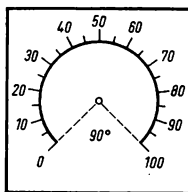


Abb. 3.3.5./3 Skale zum Drehwiderstand

nach Abbildung 3.3.5./3 einteilt. An den Bedienungsknopf des Drehwiderstandes klebt man einen Zeiger aus steifem Draht oder aus einem Plaststreifen, so daß der Zeiger bei Linksanschlag des Drehwiderstandes auf dem Nullpunkt und bei Rechtsanschlag auf dem Wert 100 der Skalenteilung steht. Als konstanten Widerstand R_k benutzt man einen Widerstand, dessen Betrag mit dem des Drehwiderstandes übereinstimmt. Für den Vergleichswiderstand setzt man je nach der Größenordnung des unbekannten Widerstandes Widerstände von $100 \, \Omega$, $1000 \, \Omega$, $10000 \, \Omega$ oder $100000 \, \Omega$ mit möglichst kleiner Toleranz ein. Das Brückengleichgewicht wird hergestellt, indem der Drehwiderstand so eingestellt wird, daß der Spannungsmesser keine Spannung anzeigt. Bei einem Drehwiderstand $R_D = 30 \, \Omega$ ist dann z.B. der eingeschaltete Teil des Drehwiderstandes $R_s = \frac{24}{100} \cdot 30 \, \Omega$.

Es ergibt sich folgende Berechnung:

Gegeben:

$$R_k = R_D = 30 \, \Omega$$

$$R_s = \frac{24}{100} \cdot 30 \, \Omega$$

$$R_v = 100 \, \Omega$$

Gesucht:

$$R_z$$

Lösung:

$$\frac{R_z}{R_v} = \frac{R_s}{R_k}$$

$$R_z = \frac{R_s \cdot R_v}{R_k}$$

$$R_z = \frac{24 \cdot 30}{100 \cdot 30} \cdot 100 \, \Omega$$

$$\underline{\underline{R_z = 24 \, \Omega}}$$

Der Skalenwert gibt bei einem Vergleichswiderstand von $100 \, \Omega$ den Zahlenwert des Widerstandes für die Einheit Ω an. Bei den Vergleichswiderständen von $1000 \, \Omega$, $10000 \, \Omega$, $100000 \, \Omega$ ist der Skalenwert mit 10, 100 oder 1000 zu multiplizieren, um den Zahlenwert des unbekannten Widerstandes für die Einheit Ω zu erhalten.

Bemerkung

Es wird empfohlen, nicht nur den Widerstand von technischen Widerständen, sondern auch den von Glühlampen, Spulen oder Tauchsiedern zu bestimmen.

3.3.6. Widerstandsbestimmung durch Substitution

1. Stromversorgungsgerät (1 V ... 10 V —)
2. Spannungsmesser (1 V; 10 V)
3. Strommesser (1 mA; 10 mA; 100 mA)
4. Dekadenwiderstände mit zwei Verbindungsleisten
 - 10 × 0,1 Ω ; 2 A
 - 10 × 1,0 Ω ; 0,75 A
 - 10 × 10,0 Ω ; 0,25 A
 - 10 × 100,0 Ω ; 0,075 A
 - 10 × 1000,0 Ω ; 0,025 A
 - 10 × 10000,0 Ω ; 0,0075 A
5. Gleitwiderstand (140 Ω ; 1,6 A)
6. unbekannte Widerstände (verschiedene Konstantandrähte, Eisendrähte, technische Widerstände, Glühlampen, Spulen)

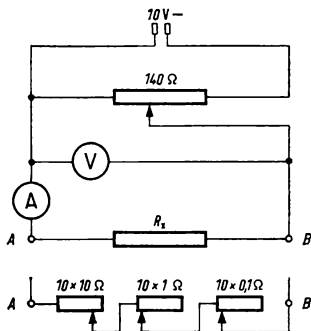
Methodischer Hinweis

Der Versuch geht von der Definitionsgleichung des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ aus (vgl. V 3.1.2.). Er kann unmittelbar im Anschluß an diesen zur Vertiefung und Übung durchgeführt werden.

Versuch

Man stellt zunächst mit dem unbekannten Widerstand eine Schaltung nach Abbildung 3.3.6./1 zusammen. Die Spannung stellt man mit dem Spannungsteiler so ein,

Abb. 3.3.6./1 Schaltplan zur Widerstandssubstitution durch Dekadenwiderstände



daß die Stromstärke den zulässigen Wert des anschließend einzusetzenden größten Dekadenwiderstandes nicht übersteigt. Dazu berechnet man überschlagsmäßig den unbekannten Widerstand aus der Spannung und der Stromstärke. Man notiert die Werte der Spannung und der Stromstärke, die man eingestellt hat. Dann wählt man den Dekadenwiderstand aus, in dessen Größenordnung der unbekannte Widerstand liegt, und schaltet dazu mit den Verbindungsleisten die beiden nächst kleineren Dekadenwiderstände in Reihe. Diese Reihenschaltung legt man an Stelle des unbekannten Widerstandes in den Stromkreis, wobei der größte Dekadenwiderstand auf seinen Höchststand, die beiden anderen auf Null geschaltet werden. Den größten Dekadenwiderstand verkleinert man bis auf die Stufe, bei der die Stromstärke am unbekannten Widerstand gerade überschritten wird. Den nächstkleineren Dekadenwiderstand vergrößert man bis auf die Stufe, bei der die Stromstärke gerade noch nicht unterschritten wird. Mit dem kleineren Dekadenwiderstand stellt man die Stromstärke dann so genau ein, wie es die Ablesemöglichkeit am Strommesser zuläßt. Die Summe der Widerstände der eingeschalteten Dekadenstufen ist dann gleich dem unbekannten Widerstand. Bei Schwankungen der Netzspannung muß man die Spannung am Spannungsteiler nachstellen und das Einstellen der Dekadenwiderstände wiederholen, bis Spannung und Stromstärke mit den Werten am unbekannten Widerstand übereinstimmen. Man kann auch mit einem frisch geladenen Akkumulator oder einer neuen Flachbatterie arbeiten, bei denen sich während der Versuchsdauer die Klemmspannung praktisch nicht ändert.

Beispiel

Man mißt bei einem unbekannten Widerstand bei einer Spannung von 8,0 V eine Stromstärke von 0,37 A. Der Widerstand liegt also ungefähr bei 20 Ω . Man muß die Dekadenwiderstände $10 \times 10,0 \Omega$, $10 \times 1,0 \Omega$ und $10 \times 0,1 \Omega$ in Reihe schalten. Die zulässige Stromstärke am Dekadenwiderstand $10 \times 10,0 \Omega$ beträgt 0,250 A. Darum verringert man die Spannung auf 4,0 V und erhält eine Stromstärke von 0,185 A. Den größten Dekadenwiderstand schaltet man auf 20,0 Ω herunter, weil bei 30,0 Ω die Stromstärke noch kleiner als 0,185 A und bei 20,0 Ω größer ist. Dann schaltet man Stufen von 1,0 Ω zu. Bei 22 Ω wird die Stromstärke kleiner als 0,185 A, also bleibt man bei 21 Ω . Durch Zuschalten von 0,6 Ω ... 0,7 Ω erreicht man im Bereich der Ablesegenauigkeit die Stromstärke von 0,185 A und findet den Betrag für den unbekannten Widerstand mit 21,6 Ω ... 21,7 Ω .

4. Unverzweigte und verzweigte Stromkreise

4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.0. Der Versuch 4.2.3. erfordert den Selbstbau eines Schaltbrettes und den Betrieb mit Netzspannung. Alle anderen Versuche in diesem Kapitel werden mit Kleinspannung durchgeführt und können als Demonstrationsversuche auf dem Tafelschaltgerät oder als Schülerexperimente mit Teilen des SEG Elektrik aufgebaut werden.

4.0.1. Für die Behandlung des unverzweigten Stromkreises ist die Auswertung von zwei Versuchen notwendig, die nicht in den Abschnitt 4.1. aufgenommen sind. Es sind dies V 2.1.3. und 3.1.6., mit denen die konstante Stromstärke im unverzweigten Stromkreis und die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes gezeigt werden. Mit V 4.1.1. bis 4.1.4. werden induktiv die Gesetzmäßigkeiten der Spannungsverteilung im unverzweigten Stromkreis hergeleitet. Indem man die Definitionsgleichung des Widerstandes und das Gesetz über die Stromstärke im unverzweigten Stromkreis heranzieht, kann man aus ihnen die Gesetze der Reihenschaltung von Widerständen deduktiv entwickeln und diese experimentell durch Messen der Widerstände bestätigen.

Bei der Behandlung der Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters von seiner Länge kann man durchaus schon zur Erläuterung eine Reihenschaltung gleicher Widerstände nach der Versuchsanordnung im V 4.1.2. aufbauen, obgleich diese meist vor der Reihenschaltung behandelt wird.

In den Versuchen V 4.1.5. bis 4.1.8. werden verschiedene technische Anwendungen des Spannungsverteilungsgesetzes untersucht. Zu ihnen gehört auch V 3.3.3., 1 zur Widerstandsbestimmung. Der Lehrer muß entscheiden, welche Versuche er zur Festigung und Vertiefung unmittelbar in den Unterricht über den unverzweigten Stromkreis einbezieht und welche er erst nach der Behandlung des verzweigten Stromkreises zu vergleichenden Betrachtungen benutzen will.

4.0.2. Voraussetzung für die Behandlung eines einfachen verzweigten Stromkreises ist die gleiche Spannung an den parallelgeschalteten Widerständen, die zwischen zwei Verzweigungspunkten liegen. Es ist überflüssig, dies experimentell nachzuweisen, etwa indem man die Spannung nicht zwischen den Verzweigungspunkten, sondern über jeden Widerstand getrennt mißt. Das Gesetz der Stromverzweigung kann wahlweise mit V 4.2.1. oder 4.2.2. induktiv oder deduktiv hergeleitet werden. Das Gesetz über die Parallelschaltung von Widerständen kann aus ihnen deduktiv hergeleitet werden und durch Widerstandsmessungen bestätigt werden. Die folgenden Versuche sind wie im Abschnitt 4.1. der technischen Bedeutung und Anwendung gewidmet. Hierzu gehören aber auch die Versuche zur Widerstandsbestimmung V 3.3.3., 2, V 3.3.4. und 3.3.5.

Bei der Durchführung aller Versuche dieses Abschnitts sollte man immer auf die analogen Versuche im Abschnitt 4.1. hinweisen und zeigen, daß die Gesetze ineinander überführt werden können, indem man die Größen Spannung und Stromstärke und Widerstand und Kehrwert des Widerstandes (Leitwert) vertauscht.

Einen Teil der technischen Anwendungen sollte man zur abschließenden Festigung und Wiederholung vergleichend durchführen, z.B. V 4.1.6. und 4.2.5. (Meßbereichserweiterungen), V 4.1.8. und 4.2.6. (Vorwiderstand und Spannungsteiler) sowie V 3.3.3. (Widerstandsbestimmung).

4.1. Spannung, Stromstärke und Widerstand im unverzweigten Stromkreis

4.1.1. Spannungsabfall längs eines homogenen Leiters

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (140 Ω)
3. Spannungsmesser (5 V)
4. Strommesser (500 mA)
5. Konstantendraht (\varnothing 0,3 mm; 1,20 m lang)
6. Tafelschaltgerät

Methodischer Hinweis

Der Versuch schließt sich an V 2.1.3. und 3.1.6. an. Er setzt die Kenntnis voraus, daß die Stromstärke an allen Stellen eines unverzweigten Stromkreises konstant ist. Er bestätigt die deduktiv herleitbare Tatsache, daß an jedem Teilwiderstand bei konstanter Stromstärke ein Spannungsabfall auftritt, der dem Widerstand proportional ist, daß also die Spannung entlang eines Leiters abnimmt.

Versuch 1

Auf dem Tafelschaltgerät wird der Konstantendraht über Federklemmen in Form eines offenen Rechtecks ausgespannt (Abb. 4.1.1./1). Die Klemmen werden in Abständen von 10 cm eingesetzt, und der Draht wird um jede Klemme einmal zwischen ihren Klemmbacken herumgeschlungen. Mit Schmirgelpapier entfernt man vorher an den Berührungsstellen mit den Klemmen die Oxidschicht des Drahtes. Nun schließt man ihn nach dem Schaltplan mit einem Spannungsteiler an ein Stromversorgungsgerät an. Den Spannungsmesser verbindet man mit einem kurzen Verbindungsleiter mit dem oberen Anfangspunkt des Drahtes. Den anderen Verbindungsleiter wählt man so lang (etwa 1 m), daß man alle Klemmen damit

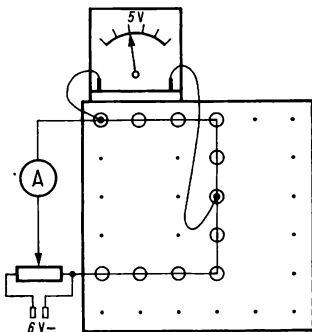


Abb. 4.1.1./1
Versuchsaufbau auf dem Tafelschaltgerät

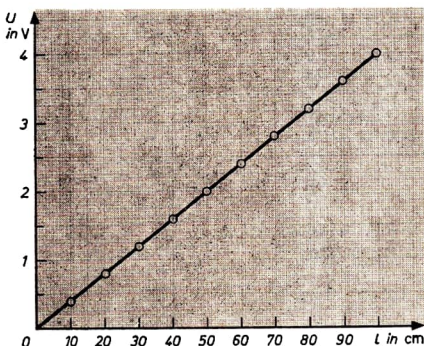


Abb. 4.1.1./2
Spannungsabfall längs
eines Widerstandsdrahtes

erreichen kann. Zunächst mißt man die Spannung zwischen den beiden Enden des Widerstandsdrahtes und stellt sie auf 4 V ein. Die Stromstärke wird am Strommesser abgelesen und dient der Kontrolle dafür, daß während des Versuchs keine Fehler durch Schwankungen der Netzspannung auftreten. In Schritten von je 10 cm verringert man die Drahtlänge, über der man die Spannung mißt, und trägt die Meßergebnisse in eine Tabelle ein. Danach zeichnet man ein Diagramm (Abb. 4.1.1./2). Es zeigt sich, daß die Spannung U proportional der Länge l und wegen der Homogenität des Widerstandsdrahtes auch proportional dem Widerstand R ist.

Versuch 2

Man verändert beide Anschlußstellen des Spannungsmessers am Widerstandsdraht und mißt an beliebigen Stellen die Spannung über 10 cm, 20 cm ... 50 cm. Die Meßwerte stimmen mit denen der Meßtabelle überein.

Beispiel für eine Meßreihe

l in cm	U in V	$\frac{U}{l}$ in $\frac{\text{V}}{\text{cm}}$
100	4,0	0,04
90	3,6	0,04
80	3,2	0,04
70	2,8	0,04
60	2,4	0,04
50	2,0	0,04
40	1,6	0,04
30	1,2	0,04
20	0,8	0,04
10	0,4	0,04

Bemerkung

Der Versuch kann auch ausgeführt werden, indem man den Widerstandsdraht zwischen 4 Fußklemmen in Abschnitten von 30 cm, 40 cm und 30 cm ausspannt. Man schließt dann den Spannungsmesser mit Krokodilklemmen an und mißt die Abstände mit einem Meßstab aus.

4.1.2. Spannungsabfall bei Reihenschaltung von Widerständen [SE]

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (10 V —) | 4. Widerstand (30 Ω) |
| 2. 3 Spannungsmesser (10 V) | 5. Widerstand (100 Ω) |
| 3. Strommesser (100 mA) | |

Methodische Hinweise

1. Mit dem Versuch kann man induktiv das Spannungsverteilungsgesetz im unverzweigten Stromkreis einführen.
2. Nach einer deduktiven Herleitung des Spannungsverteilungsgesetzes aus dem Ohmschen Gesetz kann dieser Versuch zur Bestätigung des Spannungsverteilungsgesetzes benutzt werden.
3. Der Versuch kann auch analog mit mehr als zwei in Reihe geschalteten Widerständen ausgeführt werden.

Versuch

Die beiden Widerstände R_1 und R_2 werden nach dem Schaltplan in Abbildung 4.1.2./1 in Reihe geschaltet. An den beiden Widerständen werden die Teilspan-

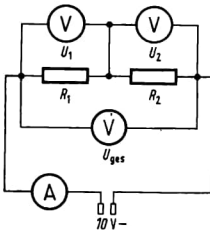


Abb. 4.1.2./1
Reihenschaltung von Widerständen

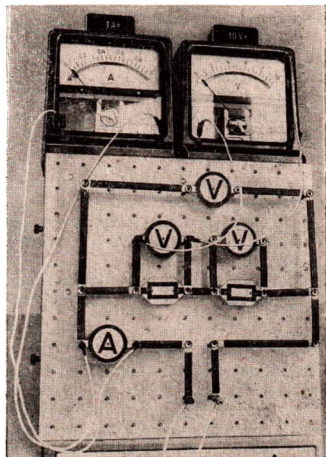


Abb. 4.1.2./2
Versuchsaufbau auf Tafelschaltgerät

nungen U_1 und U_2 gemessen und über der Reihenschaltung beider Widerstände die Gesamtspannung U_{ges} .

In Abbildung 4.1.2./2 wird der Aufbau auf einem Tafelschaltgerät gezeigt. Man kann entweder mit 3 Spannungsmessern die Spannungen gleichzeitig oder mit einem Spannungsmesser die Spannungen nacheinander messen. An kleinen Widerständen treten durch die Geräteströme nur unwesentliche Meßfehler auf. Falls bei der Verwendung von 3 Geräten Abweichungen von der Gesetzmäßigkeit $U_1 + U_2 = U_{\text{ges}}$ auftreten, beruht das auf Meßfehlern infolge der Güteklasse der Geräte.

Durch die Messung der Stromstärke, die prinzipiell nicht notwendig wäre, ist es möglich, die Widerstände zu berechnen und Zahlenwerte für die Bestätigung der Gesetzmäßigkeit $R_1 + R_2 = R_{\text{ges}}$ zu erhalten.

Bemerkungen

1. Wenn man mit anderen Widerständen arbeitet, sollte man diese möglichst so wählen, daß alle drei Spannungsmesser bei gleichem Meßbereich einen gut sichtbaren Ausschlag haben.
2. Um die Allgemeingültigkeit der Gesetzmäßigkeit zu zeigen, kann man bei der Wiederholung an Stelle der Festwiderstände gut zwei Einstellwiderstände, z.B. Drehwiderstände (50 Ω ; 25 W), einsetzen, die man auf verschiedene Widerstandswerte einstellt.

4.1.3. Spannungsverteilung bei Reihenschaltung von Glühlampen

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
3. 2 Glühlampen (6 V; 2,4 W)
4. 2 Glühlampen (6 V; 0,1 A)
5. Spannungsmesser (10 V)
6. Strommesser (500 mA)

Methodische Hinweise

1. Um zunächst die Berechnungen von Leistungen, das Ohmsche Gesetz und das Spannungsverteilungsgesetz zu wiederholen und zu festigen, kann man die Aufgabe stellen, die Spannungsverhältnisse bei der Reihenschaltung von Glühlampen zu berechnen. Der Versuch wird dann zur Bestätigung der Berechnungen ausgeführt.
2. Man kann den Versuch ohne Vorüberlegungen vorführen und von den Schülern danach die theoretischen Betrachtungen verlangen.

Versuch

Der Aufbau der Schaltung erfolgt nach Abbildung 4.1.3./1. Vor dem Einschalten wird der Spannungsteiler so eingestellt, daß die Spannung an den Glühlampen gleich Null ist. Im ersten Teilversuch verwendet man zwei gleiche Glühlampen (6 V; 2,4 W oder 6 V; 0,1 A), im zweiten unterschiedliche Glühlampen. Mit dem Spannungsteiler stellt man die Spannung so ein, daß sie im ersten Teilversuch an

jeder der beiden Lampen, im zweiten an der Lampe 6 V; 0,1 A gerade 6 V beträgt. Im zweiten Teilversuch leuchtet die Lampe 6 V; 2,4 W nur ganz schwach, weil sie nur von einem Strom mit einer Stromstärke von etwa 0,1 A durchflossen wird. Aus den Meßwerten von Spannung und Stromstärke berechnet man für sie einen kleineren Widerstand als aus ihren Nennwerten von Spannung und Leistung, weil sie nur eine kleinere Temperatur als im Betriebszustand erreicht.

Bemerkung

Man kann den zweiten Teilversuch auch so ausführen, daß man die beiden unterschiedlichen Glühlampen in Reihenschaltung an eine Spannung von 12 V legt. Die Glühlampe 6 V; 0,1 A wird dann sehr hell aufleuchten und nach kurzer Zeit durchbrennen. Aufgabe für die Schüler ist es, die Ursache dafür zu finden.

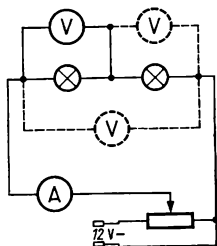


Abb. 4.1.3./1 Reihenschaltung von Glühlampen

4.1.4. Spannung bei Reihenschaltung von Spannungsquellen

1. Flachbatterie (4,5 V)
2. Spannungsmesser (5 V)

Methodischer Hinweis

Die Schüler kennen meist die Reihenschaltung von Monozellen zum Betrieb von Transistorenempfängern und Transistorentonbandgeräten. Der Versuch soll den Schülern die Addition der Teilspannungen zeigen.

Versuch

Man entfernt von einer Flachbatterie die äußere Umhüllung und mißt mit einem Spannungsmesser die Spannung der einzelnen Elemente, bildet die Summe und mißt die Gesamtspannung, die gleich der Summe der Teilspannungen ist.

Bemerkungen

1. Es ist ein Hinweis auf die Polung der Elemente angebracht (Pluspol an den Kohlestiften und dem kurzen Messingblechstreifen, Minuspol an dem Zinkmantel und dem langen Messingblechstreifen).
2. Der Versuch kann auch an einer Akkumulatorenbatterie oder durch Reihenschaltung einzelner Monozellen durchgeführt werden.
3. Auch eine Gegenreihenschaltung, z.B. aus einer Flachbatterie und einer Monozelle, kann entsprechend untersucht werden.

4.1.5. Einfluß eines Strommessers auf das Meßergebnis [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. 2 Vielfachmeßgeräte (100 mA)
3. Glühlampe (6 V; 0,1 A)
4. Schalter

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll zeigen, daß eine Messung durch das Meßgerät einen systematischen Fehler bekommt. In diesem Beispiel wird eine Anordnung gewählt, bei der dieser Fehler relativ groß ist. Vielfachmeßgeräte haben in den kleinen Stromstärkemeßbereichen verhältnismäßig große Innenwiderstände, so daß bei kleinen Spannungen und kleinen Nutzwiderständen durch den Strommesser große Fehler verursacht werden.

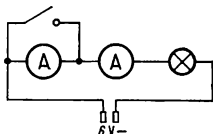


Abb. 4.1.5./1 Einfluß eines Strommessers auf die Stromstärke

Versuch

In dem Stromkreis nach dem Schaltplan in Abbildung 4.1.5./1 liegen vor der Glühlampe zwei Strommesser, von denen der eine durch einen parallel geschalteten Schalter zunächst kurzgeschlossen wird. Man mißt dabei eine Stromstärke von $I_1 \approx 86 \text{ mA}$. Schaltet man durch Öffnen des Schalters den zweiten Strommesser ein, so sinkt die Stromstärke etwa auf $I_2 \approx 77 \text{ mA}$. Daraus kann man schließen, daß auch der erste Strommesser durch seinen Innenwiderstand die Stromstärke entsprechend verkleinert hat.

Bemerkung

Eine rechnerische Auswertung ist bei Verwendung einer Glühlampe kaum möglich, weil der Widerstand der Glühlampe sich mit der Stromstärke ändert. Eine Berechnung kann erfolgen, wenn man an Stelle der Glühlampe einen Dekadenwiderstand von 60Ω einsetzt. Ein Vielfachmesser mit dem kleinsten Meßbereich $1 \text{ V}/1 \text{ mA}$ hat bei dem Meßbereich von 100 mA einen Innenwiderstand von 10Ω , so daß der Gesamtwiderstand im Stromkreis 70Ω und mit zwei Meßgeräten 80Ω beträgt.

4.1.6. Meßbereichserweiterung von Spannungsmessern [SE]

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (1 V ... 10 V)
2. Spannungsmesser (1 V)
3. Spannungsmesser (10 V)
4. Strommesser (1 mA)
5. 2 Dekadenwiderstände ($10 \times 1000,0 \Omega$, $10 \times 100,0 \Omega$)

Zu Variante b

6. Stromversorgungsgerät (8 V ... 20 V)
7. Spannungsmesser (10 V)
8. Spannungsmesser (30 V oder 60 V)
9. Drehwiderstand (25 kΩ)

Methodischer Hinweis

Die Versuche demonstrieren einerseits eine Anwendung des Spannungsverteilungsgesetzes, andererseits dienen sie der Erklärung der Konstruktion von Vielfachmeßgeräten. In der Variante a wird die Größe des Vorwiderstands berechnet, und dann erfolgt eine experimentelle Bestätigung. In der Variante b erfolgt die Meßbereichserweiterung empirisch experimentell und kann nachträglich rechnerisch untersucht werden.

Variante a

Der Meßbereich eines Spannungsmessers soll von 1 V auf 10 V erweitert werden. Man stellt zunächst den Widerstand des Meßgerätes bei dem Meßbereich von 1 V fest. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Der Meßbereich von 1 V ist bei vielen Meßgeräten auch der Meßbereich für 1 mA. Dann ist der Gerätewiderstand $R_G = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 1000 \Omega$.
- Auf dem Gerät ist der Widerstand für die einzelnen Meßbereiche oder der Widerstand je Volt angegeben.
- Man schaltet einen Strommesser mit dem Spannungsmesser in Reihe an eine Spannung von 1 V, mißt die Stromstärke und die Spannung und berechnet den Gerätewiderstand (Abb. 4.1.6./1).

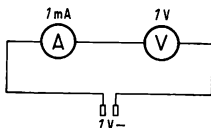


Abb. 4.1.6./1 Bestimmung des Gerätewiderstandes

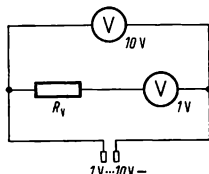


Abb. 4.1.6./2 Erweiterung des Meßbereichs eines Spannungsmessers mit berechnetem Vorwiderstand

Dann berechnet man die notwendige Größe des Vorwiderstands R_V für die Meßbereichserweiterung. Er muß das Neunfache des Gerätewiderstandes betragen. Man stellt ihn durch Dekadenwiderstände oder Festwiderstände geringer Toleranz zusammen und schließt ihn mit dem Meßgerät in Reihe an eine Spannung von 1 V ... 10 V an (Abb. 4.1.6./2). Zur Kontrolle schließt man einen Spannungsmesser mit einem Meßbereich von 10 V an und vergleicht die Anzeige der Geräte bei verschiedener Spannung. Entsprechend der Güteklasse der Meßgeräte und der Toleranz des Vorwiderstandes stimmen sie nahezu überein.

Variante b

Der Meßbereich eines Spannungsmessers soll von 10 V auf 20 V erweitert werden. Für das verwendete Gerät ist z. B. eine Widerstandskonstante von $1000 \frac{\Omega}{V}$ angegeben. Man schaltet vor das Meßgerät mit dem Meßbereich von 10 V einen Drehwiderstand von 25 k Ω , den man auf den Widerstand Null stellt, und schließt eine Spannung von etwa 8 V an (Abb. 4.1.6./3). Der Widerstand am Drehwiderstand

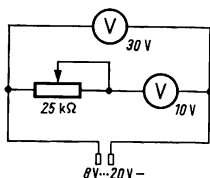


Abb. 4.1.6./3

Erweiterung des Meßbereichs eines Spannungsmessers mit Einstellwiderstand und Kontrollmeßgerät

wird so weit vergrößert, bis das Meßgerät genau den halben Zeigerausschlag hat. Nun kann man die Spannung stufenweise bis auf 20 V vergrößern und mit einem Spannungsmesser mit größerem Meßbereich (30 V oder 50 V) die Richtigkeit der Meßbereichserweiterung kontrollieren. Es ist auch möglich, den eingestellten Vorwiderstand aus der Schaltung herauszunehmen und seinen Widerstand mit einer Meßbrücke zu messen. Er muß in diesem Beispiel einen Widerstand von 10 k Ω haben.

4.1.7. Spannungsabfall in einer Spannungsquelle bei Belastung [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Spannungsmesser (10 V)
3. Strommesser (2,5 A)
4. Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
5. Schalter

Methodischer Hinweis

Den Schülern soll mit diesem Versuch erklärt werden, daß jede Spannungsquelle einen inneren Widerstand hat, über dem genau wie an einem Widerstand im äußeren Stromkreis ein Spannungsabfall auftritt.

Versuch

Es wird eine Schaltung nach dem Schaltplan in Abbildung 4.1.7./1 aufgebaut. Bei geöffnetem Schalter wird die Leerlaufspannung U_0 gemessen. Dann wird der Schalter geschlossen, und mit Hilfe des Drehwiderstandes wird die Stromstärke in Stufen von 0,2 A bis auf 2 A vergrößert. Die Meßwerte der Spannungen und Stromstärken werden in eine Tabelle eingetragen. Danach wird ein Diagramm gezeichnet. Man

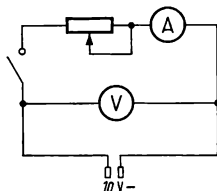


Abb. 4.1.7./1
Spannung bei Belastung einer Spannungsquelle

kann den jeweiligen inneren Spannungsabfall U_i aus der Differenz $U_0 - U$ und den inneren Widerstand R_i aus dem Quotienten $\frac{U_i}{I}$ berechnen.

Der innere Widerstand eines Stromversorgungsgerätes ist entsprechend den Kennlinien des Transformators und des Gleichrichters von der Stromstärke abhängig.

Bemerkungen

1. In analoger Weise können auch chemische Spannungsquellen untersucht werden.
2. Die Vergrößerung der Stromstärke kann man auch durch Parallelschalten einer steigenden Anzahl von Glühlampen vornehmen. Dabei wird die Verkleinerung der Spannung zusätzlich durch das Abnehmen der Helligkeit der Lampen deutlich.
3. Es ist zu beachten, daß man mit einem stromdurchflossenen Spannungsmesser die Leerlaufspannung U_0 nicht exakt messen kann. Der Fehler wird um so größer, je kleiner der Innenwiderstand des Meßgerätes ist. Man erhält den Innenwiderstand näherungsweise, wenn man die Differenz zweier Spannungen durch die Differenz zweier Stromstärken aus der Meßreihe dividiert.

4.1.8. Spannungseinstellung durch Vorwiderstand — Wirkungsgrad

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Glühlampe (6 V; 0,4 A)
3. Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
4. 2 Spannungsmesser (10 V)
5. Strommesser (500 mA)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt eine Möglichkeit, Geräte mit einer kleinen Nennspannung an eine Spannungsquelle mit größerer Spannung anzuschließen und dabei die Spannung und damit die Stromstärke in bestimmten Bereichen einzustellen.
2. Der Versuch ist mit V 4.2.6. bezüglich des Wirkungsgrades und der Grenzen der Einstellmöglichkeiten zu vergleichen und kann mit diesem zusammen im Praktikum eingesetzt werden.

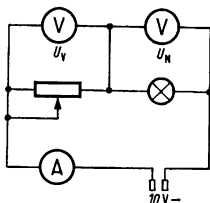


Abb. 4.1.8./1
Vorwiderstand vor einer Glühlampe

Versuch

In der Schaltung nach dem Schaltplan in Abbildung 4.1.8./1 wird der Drehwiderstand vor dem Einschalten auf seinen größten Wert gestellt. Danach wird dieser so weit verkleinert, bis an der Glühlampe die Nennspannung U_N von 6 V besteht. Am Vorwiderstand erfolgt dann ein Spannungsabfall U_V von etwa 4 V. Die Gesamtspannung U_{ges} ist die Summe aus diesen Teilspannungen. Der Wirkungsgrad ist unabhängig von der Stromstärke

$$\eta = \frac{P_N}{P_{ges}} = \frac{U_N \cdot I}{(U_N + U_V) \cdot I} = \frac{U_N}{U_{ges}}$$

Man erhöht den Widerstand noch einmal auf seinen größten Wert und zeigt, daß man durch den Vorwiderstand die Spannung an der Lampe nur auf etwa 2,3 V und die Stromstärke nur auf etwa 0,15 A herabsetzen kann.

4.2. Spannung, Stromstärke und Widerstand im verzweigten Stromkreis

4.2.1. Stromverzweigung in parallelgeschalteten Widerständen

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (20 V —) | 4. Spannungsmesser (50 V) |
| 2. Widerstand (50 Ω) | 5. Strommesser (1 A) |
| 3. Widerstand (100 Ω) | 6. 2 Strommesser (500 mA) |

Methodische Hinweise

1. Mit diesem Versuch kann man induktiv das Stromverzweigungsgesetz einführen, indem man ihn nach der Ausführung mathematisch auswertet.
2. Das Stromverzweigungsgesetz kann deduktiv hergeleitet werden, wenn man davon ausgeht, daß zwischen den Verzweigungspunkten für beide Widerstände die gleiche Spannung besteht und daß im unverzweigten Teil des Stromkreises vor und hinter der Verzweigung der Strom die gleiche Stromstärke haben muß.
3. Der Versuch kann in analoger Weise mit mehr als zwei parallelgeschalteten Widerständen ausgeführt werden.
4. Zur Systematisierung sollte man den Vergleich zu V 4.1.2. durchführen.

Versuch

Zwei Widerstände werden nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.1./1 parallelgeschaltet. Die Meßgeräte werden in den verzweigten Stromkreis geschaltet.

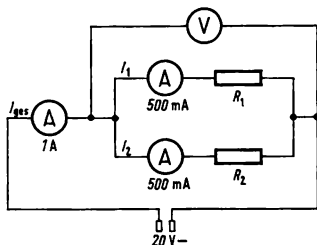


Abb. 4.2.1./1

Parallelschaltung von Widerständen

Die Spannung U wird gemessen. Sie ist für beide Zweige gleich. Die Summe der beiden Zweigstromstärken $I_1 + I_2$ wird mit der Gesamtstromstärke I_{ges} verglichen. Sie sind mit großer Näherung gleich:

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2.$$

Indem man beide Seiten dieser Gleichung durch die konstante Spannung U dividiert, erhält man den Ersatzwiderstand für zwei parallelgeschaltete Widerstände:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Bemerkungen

1. Falls man mit einer Meßbrücke die Widerstände mißt, um die Gesetze

$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ und $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ zu bestätigen, erhält man vom Versuch abweichende Werte, weil der Gerätewiderstand der Strommesser (500 mA) 2Ω beträgt. Man muß, um das zu vermeiden, die Widerstände der beiden Zweige (Widerstand und Strommesser) messen.

2. Zur Festigung und Wiederholung der Kenntnisse dieser Gesetzmäßigkeit ist es zweckmäßig, die beiden Widerstände durch Drehwiderstände zu ersetzen, die man auf verschiedene Werte einstellen kann.

4.2.2. Stromverzweigung in Glühlampen

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (6 V —) | 3. 2 Glühlampen (6 V; 0,1 A) |
| 2. 2 Glühlampen (6 V; 0,4 A) | 4. 3 Strommesser (1 A oder 500 mA) |

Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann an Stelle von V 4.2.1. ausgeführt werden oder aber zur Wiederholung dienen.
2. Im Vergleich zu V 4.1.3. zeigt er, wie Glühlampen unterschiedlicher Leistung mit gleicher Nennspannung geschaltet werden müssen.

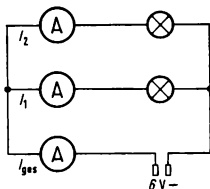


Abb. 4.2.2./1
Parallelschaltung von Glühlampen


Versuch

Nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.2./1 werden zwei Glühlampen gleicher Nennspannung mit gleicher oder unterschiedlicher Leistung parallelgeschaltet. Jede leuchtet mit der gleichen Helligkeit, als wenn sie allein an die gleiche Spannung gelegt wird.

Aus der Messung der Stromstärken ergibt sich, daß die Summe der Zweigstromstärken gleich der Gesamtstromstärke ist.



4.2.3. Modell des Stromkreises einer Wohnung

1. Schaltbrett , dazu erforderliches Material:
 - a) Brett (etwa 1000 mm × 300 mm)
 - b) Schmelzsicherung mit Fassung
 - c) 4 Abzweigdosen
 - d) 3 Lampenfassungen
 - e) 12 Telefonbuchsen
 - f) 6 Kurzschlußstecker (20 mm)
 - g) 4 Geräteklemmen
 - h) Kabel (zweiadrig)
 - i) Schellen
 - k) Ein-Aus-Schalter
 - l) Serienschalter
 - m) 3 Steckdosen
2. Strommesser (1 A; 10 A)
3. Spannungsmesser (250 V)
4. elektrische Haushaltsgeräte
5. Glühlampen (220 V; verschiedene Leistungen)

Methodische Hinweise

1. Das Modell soll den Schülern die Parallelschaltung aller Geräte und Lampen im Versorgungsnetz zeigen und sie außerdem mit der Leistungsaufnahme der Haushaltsgeräte und der Funktion der Sicherung vertraut machen. Dadurch wird die Anwendung der Erkenntnisse aus V 4.2.1. und 4.2.2. in der Praxis gezeigt.
2. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit klemmt man das Grundbrett zweckmäßigerweise zwischen zwei Stativen in vertikaler Stellung fest.

Herstellung des Modells

Nach dem in Abbildung 4.2.3./1 dargestellten Schaltplan wird auf einem Brett das Modell des Leitungsnetzes einer Wohnung installiert. In die Hauptleitung wird eine Sicherungsfassung mit einer Sicherung (6 A) gelegt. Von dort aus wird die Leitung zu vier Abzweigboxen geführt. Es ist zweckmäßig, drei Steckdosen anzuschließen, so daß man durch gleichzeitiges Anschließen von drei Elektrogeräten, etwa einer Kochplatte, eines Bügeleisens und eines Heizofens, eine Überbelastung und ein Durchschmelzen der Sicherung herbeiführen kann. Von der vierten Abzweigbox führt eine Leitung über einen einfachen Schalter zu einer Glühlampe. Die Hauptleitung läuft aus in eine Serienschaltung. Darin sind zwei Glühlampen mit einer dritten parallel geschaltet.

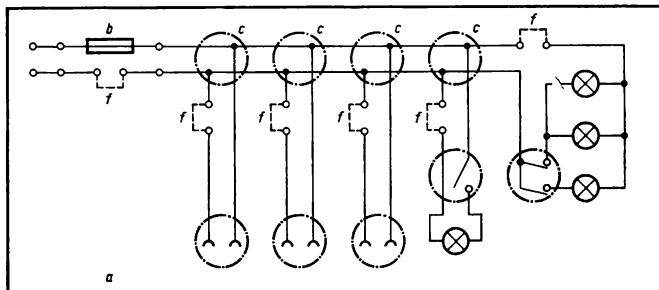


Abb. 4.2.3./1
Schaltplan für das Modell eines Wohnungsstromkreises

Die Hauptleitung und die Zuleitungen zu den einzelnen elektrischen Geräten werden unterbrochen und an den Unterbrechungsstellen mit je zwei Steckbuchsen versehen, deren Längsachsen voneinander einen Abstand von je 20 mm haben. Die Steckbuchsen werden durch je einen Kurzschlußstecker miteinander verbunden. Sie ermöglichen den Anschluß von Strommessern zum Durchführen quantitativer Versuche. Dabei ist auf den Arbeitsschutz zu achten und nicht in die Schaltung einzugreifen, wenn sie unter Spannung steht.

Versuch

Beim Durchführen des Versuches kann man Glühlampen verschiedener Leistungsaufnahme verwenden und eine Reihe von elektrischen Geräten anschließen, z. B. eine Tischleuchte, ein Heizkissen, einen Tauchsieder, eine Heißluftdusche, eine Kochplatte, ein Bügeleisen, eine Heizsonne u. a. m. Man kann den Versuch zu einem quantitativen ausweiten, wenn man die Stromstärke in jedem einzelnen Stromzweig und in den Hauptleitungen mißt. Sobald die Summe der Teilstromstärken 6 A übersteigt, schmilzt die Sicherung durch.

4.2.4. Einfluß eines Spannungsmessers auf das Meßergebnis

1. Stromversorgungsgerät (1 V —)
2. 2 Spannungsmesser (1 V —)
3. Widerstand (1 k Ω)

Methodische Hinweise

1. Da Spannungsmesser große Innenwiderstände haben und die Gerätetromstärken in der Größenordnung von 1 mA liegen, treten durch sie wesentliche systematische Meßfehler nur auf, wenn Spannungen hinter großen Widerständen im Stromkreis gemessen werden.
2. Vergleiche MH V 4.1.5. und 4.1.6.!

Versuch 1

Man schließt direkt an das Stromversorgungsgerät einen Spannungsmesser an (Abb. 4.2.4./1). Dann schaltet man den zweiten Spannungsmesser ein. Der Ausschlag des ersten Spannungsmessers ändert sich nicht. Beide Geräte zeigen im Bereich der Gerätetoleranz gleiche Spannungen an.

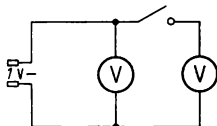


Abb. 4.2.4./1
Spannungsmessung mit zwei Spannungsmessern

Versuch 2

zwischen das Stromversorgungsgerät und die beiden Spannungsmesser schaltet man einen Widerstand von 1 k Ω (Abb. 4.2.4./2). Bei einer Klemmenspannung von 1 V am Stromversorgungsgerät zeigt der erste Spannungsmesser etwa 0,5 V an. Schaltet man den zweiten Spannungsmesser ein, zeigen beide nur noch eine Spannung von etwa 0,34 V an.

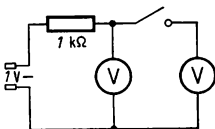


Abb. 4.2.4./2
Spannungsmessung hinter großen Widerständen

Bemerkung

Der Versuch läßt sich auch ausführen, wenn man ohne einen Widerstand einen und zwei Spannungsmesser direkt an die wenig belastbaren Ausgänge für Gitterspannungen anschließt.

4.2.5. Meßbereichserweiterung von Strommessern [SE]

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. 2 Vielfachmeßgeräte (10 mA; 25 mA; 100 mA)
3. Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
4. Drehwiderstand (100 Ω)
5. Glühlampe (6 V; 0,1 A)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5. oder

an Stelle von 4. 3 Dekadenwiderstände ($10 \times 10,0 \Omega$; $10 \times 1,0 \Omega$; $10 \times 0,1 \Omega$)

Methodische Hinweise

1. Bei der Meßbereichserweiterung wird das Stromverzweigungsgesetz technisch angewendet. Ihre experimentelle Durchführung dient der Festigung der Kenntnisse, und gleichzeitig wird die Konstruktion von Vielfachmeßgeräten erklärt.
2. Vergleiche MH V 4.1.6.!
3. Es wird empfohlen, Meßbereichserweiterungen an Vielfachmeßgeräten bei kleinen Meßbereichen vorzunehmen, weil durch die verhältnismäßig großen Gerätewiderstände Drehwiderstände als Nebenwiderstände benutzt werden können.

Variante a

Der Meßbereich eines Strommessers mit einer Widerstandskonstante $1000 \frac{\Omega}{V}$ soll von 10 mA auf 25 mA erweitert werden. Man baut eine Schaltung nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.5./1 auf. Darin liegen in Reihe das Meßgerät mit dem Meßbereich 10 mA, zur Kontrolle das Meßgerät mit dem Meßbereich 25 mA sowie eine Glühlampe 6 V; 0,1 A. Parallel zu dem Meßgerät mit dem Meßbereich 10 mA wird als Nebenwiderstand ein Drehwiderstand (100 Ω) geschaltet, der zunächst auf Null gestellt wird. Das Meßgerät zeigt jetzt keinen Strom an. Nach dem Einschalten stellt man die Spannung mit Hilfe des vorgeschalteten Spannungsteilers so ein, daß am Strommesser (Meßbereich 25 mA) eine Stromstärke von etwa 12,5 mA angezeigt wird.

Man stellt dann den Nebenwiderstand so ein, daß beide Meßgeräte den gleichen Zeigerausschlag haben. Wenn man die Spannung ändert oder eine zweite Glühlampe parallel zur ersten schaltet, um die Stromstärke zu ändern, haben beide Strommesser immer den gleichen Zeigerausschlag.

In analoger Weise kann man den Meßbereich eines Strommessers von 25 mA auf 100 mA ändern.

Variante b

Für die in Variante a experimentell durchgeführten Meßbereichserweiterungen kann man die Größe der Nebenwiderstände vorausberechnen.

Diese werden dann aus Dekadenwiderständen zusammengesetzt, oder ein Drehwiderstand wird auf den erforderlichen Wert mit Hilfe einer Widerstandsmeßbrücke eingestellt. Diese Nebenwiderstände werden in die Schaltung nach Abbil-

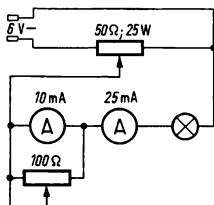


Abb. 4.2.5./1
Meßbereichserweiterung eines Strommessers

dung 4.2.5./1 eingesetzt. Mit Hilfe des Kontrollgerätes mit dem Meßbereich, der durch die Meßbereichserweiterung herbeigeführt werden soll, wird die Richtigkeit der Berechnung bei verschiedenen Stromstärken wie in Variante a überprüft.

Beispiele für die Berechnung

Ein Meßgerät mit der Widerstandskonstanten $1000 \frac{\Omega}{V}$ hat bei allen Gleichstrommeßgeräten einen Spannungsabfall von 1 V. Das Meßgerät hat bei einem Meßbereich von 10 mA einen Innenwiderstand $R_i = \frac{1 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 100 \Omega$.

Der Gesamtwiderstand nach der Erweiterung auf 25 mA muß sein:

$$R_{\text{ges}} = \frac{1 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 40 \Omega.$$

Die Größe des Nebenwiderstandes ist zu berechnen:

$$R_N = \frac{R_i \cdot R_{\text{ges}}}{R_i - R_{\text{ges}}}$$

$$R_N = \frac{100 \cdot 40}{100 - 40} \Omega$$

$$R_N \approx 67 \Omega.$$

Für die Erweiterung von 25 mA auf 100 mA ist $R_i = 40 \Omega$; $R_{\text{ges}} = 10 \Omega$;
 $R_N \approx 13 \Omega$.

Es ist zu beachten, daß die Übergangs- und Leitungswiderstände beim Anschluß der Nebenwiderstände die Größenordnung von 0,1 Ω haben können.

4.2.6. Spannung und Stromstärke in der Spannungsteilerschaltung — Wirkungsgrad

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (300 Ω) oder Drehwiderstand (50 Ω ; 25 W)
3. Spannungsmesser (10 V)
4. 3 Strommesser (1 A)
5. Glühlampen (6 V; 0,4 A)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH 4.1.8.1
2. Zur Einführung der Spannungsteilerschaltung sollte man möglichst einen Gleitwiderstand benutzen, weil hier die beiden Teilwiderstände für die Schüler klarer zu erkennen sind als an einem Drehwiderstand.
3. Es muß herausgearbeitet werden, daß ein Spannungsteiler immer von einem Querstrom durchflossen wird und daß Unterschiede zur Schaltung mit einem Vorwiderstand bestehen.

Versuch 1: Untersuchung der Spannungen

Nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.6./1 wird eine Spannungsteilerschaltung aufgebaut. Ein Spannungsmesser zeigt die Gesamtspannung U_{ges} an. Mit den beiden anderen mißt man die Teilspannungen U_1 und U_2 . Schiebt man den Gleitkontakt von seiner linken Einstellung bis in seine rechte, so steigt U_1 von Null bis auf U_{ges} , und U_2 sinkt von U_{ges} auf Null. Die Summe der Teilspannungen ist immer gleich der Gesamtspannung.

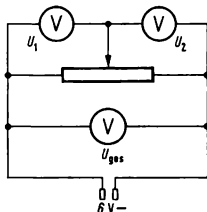


Abb. 4.2.6./1
Untersuchung einer Spannungsteilerschaltung

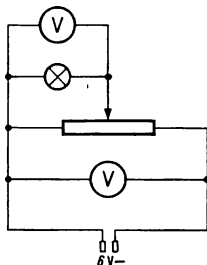


Abb. 4.2.6./2
Spannungseinstellung mit Spannungsteilerschaltung

Versuch 2: Einstellen von Spannungen

Die Versuchsanordnung wird entsprechend dem Schaltplan in Abbildung 4.2.6./2 geändert. Über dem Teilwiderstand wird die Spannung U_1 zum Betrieb einer Glühlampe abgegriffen. Die Spannung kann von Null bis auf U_{ges} stufenlos eingestellt werden.

Versuch 3: Untersuchung von Stromstärken

In die Schaltung werden entsprechend dem Schaltplan in Abbildung 4.2.6./3 Strommesser geschaltet. Sie zeigen die Stromstärke I_{ges} des Gesamtstromes, die Stromstärke I_N des Nutzstromes und die Stromstärke I_Q des Querstromes an. Die Stromstärke des Querstromes bleibt bei einer Änderung der Stellung des Gleitkontaktes nahezu konstant. Die Stromstärken des Nutzstromes und des Gesamtstromes werden größer, wenn man den Gleitkontakt so verschiebt, daß die Spannung an der Glühlampe größer wird.

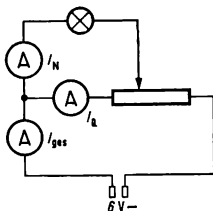


Abb. 4.2.6./3
Stromstärkemessung
in der Spannungsteilerschaltung

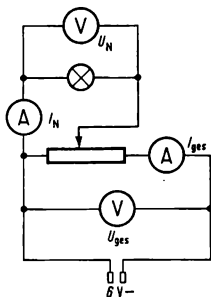


Abb. 4.2.6./4
Bestimmung des Wirkungsgrades η
einer Spannungsteilerschaltung

Versuch 4: Wirkungsgrad

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades werden Spannungs- und Strommesser nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.6./4 geschaltet. Es werden die Gesamtspannung U_{ges} , die Gesamtstromstärke I_{ges} , die Nutzspannung U_N und die Nutzstromstärke I_N gemessen. Die Werte bei verschiedenen Stellungen des Gleitkontaktes werden in eine Tabelle eingetragen und die Gesamtleistung P_{ges} , die Nutzleistung P_N und der Wirkungsgrad η berechnet:

$$\eta = \frac{U_N \cdot I_N}{U_{ges} \cdot I_{ges}} = \frac{P_N}{P_{ges}}.$$

Der Wirkungsgrad einer Spannungsteilerschaltung ist bei gleicher Nutzleistung immer schlechter als bei einer Schaltung mit Vorwiderständen nach V 4.1.8., weil infolge des Querstromes eine zusätzliche „Verlustleistung“ auftritt. Die Spannungsteilerschaltung hat aber den Vorteil, daß die Spannung von Null bis zur Klemmenspannung des Stromversorgungsgerätes eingestellt werden kann.

Am Spannungsteiler ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{I_{ges} \cdot U_{ges} - I_{ges} \cdot U_2 - I_Q \cdot U_N}{I_{ges} \cdot U_{ges}}$$

$$\eta = \frac{U_{ges} - U_2}{U_{ges}} - \frac{I_Q \cdot U_N}{I_{ges} \cdot U_{ges}}.$$

Bei einem Vorwiderstand ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{U_{ges} - U_2}{U_{ges}}.$$

Bemerkung

Bei der Auswahl eines Widerstandes für eine Spannungsteilerschaltung ist darauf

zu achten, daß seine zulässige Stromstärke nicht kleiner ist als die Summe aus der maximalen Nutzstromstärke

$$I_N = \frac{U_{ges}}{R_N} \text{ und der Querstromstärke}$$

$$I_Q = \frac{U_{ges}}{R_{ges}},$$

weil sonst beim Einstellen von Nutzspannungen, die nur wenig kleiner als die Gesamtspannung sind, die Wicklungen am Ende des Widerstandes, die vom Gesamtstrom durchflossen werden, glühen und durchbrennen können.

Man sollte aber auch keinen Widerstand mit erheblich größerer zulässiger Stromstärke benutzen, weil dieser bei den in Schulversuchen gebräuchlichen Gleitwiderständen einen kleinen Widerstand und damit eine große Querstromstärke hat.

5. Das konstante elektrische Feld

5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.0. In diesem Kapitel sind Versuche zum konstanten elektrischen Feld beschrieben, zu einem Gebiet, das man kurz als **Elektrostatik** bezeichnet. Im Unterricht der allgemeinbildenden Schule hat es die Aufgabe, grundlegende Vorstellungen, Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten der Elektrizitätslehre zu vermitteln.

Eine große Anzahl der Versuche kann mit einfachsten Mitteln durchgeführt werden. Dadurch werden die Schüler zum selbständigen Experimentieren angeregt. Andere Experimente aus diesem Kapitel erfordern einen größeren Aufwand an Geräten und Erfahrungen im Experimentieren.

Für die meisten Experimente zur Elektrostatik reichen die üblichen Stromversorgungsgeräte nicht aus, da man Hochspannung benötigt. Als Spannungsquellen benutzt man die Influenzmaschine (Abb. 1.1.7./2), den Bandgenerator (Abb. 1.1.7./1) oder ein Stromversorgungsgerät für Hochspannung. Für viele Versuche eignet sich auch ein piezoelektrischer Gasanzünder, den man für diese Zwecke so verändert, daß seine Elektrode zugänglich ist.

Um den Schülern zu zeigen, daß zum Experimentieren nicht immer komplizierte Geräte erforderlich sind, sollte man nach Möglichkeit des öfteren als Hochspannungsquelle einen geriebenen PVC-Stab oder dergleichen verwenden.

Als Anzeige- und Meßgerät für Hochspannungen stehen Elektroskope und Elektrometer verschiedener Bauart zur Verfügung. Besonders empfindlich sind Aluminiumblatt-Kastenelektroskope. Das Wulf-Elektroskop besitzt den Vorteil, daß es durch reichhaltiges Zubehör vielseitig eingesetzt werden kann. Es empfiehlt sich, die Sichtbarkeit der Ausschläge von Elektrometern und Elektroskopen durch Schattenprojektion zu erhöhen.

Das Gelingen elektrostatischer Experimente hängt in hohem Maße von der Luftfeuchtigkeit ab. Da im Unterrichtsraum infolge der Anwesenheit vieler Personen der Feuchtigkeitsgehalt der Luft oftmals sehr hoch ist, muß man dafür sorgen, daß die Isolatoren der Experimentiergeräte möglichst trocken sind. Das erreicht man durch Abwischen mit einem trockenen Tuch, durch vorsichtiges Bestrahlen mit einem Infrarotstrahler oder durch Befächeln mit einer Flamme. Das Absetzen von Kondenswasser an den Isolatoren vermeidet man auch dadurch, daß man die Experimentiergeräte nicht unmittelbar aus einem kalten in einen warmen Raum bringt. Zur Vermeidung von Ladungsverlusten durch Sprühwirkung infolge anhaftender Staubteilchen wischt man auch die Metallteile der Experimentiergeräte mit einem trockenen Tuch ab.

5.0.1. Im Abschnitt 5.1. werden Experimente zu den Begriffen *Ladung* und *Spannung* beschrieben.

Zur Durchführung quantitativer Untersuchungen wird ein geeichtes ballistisches Galvanometer benötigt. Im V 5.1.3. werden verschiedene Verfahren zum Eichen eines empfindlichen Galvanometers beschrieben.

5.0.2. Der Abschnitt 5.2. faßt qualitative und quantitative Experimente zum elektrischen Feld und zur Feldstärke zusammen. Besonderen Wert sollte man hierbei darauf legen, den Schülern klarzumachen, daß Feldlinien Modelle sind. Für quantitative Experimente steht das Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern zur Verfügung (Abb. 5.0.2./1). Es ist eine Drehwaage, bei der die Feldkräfte mit Hilfe von Torsionskräften verglichen bzw. gemessen werden.

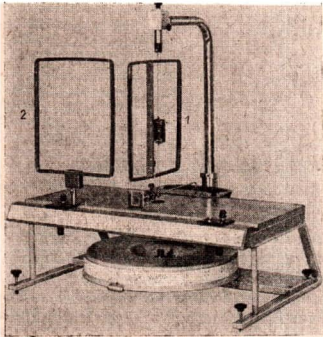


Abb. 5.0.2./1
Gerät für Messungen in elektrischen
und magnetischen Feldern

Im allgemeinen reichen im Unterricht der Oberschulen quantitative Vergleiche, bei denen die Beträge der Kräfte in Skalenteilen ermittelt werden, aus. Sollen die Kräfte in den gesetzlichen Einheiten gemessen werden, so erfordert dies ein vorheriges Eichen des Gerätes, das recht aufwendig ist. In allen Fällen sollte das Gerät bereits vor Beginn des Unterrichts, wie im V 5.1.7. beschrieben, genau justiert werden.

Außer den unter 5.0.0. genannten Hochspannungsquellen kann man bei Versuchen zum Nachweis der Spitzenwirkung an geladenen Körpern auch einen Tesla-Transformator verwenden.

5.0.3. Im Abschnitt 5.3. werden unter der Überschrift *Kapazität* sehr verschiedenartige Experimente mit Kondensatoren beschrieben, wobei die Versuche von der allgemeinen Definition der Kapazität über den Plattenkondensator bis zur Anwendung technischer Kondensatoren reichen. Dieser Abschnitt gibt dem Lehrer viele Anregungen, den Schülern den Zusammenhang zwischen physikalischem Prinzip und technischer Anwendung bewußtzumachen.

Experimente zur Wirkungsweise des Kondensators im Wechselstromkreis sind im 9. Teil der Physikalischen Schulversuche beschrieben.

5.0.4. Der Abschnitt 5.4. behandelt mit seinen Versuchen ein rein elektrostatisches Thema, die elektrische Influenz. Er beschränkt sich auf 4 Versuche, die alles Wesentliche zur Influenz enthalten.

5.1. Ladung — Spannung

5.1.1. Nachweis der Ladung [SE]

Zu Variante a

1. PVC-Stab
2. Glasstab
3. Dederon- oder Wolltuch
4. Seidentuch
5. Papierschnitzel

Zu Variante b

Geräte 1. bis 4.

Zu Variante c

Geräte 1. bis 4., außerdem

6. Bandgenerator mit Aufsteckelektroskop
7. Kastenelektroskop oder Wulfsches Elektroskop oder Braunsches Elektrometer

Methodische Hinweise

1. Die Variante a kann mit einer historischen Betrachtung über die Herkunft des Begriffs „Elektrizität“ verknüpft werden; denn die anziehenden Kräfte wurden schon im Altertum beim Bernstein (griechisch: elektron) beobachtet.
2. Bei den Versuchen nutzt man die Kenntnisse der Schüler über elektrische Erscheinungen im Alltag (Kleidungsstücke aus Kunstfasern, trockenes Haar, Füllhalter usw.).
3. Siehe auch V 5.2.1.1

Variante a: Nachweis mit Papierschnitzeln

Man reibt einen PVC-Stab mit einem Dederon- oder Wolltuch bzw. einen Glasstab mit einem Seidentuch. Hält man den geriebenen Stab über kleine Papierschnitzel, so werden sie von ihm angezogen und gleich darauf wieder abgestoßen. Man erkennt daran, daß der Stab elektrisch geladen ist.

Variante b: Nachweis mit einem Wasserstrahl

Nähert man einen nach Variante a geriebenen Stab einem dünnen Wasserstrahl, so wird dieser in Richtung zum Stab hin abgelenkt.

Variante c: Nachweis mit einem Elektroskop

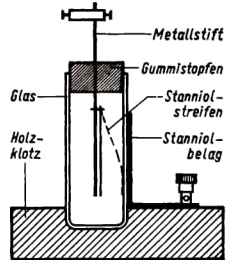
Auf die Metallkappe eines Bandgenerators wird das dazugehörige kleine Elektroskopgesteckt. Lädt man die Kappe auf, so spreizen sich die Kügelchen des Elektroskops ab und zeigen dadurch das Vorhandensein einer Ladung an.

Verbindet man einen Pol einer Hochspannungsquelle (Bandgenerator, Influenzmaschine) oder einen elektrisch geladenen Körper mit der Anzeigevorrichtung eines Elektroskops oder Elektrometers beliebiger Bauart, so wird dessen beweglicher Teil infolge der abstoßenden Kräfte gleichartiger Ladungen ausgelenkt.

Bemerkungen

1. Ein behelfsmäßiges Elektroskop kann man nach Abbildung 5.1.1./1 aus einem Tablettenröhrchen, einem Gummistopfen, einem Metallstift und Aluminiumfolie oder Stanniol herstellen.
2. Bei Schülereperimenten verwendet man Teile aus dem SEG Elektrostatik.

Abb. 5.1.1./1
Behelfsmäßiges Elektroskop

**5.1.2. Laden und Entladen eines Konduktors**

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. hochempfindliche Galvanometer (z. B. Spiegelgalvanometer)
3. großer Kugelkonduktor auf Isolierfuß
4. 2 Fußklemmen

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient zum Nachweis, daß beim Übertragen von Ladungen von einem Körper auf einen anderen ein Strom fließt.
2. Zum Laden und Entladen eines Kondensators vgl. V 5.3.1.!

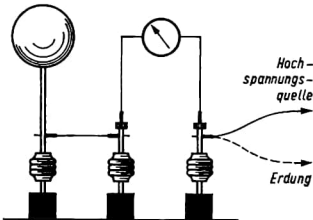


Abb. 5.1.2./1
Laden und Entladen eines Konduktors

Versuch

Ein Kugelkonduktor wird nach Abbildung 5.1.2./1 an einer Hochspannungsquelle aufgeladen und über eine Erdleitung wieder entladen. Mit einem in die Zuleitung geschalteten hochempfindlichen Galvanometer werden die Stromstöße beim Laden und beim Entladen sowie ihre entgegengesetzte Richtung nachgewiesen.

Bemerkung

Statt des Galvanometers kann zum qualitativen Nachweis der Ströme und ihrer Polarität eine Glimmlampe verwendet werden.

5.1.3. Eichen ballistischer Meßgeräte

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Strommesser (10 mA)
3. Gleitwiderstand (1300 Ω)
4. elektrische Demonstrationsstopuhr

Zu Variante b

Geräte 1. bis 3., außerdem

5. Impulszählgerät
6. Relais mit 2 Arbeitskontakten
7. Ein-Taster
8. Zweiweg-Gleichrichter

Zu Variante c

Gerät 1., außerdem

9. Spannungsmesser (1 V)
10. Spiegelgalvanometer oder empfindlicher Strommesser
11. Gleitwiderstand (300 Ω)
12. Meßwiderstand (10 k Ω)
13. Haltemagnet mit Stahlkugel
14. Kontaktplatte
15. Morsetaste
16. Meßstab

Zu Variante d

Geräte 1. und 10., außerdem

17. Spannungsmesser (3 V)
18. Meßwiderstand (1 M Ω)
19. Stimmgabel mit Schreibspitze
20. berußte Stahlplatte

Methodische Hinweise

1. Bei vielen Experimenten in der Schule ist es ausreichend, wenn man Ladungen quantitativ miteinander vergleichen kann. Man benutzt dann ein empfindliches Drehspulgerät als ballistisches Galvanometer und gibt die Meßwerte in Skalenteilen an. Für exakte Messungen ist jedoch eine vorherige Eichung des Gerätes in Amperesekunden erforderlich.
2. Man versteht unter einem Stromstoß das Integral $\int I \cdot dt$ oder das Produkt aus der mittleren Stromstärke und der Zeit, die in der Regel sehr kurz ist ($I \cdot \Delta t$). Stromstöße mißt man in Amperesekunden (A · s). Als Meßgeräte dienen Drehspulgeräte mit einer Schwingungsdauer, die sehr groß gegenüber der Dauer des Stromimpulses ist. Der Maximalausschlag ist dann proportional der durchgeflossenen Ladung. Fast alle Drehspulgeräte sind so weit gedämpft, daß man sie als ballistische Geräte ansehen kann.

Variante a: Elektrische Demonstrationsstoppuhr

In der Schaltung nach Abbildung 5.1.3./1 stellt man zunächst mit Hilfe des Spannungsteilers bei geschlossenem Stromkreis einen Dauerstrom mit einer Stromstärke von 5 mA ... 10 mA ein. Danach benutzt man in einigen Versuchen die Demonstrationsstoppuhr als Schalter für kurze Stromstöße, wobei man jeweils die Einschaltdauer und den dazu gehörigen ballistischen Ausschlag des Meßgerätes abliest. Es werden mehrere Versuchsreihen bei verschiedenen Stromstärken durchgeführt. Die Auswertung erfolgt, wie in Variante b beschrieben.

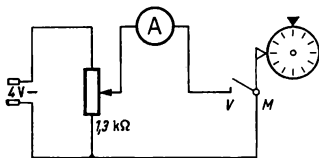


Abb. 5.1.3./1 Schaltung zum Eichen ballistischer Meßgeräte mit Hilfe einer elektrischen Stoppuhr

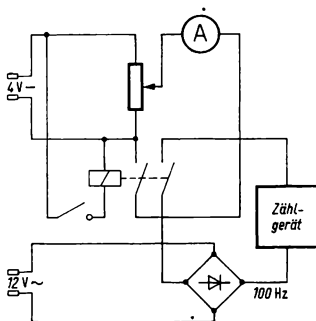


Abb. 5.1.3./2 Schaltung zum Eichen ballistischer Meßgeräte mit Hilfe eines Impulszählgerätes

Variante b: Impulszählgerät

Im Prinzip verläuft dieser Versuch wie die Variante a, nur daß in diesem Fall als Kurzzeitmesser ein Impulszählgerät verwendet wird, dem durch einen Zweiweg-Gleichrichter Impulse mit einer Frequenz von 100 Hz zugeführt werden. Das gleichzeitige Ein- und Ausschalten des ballistischen Meßgerätes und des Zählgerätes erfolgt mit Hilfe eines Relais mit zwei Arbeitskontakten (Abb. 5.1.3./2.)

In einem Versuch wurden folgende Meßwerte ermittelt:

I in mA	t in s	Q in mA · s	x in Skt
10	0,16	1,6	2,4
10	0,28	2,8	3,9
10	0,34	3,4	4,4
8	0,11	0,9	1,5
8	0,28	2,2	3,1
8	0,30	2,4	3,3
7	0,08	0,6	0,9
7	0,12	0,8	1,3
7	0,27	1,9	2,7

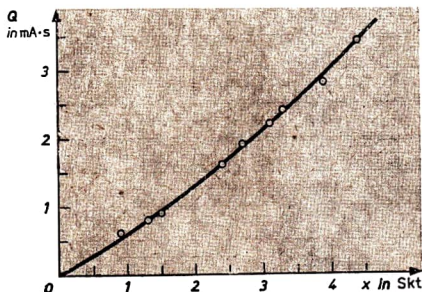


Abb. 5.1.3./3
Eichkurve für ein ballistisches Meßgerät

Da in diesem Falle keine exakte Proportionalität vorliegt, empfiehlt sich entweder die Anfertigung einer Eichkurve (Abb. 5.1.3./3) oder die Herstellung einer speziellen Skale für Stromstöße mit einer Teilung in Milliampere-sekunden.

Bemerkung

Wird der Digitalzähler „Polydigit“ verwendet, so entfällt die Zweiweg-Gleichrichterschaltung, da ein 100-Hz-Generator als Zeitmarkengeber eingebaut ist.

Variante c: Fallgerät

Die Versuchsanordnung stellt man nach Abbildung 5.1.3./4 aus den angeführten Geräten zusammen. Man drückt die Morsetaste ruckartig nieder und schaltet dadurch den durch den Haltemagnet fließenden Strom aus; gleichzeitig wird der zum Spannungsteiler führende Stromkreis geschlossen. Er wird kurz danach durch die fallende Kugel wieder unterbrochen. In der kurzen dazwischen liegenden Zeit fließt durch das Galvanometer ein Strom. Man beobachtet den Stromausschlag und

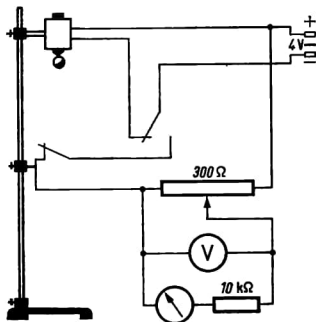


Abb. 5.1.3./4
Schaltung zum Eichn ballistischer Meßgeräte mit Hilfe eines Fallgerätes

stellt die Anzahl der Skalenteile fest, die der Lichtzeiger bzw. Zeiger bis zum Umkehrpunkt erreicht. Die Stromstärke berechnet man nach dem Ohmschen Gesetz, wobei man von der am Spannungsteiler eingestellten Spannung ausgeht.

Beispiel für eine Eichung

Abgegriffene Spannung am Spannungsteiler: $U = 0,38 \text{ V}$

Vorschaltwiderstand im Galvanometerkreis: $R = 10000 \text{ } \Omega$

Stromstärke im Galvanometerkreis: $I = \frac{U}{R} = \frac{0,38 \text{ V}}{10000 \text{ } \Omega} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ A}$

Fallstrecke der Kugel: $h = \frac{g}{2} \cdot t^2 = 0,25 \text{ m}$

Fallzeit $t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,25 \text{ m}}{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \approx 0,22 \text{ s}$

Stromstoß: $Q = I \cdot \Delta t = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot 0,22 \text{ s} \approx 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{s}$

Skalenabstand: $r = 1 \text{ m}$

Ballistischer Ausschlag: $x = 20 \text{ mm}$

Die ballistische Empfindlichkeit des Galvanometers beträgt bei einem Skalenabstand von 1 m also $4,2 \cdot 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$. Mit diesem Faktor sind alle gemessenen Ausschläge (in mm) zu multiplizieren, um die entsprechenden Stromstöße in Amperesekunden angeben zu können. So entspricht beispielsweise einem Ausschlag von 31 mm ein Stromstoß von $31 \text{ mm} \cdot 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{s}$.

Variante d: Stimmgabel mit Schreibspitze

Bei dieser Variante wird der Galvanometerstromkreis kurzzeitig von Hand geschlossen, indem man nach Abbildung 5.1.3./5 mit einer schwingenden Schreibstimmgabel über eine beruhte Stahlplatte streicht. Die Einschaltdauer errechnet sich als

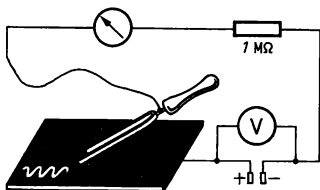


Abb. 5.1.3./5

Schaltung zum Eichen ballistischer Meßgeräte mit Hilfe einer Schreibstimmgabel

Quotient aus der Anzahl der aufgezeichneten Schwingungen n und der Frequenz f der Stimmgabel. Hierbei beachte man, daß die Einschaltdauer gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers klein sein muß.

Mit dieser Anordnung beobachtet man eine Reihe von Stoßausschlägen für verschiedene Produkte $I \cdot t$. Durch eine Auswertung der tabellarisch zusammengestellten Meßwerte findet man, daß der Ausschlag x in Skalenteilen der durchge-

flossenen Ladung $Q = I \cdot t$ proportional ist. Den Proportionalitätsfaktor $\frac{Q}{x}$ bezeichnet man als ballistische Empfindlichkeit des Galvanometers.

Die ballistische Empfindlichkeit bei der gewählten Meßreihe beträgt $1,93 \cdot 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{Skt}^{-1}$.

Zusammenstellung der Meßwerte für ein Beispiel

U in V	R in Ω	I in μA	n	f in Hz	t in s	$Q = I \cdot t$ in $\text{A} \cdot \text{s}$	x in Skt	$\frac{Q}{x}$ in $\text{A} \cdot \text{s}/\text{Skt}$
2,52	10^6	2,52	44	128	0,344	$8,66 \cdot 10^{-7}$	4,5	$1,92 \cdot 10^{-7}$
2,52	10^6	2,52	60	128	0,469	$11,8 \cdot 10^{-7}$	6	$1,97 \cdot 10^{-7}$
2,52	10^6	2,52	29	128	0,227	$5,72 \cdot 10^{-7}$	3	$1,91 \cdot 10^{-7}$
5,10	10^6	5,10	14,5	128	0,113	$5,76 \cdot 10^{-7}$	3	$1,92 \cdot 10^{-7}$

5.1.4. Ladungstrennung [SE]

Zu Variante a

1. PVC-Stab
2. Glasstab
3. Dederon- oder Wolltuch
4. Seidentuch
5. Elektroskop oder Elektrometer

Zu Variante b

Gerät 5., außerdem

6. Metallbecher
7. Glasstab mit Paraffinkugel
8. Faradaybecher auf Isolierfuß

Zu Variante c

Geräte 1., 3. und 5., außerdem

9. kreisförmige Kupferscheibe auf Isolierfuß
10. kreisförmige Zinkscheibe mit Isolierstiel

Methodische Hinweise

1. Mit diesen Versuchen wird die Ladungstrennung durch Berührung nachgewiesen. Die Reibung spielt bei Variante a nur eine untergeordnete Rolle. Es bildet sich zwischen den sich berührenden Körpern eine elektrische Doppelschicht aus. In dieser Doppelschicht werden Elektronen von dem einen an den anderen Körper abgegeben, so daß sich beide Körper als elektrisch geladen erweisen. Zwischen beiden Körpern entsteht eine Berührungsspannung. Die Reibung soll nur bewirken, daß der Abstand möglichst klein wird und sich die Berührung über eine möglichst große Fläche erstreckt.

Um den Schülern besonders die Bedeutung der Berührung für die Ladungstrennung bewußtzumachen, sollte man deshalb außer der Variante a noch Variante b oder c vorführen.

2. Bei Variante a sollte man auch die Ladung des Reibzeuges nachweisen, um dadurch den Begriff *Ladungstrennung* deutlich hervorzuheben.
3. Die Versuche bilden die Grundlage zur Erklärung der Wirkungsweise des Bandgenerators.

Variante a: Ladungstrennung durch Reibung

Ein PVC-Stab wird mit einem Dederon- oder Wolltuch bzw. ein Glasstab mit einem Seidentuch gerieben. Mit Hilfe eines Elektroskops werden die Ladungen von Stab und Reibzeug nachgewiesen.

Bemerkung

Wird der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt, so verwendet man dazu die entsprechenden Teile aus dem SEG Elektrostatik.

Variante b: Ladungstrennung zwischen einer Paraffinkugel und Wasser

Ein Metallbecher wird mit Wasser gefüllt und mit dem Gehäuse eines empfindlichen Elektroskops oder Elektrometers verbunden (Abb. 5.1.4./1). Man taucht eine an einem Glasstab befestigte Paraffinkugel in das Wasser. Zieht man sie wieder

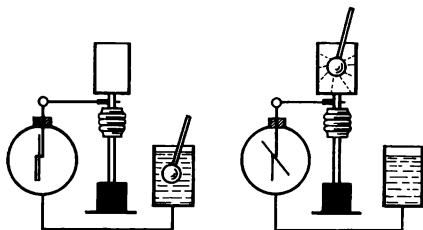


Abb. 5.1.4./1
Nachweis der Ladungstrennung
zwischen Paraffin und Wasser

heraus und berührt mit ihr die Innenfläche eines Faradaybechers, der mit dem Meßsystem des Elektroskops verbunden ist, so zeigt dieses einen kleinen Ausschlag, der bei mehrmaliger Wiederholung des Vorganges größer wird.

Variante c: Ladungstrennung beim Berühren zweier Metallplatten

Man verbindet eine isoliert aufgestellte ebene Kupferplatte mit dem Gehäuse eines empfindlichen Elektroskops (Abb. 5.1.4./2). Auf die Kupferplatte setzt man eine ebenso große Zinkplatte, die mit einem isolierenden Stiel versehen ist. Sie ist mit dem Meßsystem des Elektroskops verbunden. Beide Metallplatten sollten möglichst eben und sauber sein, damit eine innige Berührung zustande kommt. Hebt man die Zinkplatte ruckartig an, so entsteht ein Ausschlag. Mit Hilfe eines geriebenen PVC-Stabes läßt sich zeigen, daß der Ausschlag von positiver Elektrizität herrührt, d. h. auf Elektronenmangel zurückzuführen ist. Wiederholt man den Versuch, nachdem man beide Metallplatten untereinander vertauscht hat, so ist an der Zinkplatte eine negative Ladung nachweisbar.

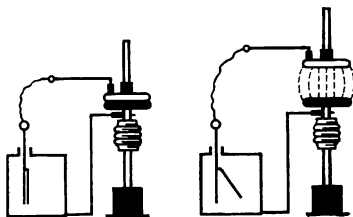


Abb. 5.1.4./2
Nachweis der Ladungstrennung
zwischen zwei Metallplatten

Bemerkung

In der Technik tritt die Ladungstrennung durch innige Berührung mitunter in Erscheinung. So können hohe Spannungen beispielsweise an Riementrieben, beim Auf- oder Abwickeln von Plastfolien und Textilstoffen oder an Kraftfahrzeugreifen entstehen. In vielen Fällen leitet man solche unerwünscht entstehenden Ladungen zur Erde ab, um die Gefahr einer Entzündung zu vermeiden. Um unerwünschte, störende Ladungen auf Schallplatten und auf Lackschichten beim Staubwischen zu vermeiden, benutzt man Antistatiktücher, die durch Imprägnieren mit geeigneten Chemikalien elektrisch leitfähig gemacht wurden.

5.1.5. Nachweis positiver und negativer Ladung mit einer Glimmlampe [SE]

1. Glimmlampe oder Spannungsprüfer
2. geladene Körper (z.B. Kappe des Bandgenerators, geriebener PVC-Stab, Kondensatorplatte usw.)

Methodische Hinweise

1. Die Verwendung einer Glimmlampe zum Nachweis von Ladungen ist vor allem dann zu empfehlen, wenn in einfacher Weise die Polarität bestimmt werden soll.
2. Um die Schüler zu selbstständigem Experimentieren anzuregen, zeigt man ihnen, daß auch bestimmte Plastfolien, Decelith-Zeichendreiecke usw. durch Reiben elektrisch negativ geladen werden.

Versuch

Man hält eine Glimmlampe oder einen Spannungsprüfer so in der Hand, daß die eine Elektrode mit dem menschlichen Körper leitend verbunden ist. Berührt man mit dem anderen Anschluß einen geladenen Körper, so leuchtet die jeweils negative Elektrode der Glimmlampe auf. Auf diese Weise wird die Polarität der Ladung des Körpers bestimmt.

Bemerkungen

1. Führt man den Versuch als Schülerexperiment durch, so werden die Teile des SEG Elektrostatik benutzt.

2. Man kann an einem geladenen PVC-Stab an verschiedenen Stellen mehrmals die Glimmlampe aufleuchten lassen und so zeigen, daß sich die Ladungen im PVC nicht ausbreiten.



5.1.6. Übertragen einer Ladung an einem Faradaybecher

Zu Versuch 1

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Faradaybecher auf Isolierfuß
3. Braunsches Elektrometer oder Aluminiumblatt-Kastenelektroskop
4. Probekugel an Isolierstab

Zu Versuch 2

5. Stromversorgungsgerät (200 V —)
6. 2 Fußklemmen
7. 2 Glühlampen (220 V; 15 W)
8. 2 Aluminiumblatt-Kastenelektroskope
9. Kugelkonduktor zum Aufstecken
10. Faradaybecher zum Aufstecken

Methodische Hinweise

1. Die Versuche zeigen, daß sich die Gesamtladung eines Körpers auf seiner Außenfläche verteilt, was auf die Abstoßung zwischen den gleichnamigen Teiladungen zurückzuführen ist.
2. Aus den Versuchen ergibt sich auch die Erklärung, weshalb die Ladung eines Bandgenerators an der Außenfläche seiner Metallkappe zu finden ist.
3. Die abschirmende Wirkung eines Faradayschen Käfigs kann ebenfalls mit Hilfe der hier nachgewiesenen Erscheinungen erklärt werden.

Versuch 1: Entnahme einer Ladung aus einem Faradaybecher

Man lädt einen isoliert aufgestellten Faradaybecher an einem Bandgenerator oder an einer Influenzmaschine auf (Abb. 5.1.6./1). Dem Faradaybecher entnimmt man durch Berühren mit einer Probekugel eine Ladung, die man auf ein weit entfernt stehendes Elektroskop überträgt. Man erhält nur dann einen Ausschlag, wenn man den Faradaybecher von außen berührt (Abb. 5.1.6./1a). Berührt man die Innenseite des Faradaybechers, so tritt am Elektroskop kein Ausschlag auf (Abb. 5.1.6./1b).

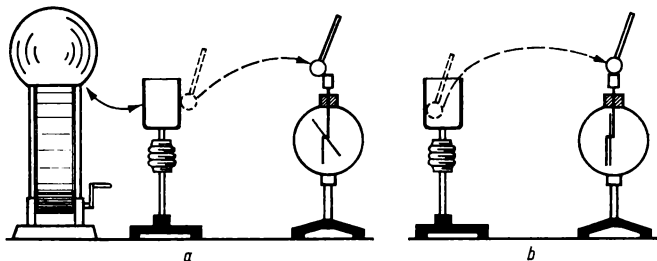


Abb. 5.1.6./1 Übertragung einer Ladung von einem Faradaybecher auf ein Elektroskop, a) Ladungsübertragung, b) keine Ladungsübertragung

Versuch 2: Übertragen einer Ladung auf einen Faradaybecher

Man schließt zwei Holtzsche Klemmen über je eine Glühlampe an eine Gleichspannung von 200 V eines Stromversorgungsgerätes an (Abb. 5.1.6./2). Zwischen die Fußklemmen stellt man zwei Aluminiumblatt-Kastenelektroskope, deren Gehäuse man untereinander verbindet und erdet. Auf das eine Elektroskop steckt man einen Kugelkonduktor, auf das andere einen Faradaybecher. Man stellt vorübergehend zwischen beiden eine leitende Verbindung her und berührt den Kugelkonduktor für einen Augenblick mit der unter Spannung stehenden Fußklemme. An den gleichen Ausschlägen der Elektroskope erkennt man, daß der Faradaybecher und der Kugelkonduktor die gleiche Spannung gegenüber der Erde haben (Abb. 5.1.6./2).

Berührt man zu wiederholten Malen den Kugelkonduktor mit der Probekugel und führt diese jedesmal in den Faradaybecher ein, so steigt der Ausschlag des Elektroskops am Becher über den Ausgangswert an, während der Ausschlag des anderen Elektroskops entsprechend absinkt (Abb. 5.1.6./3).

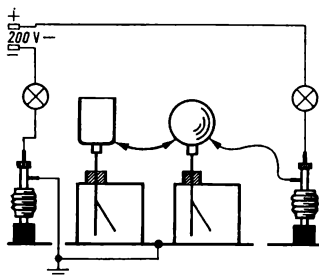


Abb. 5.1.6./2 Aufladen des Kugelkonduktors und des Faradaybechers auf gleiche Spannung

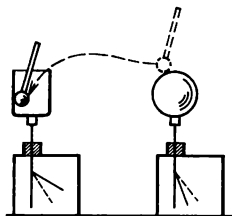
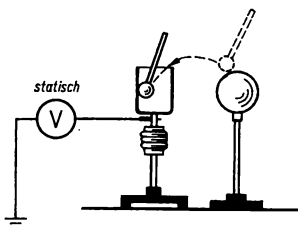


Abb. 5.1.6./3 Steigern des Zeigerausschlages eines Elektrometers durch Ladungsübertragung in einen Faradaybecher

Abb. 5.1.6./4 Nachweis der übertragenen Ladung durch einen statischen Spannungsmesser



Bemerkungen

1. An Stelle der Kastenelektroskope kann man auch einen elektrostatischen Spannungsmesser verwenden, den man mit dem Faradaybecher verbindet (Abb. 5.1.6./4).
2. Als Faradaybecher kann man den kleinen Zylinder der Ionisationskammer verwenden, die als Zubehör zum Wulf-Elektroskop geliefert wird.



5.1.7. Nachweis der Spannung

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (400 V —)
2. Elektroskop oder Elektrometer
3. 2 Glühlampen (220 V; 15 W)

Zu Variante b

4. Stromversorgungsgerät für Hochspannung (0 ... 6 kV)
5. Hochspannungsmeßgerät (5 kV)
6. Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern; Aufbauteile daraus:
 - a) Grundgerät mit unterem Spanndraht (\varnothing 0,15 mm)
 - b) Wirbelstromdämpfung
 - c) 2 Kondensatorplatten (\varnothing 80 mm)
 - d) 2 Kupplungstücke für Schlitten
 - e) Kugel (\varnothing 26 mm) mit Isolierstück für die Befestigung am Objektträger
 - f) 2 Lote

Methodischer Hinweis

In beiden Versuchen wird demonstriert, daß zwischen geladenen Körpern Kräfte wirken. Da die Spannung im elektrostatischen Feld als Quotient aus der Verschiebungsarbeit an einem Probekörper und der dabei bewegten Ladung definiert ist,

$U = \frac{W}{Q}$, ist die Spannung auch der Kraft F proportional. Diese Proportionalität

wird in der Variante b nachgewiesen, während in der Variante a die Spannungsmessung mit Hilfe eines Elektrometers erläutert wird.

Variante a: Verwendung eines Elektroskops oder eines Elektrometers

Man verbindet die beiden Gleichspannungsbuchsen (400 V) eines Stromversorgungsgerätes über je eine Glühlampe mit dem Meßsystem und mit dem Gehäuse eines Elektroskops oder Elektrometers (Abb. 5.1.7./1). Beim Aufladen ist ein Ausschlag des beweglichen Teils im Gerät zu beobachten. Die Lampen leuchten nicht. Zwischen den Polen der Spannungsquelle und damit auch zwischen Gehäuse und Meßsystem des Elektroskops herrscht eine Spannung. Es ist jedoch kein geschlossener Stromkreis vorhanden. Erst wenn man das Meßsystem des Elektroskops mit dem Gehäuse leitend verbindet, fließt ein Strom. Die Lampen leuchten.

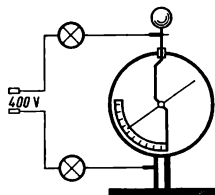


Abb. 5.1.7./1 Nachweis der Spannung mit einem Elektrometer

Variante b: Verwendung des Gerätes für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern

Justieren des Gerätes

Zunächst überprüft man, ob die Spannkraft der Torsionsdrähte richtig eingestellt ist. Die rote Anzeige am Spannkopf soll bei Verwendung des 0,15 mm starken unteren Drahtes bei 2 stehen. Besonders wichtig für einwandfreie Meßergebnisse ist die genaue Vertikalausrichtung des Torsionsdrahtes. Dazu werden die beiden kleinen Lote mittels ihrer Stifte am unteren Spannkopf befestigt. Mit Hilfe der Stellschrauben am Gerätetisch wird das Gerät so justiert, daß der Draht genau lotrecht verläuft.

Die Kugelelektrode wird mittels des Isolierstückes am Objektträger befestigt, und die Ausgleichsmasse am Dämpfungsgestänge wird so verschoben, daß der Dämpfungsflügel sich waagerecht bewegen kann. Dabei muß der untere Torsionsdraht innerhalb der Krümmung verlaufen, ohne den Stab zu berühren.

Der Skalentopf wird durch Verdrehen des unteren Zapfens auf Null gestellt. Da die genaue Einstellung oft viel Zeit beansprucht, kann man auch nur grob einstellen und den Nullfehler bei den Messungen berücksichtigen.

Versuchsdurchführung

Die beiden Kondensatorplatten werden über Kupplungsstücke leitend mit den Buchsen der Schlitten verbunden und im Abstand von etwa 12 cm voneinander aufgestellt (Abb. 5.1.7./2). An die Platten wird eine Hochspannung von 5 kV gelegt. Durch Drehen des Skalentopfes bringt man die Probekugel mit der positiven Platte zur Berührung. Die wirkende Kraft wird dadurch gemessen, daß man den Skalentopf so weit dreht, bis der Nullpunktanzeiger wieder hinter der Nullmarke steht. Am Skalentopf kann die Kraft in Skalenteilen abgelesen werden. Die Spannung zwischen den Platten wird schrittweise verringert und die jeweils wirkende Kraft gemessen. Während der Versuchsreihe soll die Ladung der Probekugel nicht geändert werden. Wenn ihre Ladung jedoch infolge großer Luftfeuchtigkeit zu schnell abnimmt, kann man sich dadurch helfen, daß man die Kugel vor jeder Einzelmessung bei einer Spannung von 5 kV erneut auflädt.

Beispiel für eine Meßreihe

U in kV	F in Skt.	$\frac{F}{U}$ in $\frac{\text{Skt.}}{\text{kV}}$
5	21	4,2
4	17	4,2
3	12	4,0
2	8	4,0
1	5	5,0

Die Auswertung ergibt, daß die Kraft der Spannung an den Kondensatorplatten proportional ist:

$$F \sim U \text{ für } Q_p = \text{konst.}$$

Bemerkungen

1. Vor dem Aufladen der Probekugel überprüfe man ihre genaue Mittellage sowie die Nullstellung, da störende Influenzerscheinungen bereits jetzt einen Ausschlag hervorrufen können. Es empfiehlt sich deshalb, eine eventuell vorhandene Influenzladung auf dem Isolierstück dadurch zu beseitigen, daß man es vorsichtig mit einer Flamme befächelt.
2. Zur besseren Demonstration der Nullpunktanzeige kann man den zum Gerät gehörenden kleinen Spiegel auf den Objektträger stecken und einen Lichtzeiger verwenden.

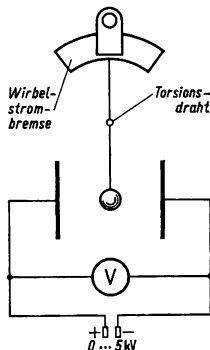


Abb. 5.1.7./2 Nachweis der Proportionalität zwischen Kraft und Spannung

5.1.8. Spannung zwischen zwei geladenen Körpern im selbständigen Feld

- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Bandgenerator oder Influenzmaschine | 3. 2 Kondensatorplatten |
| 2. Braunesches Elektrometer oder Elektroskop | 4. 2 Fußklemmen |

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 5.1.7.!
2. Der Versuch dient zum Nachweis, daß die Spannung zwischen zwei geladenen Körpern im selbständigen Feld vom gegenseitigen Abstand der Körper abhängt. Man kann ihn auch einsetzen, um die Arbeit bei der Ladungstrennung zu veranschaulichen und damit das elektrische Feld als Träger von Energie zu kennzeichnen.
3. Mit dem Versuch kann auch die Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators vom Plattenabstand qualitativ nachgewiesen werden (vgl. V 5.3.5.!).

Versuch

Zwei Kondensatorplatten auf Fußklemmen werden mit Meßsystem und Gehäuse eines Elektrometers verbunden (Abb. 5.1.8./1). Lädt man sie durch kurzzeitigen

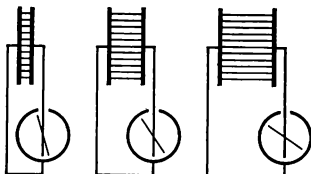


Abb. 5.1.8./1 Aufbau eines selbständigen Feldes zwischen zwei Kondensatorplatten

Anschluß an je einen Pol einer Hochspannungsquelle entgegengesetzt auf, so zeigt das Elektrometer die zwischen den Platten herrschende Spannung an. Entfernt man die Platten voneinander, so nimmt diese Spannung zu, wie man aus der Vergrößerung des Ausschlages ersieht. Der Versuch zeigt gleichzeitig, daß das Elektrometer keine Ladungen mißt, da die Ladungen während des Verschiebens nicht verändert werden.

5.1.9. Modellversuch zur Entstehung eines Gewitters

1. Braunsch'sches Elektrometer oder Kastenelektroskop
2. Fußklemme
3. flache Blechschale mit Mittelbohrung
4. Metallbecher
5. Gemisch von Schwefelblüte und Bleischrot
6. Luftdusche oder Luftstromerzeuger
7. PVC-Stab und Dederon- oder Wolltuch

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt die Entstehung einer Spannung durch Ladungstrennung infolge eines Luftstromes. In ähnlicher Weise kommt es bei einem Gewitter in einer heftigen aufwärts gerichteten Luftströmung zur Ladungstrennung zwischen Eisteilchen bzw. Regentropfen unterschiedlicher Größe. Da sich die entgegengesetzten Ladungen voneinander entfernen, entstehen sehr hohe Spannungen.

Vorversuch

Man füllt in ein Metallgefäß ein Gemisch von feinpulverisierter Schwefelblüte und Bleischrot und schüttelt die Bestandteile kräftig durcheinander.

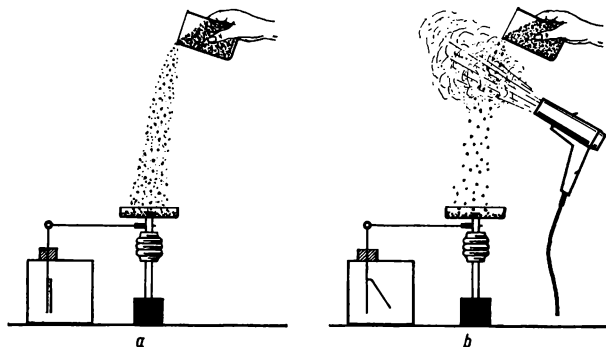


Abb. 5.1.9./1 Ladungstrennung zwischen Schwefelblüte und Bleischrot,
a) ungestörtes Herabfallen — keine Ladungstrennung,
b) seitliches Anblasen der fallenden Körper — Ladungstrennung

Hält man das Metallgefäß in einiger Entfernung über eine isoliert aufgestellte Metallschale, an die ein empfindliches Elektroskop angeschlossen ist, und läßt auf die Schale einen gleichmäßigen Strom von Bleischrot und Schwefelblüte herabfallen, so zeigt das Elektroskop keinen Ausschlag (Abb. 5.1.9./1a).

Hauptversuch

Man wiederholt den Versuch, richtet aber gegen die herabfallenden Körper von der Seite her den Luftstrom einer Luftdusche (Abb. 5.1.9./1b). Dadurch wird die Schwefelblüte zur Seite getrieben; sie wird von den Schrotkugeln getrennt. Sofort zeigt das Elektroskop einen Ausschlag.

Durch einen geriebenen PVC-Stab kann man nachweisen, daß das Elektroskop eine positive Ladung angenommen hat.

5.1.10. Experimente mit einem Isolierschemel

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Isolierschemel
3. Stadtgas- oder Propangasbrenner

Methodische Hinweise

1. Diese Experimente beeindrucken die Schüler besonders stark. Sie erkennen, daß elektrostatische Aufladungen auch am menschlichen Körper auftreten und wirksam werden können. Dadurch werden sie angeregt, genauer zu beobachten und auf Entladungserscheinungen beim Entkleiden oder beim Kämmen der Haare zu achten.
2. Um den Schülern einerseits die Angst vor den hier auftretenden Entladungserscheinungen zu nehmen, sie aber andererseits nicht zu Leichtsinn beim Umgang mit elektrischen Haushaltsgeräten zu veranlassen, sollte man ihnen klarmachen, daß hier zwar trotz einer Spannung von mehreren Hunderttausend Volt nur ein Strom sehr geringer Stromstärke fließen kann, bei den Haushaltsgeräten dagegen eine Spannung von 220 V herrscht, aber Stromstärken mit lebensgefährdender Wirkung auftreten können.

Versuch

Man wählt einen Schüler mit lockerem, möglichst frisch gewaschenem Haar. Er stellt sich auf den Isolierschemel und legt eine Hand auf den Konduktor des Bandgenerators und läßt sie dort auch während der Experimente. Die Erdungsbuchse des Generators verbindet man mit der Wasserleitung (nicht mit der Gasleitung!). Betätigt man den Bandgenerator einige Zeit, so wird der Schüler elektrisch aufgeladen. Dies kann man an verschiedenen Erscheinungen erkennen:

- a) Die Haare des Schülers sträuben sich. Nähert man ihnen eine Hand, dann bewegen sie sich auf die Hand zu (Richtung der Feldlinien).
- b) Hält der elektrisch aufgeladene Schüler seine Hand über die Haare eines anderen, so werden dessen Haare von der Hand angezogen.
- c) Reicht man dem Schüler die Hand, springt kurz vor der Berührung ein Funke über.

- d) Beim Annähern einer Fingerspitze an das Ohr, die Nasenspitze oder die Hand des auf dem Schemel stehenden Schülers erfolgt die Entladung durch Funkenüberschlag.
- e) Durch Funkenüberschlag kann der Schüler auch eine Gasflamme entzünden, wenn er bei geöffnetem Gashahn mit dem Finger rasch über die Öffnung des Brenners streicht.

Bemerkungen

1. Nach jeder Entladung muß der Bandgenerator neu betätigt werden.
2. Verwendet man statt des Bandgenerators die Influenzmaschine, so faßt der Schüler einen der Pole an. Den anderen erdet man.

5.2. Kräfte im elektrischen Feld

5.2.1. Kraftwirkungen zwischen geladenen Körpern

Zu Variante a

1. 2 PVC-Stäbe
2. 2 Glasstäbe
3. Reibzeug
(Dederongewebe, Seidengewebe)
4. Drahtbügel ⑨
5. Seiden- oder Dederonfaden
6. Glimmlampe oder Spannungsprüfer

Zu Variante b

- Geräte 1. bis 3. und 5., außerdem
7. 2 Holundermarkkugeln an Seidenfäden

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient dem Nachweis der Kraftwirkungen zwischen gleichnamig und ungleichnamig geladenen Körpern.
2. Vergleiche MH V 5.1.1.!

Variante a: Nachweis mit geladenen Stäben

Man faßt einen PVC-Stab in der Mitte und reibt seine beiden Enden mit einem Dederontuch. Dann legt man ihn in einen Drahtbügel, den man mit einem Seiden- oder Dederonfaden an einem Stativ aufgehängt hat. Danach reibt man den zweiten PVC-Stab mit dem Tuch und nähert ihn dem einen Ende des aufgehängten Stabes. Er wird abgestoßen (Abb. 5.2.1./1 a). Die gleiche Erscheinung beobachtet man auch, wenn man ihn dem anderen Ende nähert.

Das Experiment läuft in der gleichen Weise ab, wenn man statt der beiden PVC-Stäbe zwei Glasstäbe verwendet. Als Reibzeug eignet sich hierbei besonders ein Seidentuch.

Verwendet man dagegen einen PVC-Stab und einen Glasstab, so ziehen die beiden Stäbe einander an (Abb. 5.2.1./1 b). Sie sind ungleichnamig geladen. An dem Vor-

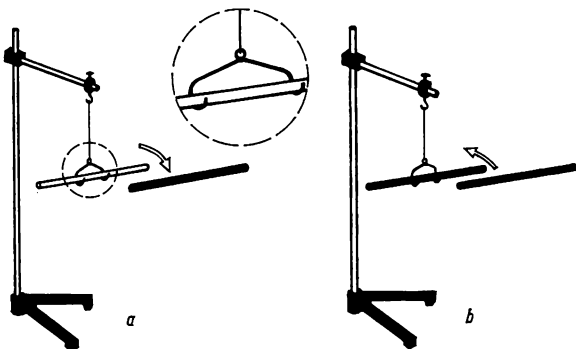


Abb. 5.2.1./1 Kraftwirkungen zwischen zwei elektrisch geladenen Stäben,
a) Abstoßung gleichnamiger Ladungen, b) Anziehung ungleichnamiger Ladungen

gang ändert sich nichts, wenn man die beiden Stäbe miteinander vertauscht. Die Polarität der Ladungen kann man so wie im V 5.1.5. mit einer Glühlampe oder einem Spannungsprüfer feststellen.

Bemerkungen

1. Bei der Ausführung als Schülerexperiment verwendet man Teile des SEG Elektrostatik. An Stelle des aufgehängten Stabes benutzt man die PVC-Platte, die man auf einem Magnetnadelträger (SEG Elektrik) mit T-Fuß (SEG Optik) drehbar lagert (Abb. 5.2.1./2). Bei der Annäherung des durch Reibung geladenen PVC-Stabes erfolgt Abstoßung, bei Annäherung des Reibzeuges Anziehung.
2. Man kann in der Variante a den PVC-Stab auch auf der Spitze eines Magnetnadelträgers drehbar lagern, indem man ihn in der Mitte durchbohrt und als

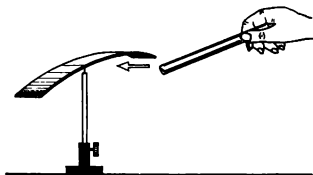


Abb. 5.2.1./2 Kraftwirkungen zwischen einer elektrisch geladenen PVC-Platte und einem geladenen PVC-Stab

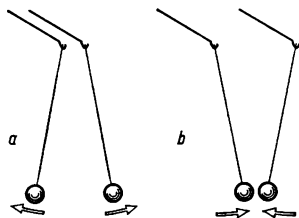


Abb. 5.2.1./3 Kraftwirkungen zwischen zwei elektrisch geladenen Holundermarkkugeln,
a) Abstoßung gleichnamiger Ladungen, b) Anziehung ungleichnamiger Ladungen

Lager ein kurzes Glasrohrstück einkittet, das man am oberen Ende zugeschmolzen hat.

3. Als Reibzeug kann für den PVC-Stab auch ein Fellstück oder ein Wolltuch benutzt werden.

Variante b: Nachweis mit geladenen Kugeln

Zwei Holundermarkkugeln werden an gleich langen Seiden- oder Dederonfäden an je einem Stativ aufgehängt und nebeneinandergestellt. Lädt man sie mit Hilfe eines PVC- oder Glasstabes gleichnamig auf, dann stoßen sie einander ab (Abb. 5.2.1./3a). Bei ungleichnamigen Ladungen ziehen sie einander an (Abb. 5.2.1./3b).

Bemerkung

Statt der Holundermarkkugeln kann man Weihnachtsbaumkugeln verwenden. Es eignen sich auch Tischtennisbälle, deren Oberflächen durch Überziehen mit Aluminiumfolie, durch metallischen Anstrich oder Graphit leitend gemacht worden sind. Die Aufhängefäden sollten hierbei möglichst lang sein.

5.2.2. Richtung der Kräfte im elektrischen Feld — Darstellung in einer Ebene

Zu Variante a

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. 2 quadratische Kondensatorplatten
3. Fußklemmen
4. Glasscheibe (etwa 25 cm × 35 cm)
5. 2 Rundholzstäbe (Ø 13 mm; Länge 40 cm)
6. 20 gekniffte Papierstreifen ⑧
7. 20 Papierstreifenträger ⑧, dazu erforderliches Material:
 - a) Stecknadeln
 - b) Flaschenkorken

Zu Variante b

- Geräte 1. und 3. bis 7., außerdem
8. 2 Klingelglocken auf Stielen

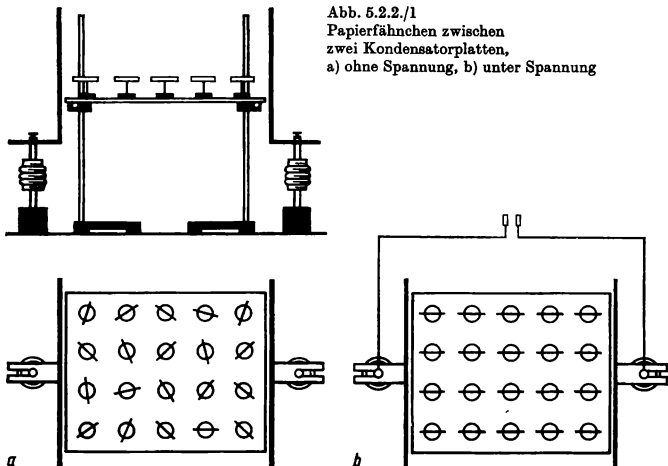
Zu Variante c

- Gerät 1., außerdem
9. Kugelleitender auf isoliertem Fuß
 10. Fäden aus Wolle oder synthetischen Fasern
 11. Gummiring (Paketgummi)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient der Einführung des Feldlinienbegriffs. Auf den Modellcharakter der Feldlinienvorstellung ist hinzuweisen.
2. Bei den hier beschriebenen Experimenten erfolgt die Darstellung der Kraftwirkungen jeweils nur in einer Ebene. Der räumliche Charakter des elektrischen Feldes zwischen den Kondensatorplatten kann nachgewiesen werden, indem man mehrere Ebenen nacheinander untersucht. Darüber hinaus sollte auch V 5.2.4. ausgeführt werden.

Abb. 5.2.2./1
Papierfähnchen zwischen
zwei Kondensatorplatten,
a) ohne Spannung, b) unter Spannung



Variante a: Papierfähnchen im homogenen Feld

Zwischen zwei vertikal stehenden Kondensatorplatten wird auf zwei von Stativen gehaltenen Rundholzstäben eine Glasscheibe horizontal gelagert. Auf dieser werden etwa 20 Papierfähnchen auf spitzen Trägern verteilt (Abb. 5.2.2./1).

Die Papierfähnchen stellt man aus 5 cm langen und 1 cm breiten Streifen her, die man der Länge nach knifft. Ihre Stabilität erhalten sie durch einen Querkniff (Abb. 5.2.2./2). Als Träger benutzt man Stecknadeln, die man mit Korkscheiben standfähig gemacht hat.

Die Fähnchen nehmen zunächst eine ganz beliebige Stellung ein (Abb. 5.2.2./1 a). Legt man an die Kondensatorplatten die Spannung einer Hochspannungsquelle, so stellen sich die Fähnchen alle so ein, daß die gedachten Verbindungslinien senkrecht auf den Kondensatorplatten stehen (Abb. 5.2.2./1 b).

Bemerkung

Damit die Schüler die Anordnung der Papierfähnchen besser überblicken können, empfiehlt es sich, über der Versuchsanordnung einen Spiegel unter einem Winkel von 45° anzubringen oder den Versuch mit dem Tageslichtschreibprojektor zu projizieren.

Variante b: Papierfähnchen im inhomogenen Feld

Man ersetzt die im Versuch a) benutzten Kondensatorplatten durch zwei Klingelglocken, die von Stielen gehalten werden. Die Glasscheibe wird so weit gesenkt, daß sich die darauf stehenden Papierfähnchen in der Höhe der Glocken befinden. Legt man an die Glocken eine Hochspannung, so richten sich die Papierfähnchen so aus,

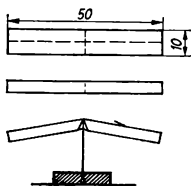


Abb. 5.2.2./2
Papierfähnchen und Träger

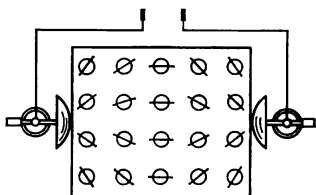
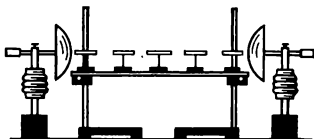


Abb. 5.2.2./3 Papierfähnchen im
inhomogenen elektrischen Feld

daß die gedachten Verbindungslinien bogenförmig von einer Glocke zur anderen verlaufen und senkrecht auf den Oberflächen der Glocken stehen (Abb. 5.2.2./3).

Variante c: Fäden im radialen Feld

An einem Gummiring knüpft man gleichmäßig verteilt mehrere etwa 10 cm lange weiche Fäden aus Wolle oder synthetischen Fasern. Man streift den Gummiring über einen Kugelkonduktor und lädt diesen mit einer Hochspannungsquelle auf. Die Fäden spreizen sich ab und veranschaulichen den Verlauf der Feldlinien in einem radialen Feld.

Bemerkung

Als Kugelkonduktor kann die Kugel des Bandgenerators selbst dienen.

5.2.3. Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Gerät zur Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien
3. Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220 oder Tageslichtschreibprojektor
4. Grieß
5. Rizinusöl oder Paraffinöl

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 V 5.2.2.1
2. Während im V 5.2.2. nur die Kraftwirkungen an einzelnen Stellen des Feldes dargestellt werden, ist es hier möglich, den Eindruck zusammenhängender Feldlinien zu vermitteln.

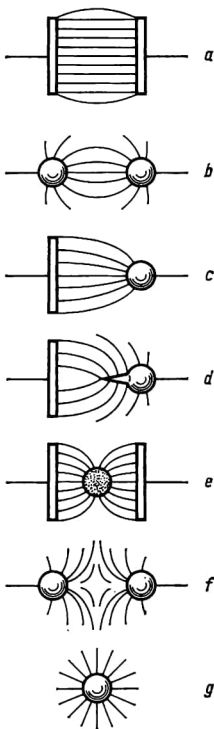


Abb. 5.2.3./1 Möglichkeiten zum Kombinieren der Elektroden, um verschiedene Arten elektrischer Felder darzustellen, a) homogenes Feld zwischen zwei Kondensatorplatten, b) inhomogenes Feld zwischen zwei ungleichnamig geladenen Kugeln, c) inhomogenes Feld zwischen einer Platte und einer Kugel, d) Feld in der Nähe einer Spitze, e) feldfreier Raum in einer metallischen Abschirmung, f) Feld zwischen zwei gleichnamig geladenen Kugeln, g) radiales Feld um eine Kugel

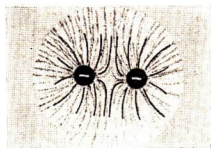
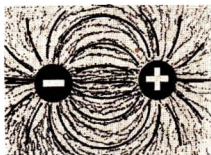
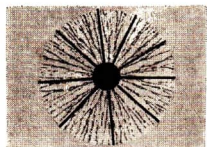


Abb. 5.2.3./2 Homogenes elektrisches Feld eines Plattenkondensators

Abb. 5.2.3./3 Das elektrische Feld ungleichnamig geladener Kugeln

Abb. 5.2.3./4 Das elektrische Feld gleichnamig geladener Kugeln

Abb. 5.2.3./5 Das radiale elektrische Feld einer Kugel



3. Wie im V 5.2.2. erfolgt auch in dem hier beschriebenen Experiment die Darstellung der elektrischen Feldlinien nur in einer Ebene. Um den räumlichen Charakter des Feldes nachzuweisen, sollte außerdem auch V 5.2.4. demonstriert werden.

Versuch

Das Gerät zur Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien besteht aus einer Glasplatte, die mit einem aufgeklebten Ring, mit einer Stativmuffe und zwei Buchsen zur Aufnahme von Elektroden versehen ist. Die Elektroden stellen Schnitte durch Kondensatorplatten und Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern dar. Zum Zubehör gehört außerdem ein Metallring. Man befestigt das Gerät dicht über der Kondensorlinse des Projektionsgerätes WSP 220 an einem kurzen Stativstab, den man in eine der dafür vorgesehenen Gewindebohrungen des WSP eingeschraubt hat. Nun füllt man etwa 5 mm hoch Rizinusöl in die ringförmige Schale, setzt zwei Elektroden ein, streut auf das Öl etwas Grieß und schließt an die Elektroden eine Hochspannungsquelle an. Sogleich bilden die Grießkörnchen Ketten und ordnen sich in Richtung der Feldlinien an.

Durch unterschiedliche Kombination der Elektroden (Abb. 5.2.3./1) ergeben sich Feldlinienbilder für verschiedene Formen elektrischer Felder (Abb. 5.2.3./2 bis Abb. 5.2.3./5).

Da stroboskopische Beleuchtung nicht erforderlich ist, bringt man den Schalthebel des WSP 220 nur in die Mittelstellung.

Bemerkungen

1. Wird statt des WSP 220 ein Tageslichtschreibprojektor verwendet, dann befestigt man das Gerät zur Veranschaulichung der Feldlinien an einem Stativ, das man neben den Projektor stellt.
2. An Stelle von Rizinusöl oder Paraffinöl und Grieß kann man zur Veranschaulichung der Feldlinien auch trockenes Sägemehl oder frisch gemahlene Gipskristalle verwenden. Auch Haarhäcksel von etwa 2 mm bis 3 mm Länge sind geeignet. Bei diesen Versuchsvarianten kann man das Entstehen der Feldlinienbilder begünstigen, indem man leicht gegen die Glasplatte klopft.

5.2.4. Richtung der Kräfte im elektrischen Feld — Räumliche Darstellung der Feldlinien

Zu Variante a

1. Influenzmaschine oder Bandgenerator
2. Glasplatte (etwa 30 cm × 30 cm)
3. 2 Blechstreifen (4 cm × 15 cm)
4. trockene Sägespäne
5. Tageslichtschreibprojektor

Zu Variante b

- Gerät 1., außerdem
6. Watte

Zu Variante c

- Gerät 1., außerdem
7. Faserbüschel mit Stiel

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH Nr. 1 V 5.2.2.!
2. Dieses Experiment stellt eine Ergänzung zu V 5.2.2. dar. Während dort nur flächenhafte Feldlinienbilder erzeugt werden, kann man hier auch den räumlichen Charakter des Feldes anschaulich darstellen.
3. Da die hier beschriebenen Experimente nur wenig Zeit erfordern, ist es möglich, alle Varianten vorzuführen.

Variante a: Veranschaulichung mit Sägespänen

Auf eine Glasplatte legt man im Abstand von etwa 3 cm zwei Blechstreifen, verbindet sie mit den beiden Polen einer Influenzmaschine und lädt sie elektrisch auf. Streut man trockene Sägespäne aus einer Höhe von etwa 15 cm auf die Blechstreifen, so beobachtet man, daß sich die Späne nach der Berührung mit den Streifen aufrichten, aufrecht stehen und im Bogen zum anderen Streifen hüpfen (Abb. 5.2.4./1). Dieser Vorgang wird begünstigt, wenn man durch Betätigung der Influenzmaschine weitere Ladungen zuführt.

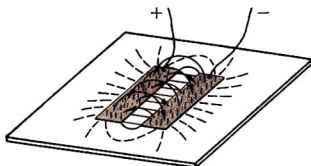


Abb. 5.2.4./1 Veranschaulichen des räumlichen Verlaufes der Feldlinien eines elektrischen Feldes mit Sägespänen

Durch die Bewegung der Sägespäne entsteht ein räumlicher Eindruck vom Verlauf der elektrischen Feldlinien. Die Späne, die auf die Glasplatte gefallen sind, bleiben dort liegen und ergeben wie im V 5.2.2. ein flächenhaftes Feldlinienbild. Legt man die Glasplatte zur Vorführung des Experiments auf den Tageslichtschreibprojektor, so können die Schüler die von unten beleuchteten hüpfenden Sägespäne besser beobachten, und in der Projektion wird das entstehende flächenhafte Feldlinienbild gut sichtbar.

Bemerkung

Verwendet man statt der rechteckigen Blechstreifen andersgeformte, erhält man Darstellungen anderer Feldformen.

Variante b: Veranschaulichung mit Watteflocken

Läßt man eine Watteflocke auf den geladenen Konduktor eines Bandgenerators fallen, so läßt sie sich auf, wird abgestoßen und fliegt wieder vom Konduktor fort. Dabei folgt ihre Bahn in der Nähe des Konduktors etwa dem Verlauf einer Feldlinie. Läßt man sie nacheinander auf verschiedene Stellen fallen, gewinnt man einen räumlichen Eindruck vom Feldlinienverlauf.

Variante c: Veranschaulichung mit einem Faserbüschel

Man versieht ein Büschel Woll- oder Synthetikfäden mit einem Stiel, indem man ein etwa 20 cm langes Drahtstück einmal eng um die Mitte des Büschels herum-

windet. Die beiden überstehenden Drahtstücke verdreht man und versieht ihre Enden mit einem Laborstecker. Um Ladungsverluste durch Spitzenwirkung zu vermeiden, sollen beide Drahtenden von der Hülse des Steckers erfaßt werden.

Dieses Faserbüschel steckt man auf den Konduktor eines Bandgenerators. Lädt man ihn auf, dann spreizen sich die Fäden ab und vermitteln einen Eindruck vom räumlichen Verlauf eines radialen Feldes um eine Punktladung (Abb. 5.2.4./2).



Bemerkungen

1. Man kann die gedrehten Woll- oder Garnfäden in einzelne Fasern auflösen, indem man sie durchkämmt.
2. Statt der Fasern können auch schmale Streifen aus Seidenpapier verwendet werden.

Abb. 5.2.4./2
Veranschaulichung des räumlichen Verlaufes der Feldlinien eines radialen elektrischen Feldes mit einem Faserbüschel

5.2.5. Messen der Feldkräfte mit Hilfe von Fadenpendeln

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. 2 versilberte Glaskugeln (Weihnachtsbaumkugeln)
3. Dederonfaden (Angelschnur, \varnothing 0,15 mm)
4. 2 Ladungsöffel oder 1 „elektrische Gabel“
5. Physikleuchte
6. Lineal oder Millimeterpapier
7. Glasstab
8. Meßband
9. Fettstift oder Faserstift für Tageslichtschreibprojektor
10. Balkenwaage mit Wägesatz

Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment dient dem Nachweis der Proportionalität $F \sim \frac{1}{r^2}$ und damit der Vorbereitung des Coulombschen Gesetzes. Auch die Proportionalität von F und U sowie F und Q kann nachgewiesen werden. Es ist besonders dann zu empfehlen, wenn das Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern nicht zur Verfügung steht.
2. Die Vorbereitung und Durchführung des Experiments erfordert Sorgfalt. Das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge setzt die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten des Fadenpendels voraus und verlangt einige Fähigkeiten im abstrakten Denken. Das Experiment ist deshalb besonders für die Abiturstufe geeignet.

Versuchsanordnung

Als Konduktoren verwendet man zwei versilberte Glaskugeln. Zuerst bestimmt man ihre Masse mit einer Balkenwaage, dann hängt man sie an etwa 2 m langen, dünnen, gut isolierenden Fäden an einem langen Stativ auf. Die Fäden zieht man durch die Querbohrung eines Stativstabes, der mit Hilfe einer Kreuzmuffe in der Höhe verschiebbar am Stativ befestigt wird. Durch Heben oder Senken dieses Stabes kann man die Pendellänge verändern. Um sie nicht während des Experiments messen zu müssen, markiert man die Stellung der Kreuzmuffe am vertikalen Stativstab für bestimmte Pendellängen etwa alle 20 cm mit einem Fettstift oder einem geeigneten Faserstift. Damit sich die Pendel nur in einer Ebene bewegen können, bringt man etwa 20 cm über den Kugeln einen Glasstab in waagerechter Lage so an, daß er die Fäden leicht berührt (Abb. 5.2.5./1). Schließlich projiziert man die beiden Kugeln mit einer 4 m bis 5 m entfernten Lichtquelle auf ein waagrecht angebrachtes Lineal oder einen mit Maßzahlen versehenen Millimeterpapierstreifen.

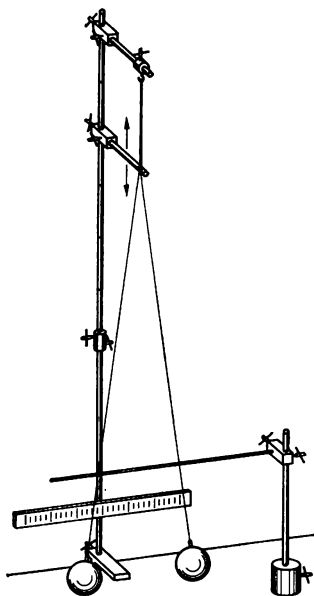


Abb. 5.2.5./1 Versuchsanordnung zum Messen der Feldkräfte mit Hilfe von Fadenpendeln

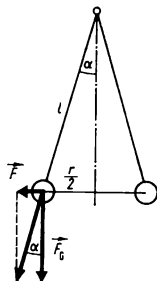


Abb. 5.2.5./2
Skizze zur Herleitung
der Gleichung für
die abstoßende Kraft

Versuch

Mit zwei Ladungsöffeln bzw. einer „elektrischen Gabel“ überträgt man mehrmals jeweils gleichzeitig gleichartige Ladungen vom Konduktor des Bandgenerators auf

die Metallbeläge der Glaskugeln. Bei Weihnachtsbaumkugeln geschieht dies dadurch, daß man mit den Löffeln die metallischen Aufhängeösen der Kugeln berührt.

Die gleichnamig geladenen Kugeln stoßen einander ab, schwingen auseinander und kommen zur Ruhe. Bei guter Isolation durch die Aufhängefäden müßte der Ausschlag der Pendel mehrere Minuten angenähert konstant bleiben.

Die Pendellänge l und den Abstand r der Mittelpunkte der Kugeln trägt man in eine Tabelle ein. Man wiederholt die Messung, nachdem man jeweils durch Senken des durchbohrten Stabes die Pendellänge um 20 cm verkürzt hat. Dabei muß man die Berührung der Kugeln vermeiden, weil während der Meßreihe die Ladungen konstant bleiben sollen.

Zur Auswertung vervollständigt man die Tabelle. Die Abstoßungskraft F ergibt sich durch Multiplikation der Gewichtskraft G (in der Abbildung F_G) einer Kugel mit dem Tangens des Auslenkungswinkels (vgl. Abb. 5.2.5./2).

$$F = G \cdot \tan \alpha .$$

Da für kleine Winkelausschläge der Sinuswert angenähert gleich dem Tangenswert ist, gilt auch

$$F = \frac{G \cdot r}{2 \cdot l} .$$

G in N	l in m	r in m	$F = \frac{G \cdot r}{2 \cdot l}$ in N	$F \cdot r^2$ in N · m ²

Die letzte Spalte der Tabelle zeigt dann mit guter Annäherung, daß das Produkt aus der abstoßenden Kraft und dem Quadrat des Abstandes der Mittelpunkte beider Kugeln konstant ist:

$$F \cdot r^2 = \text{konst.}$$

Daraus folgt die Proportionalität

$$F \sim \frac{1}{r^2} .$$

Bemerkungen

1. Die grafische Darstellung der abstoßenden Kraft F als Funktion von r ergibt eine Hyperbel. Verwendet man doppeltlogarithmisches Papier, so ergibt sich näherungsweise eine Gerade.
2. Da das Coulombsche Gesetz für punktförmige Ladungen gilt, verwendet man möglichst kleine Kugeln. Trotzdem können bei kleinen Abständen Ungenauigkeiten auftreten.

5.2.6. Messen der Feldkräfte mit einer Drehwaage

1. Stromversorgungsgerät für Hochspannung (0 ... 6 kV)
2. Hochspannungsmeßgerät (5 kV)
3. Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern; Aufbauteile daraus:
 - a) Grundgerät mit unterem Spanndraht (\varnothing 0,15 mm)
 - b) Wirbelstrombremse
 - c) 2 Kondensatorplatten (\varnothing 80 mm)
 - d) 2 Kupplungsstücke für Schlitten
 - e) Kugel (\varnothing 26 mm, mit Isolierstück für die Befestigung am Objektträger)
 - f) 2 Lote
 - g) Kugel (\varnothing 26 mm, mit Isolierstab zur Ladungsteilung)

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient dazu, die Definition der elektrischen Feldstärke als Quotient $E = \frac{F}{Q}$ einzuführen. Außerdem kann damit nachgewiesen werden, daß für die Feldstärke im homogenen Feld die Gleichung $E = \frac{U}{s}$ gilt.
2. Zur Justierung des Gerätes vergleiche V 5.1.7.!

Versuch 1: Abhängigkeit der Feldkraft von der Probeladung

Die Versuchsanordnung gleicht der im V 5.1.7. (Abb. 5.1.7./2). Die beiden Kondensatorplatten werden in einem Abstand von 12 cm aufgestellt. An die Schlitten, mit denen sie durch Kupplungsstücke leitend verbunden sind, legt man eine konstante Hochspannung von 5 kV an. Durch Drehen des Skalentopfes bringt man die Probekugel mit der positiven Platte zur Berührung und lädt sie so positiv auf. Dadurch erfolgt eine Auslenkung der Kugel, die man durch Drehen des Skalentopfes rückgängig macht. An der Skale des Skalentopfes liest man die Kraft in Skalenteilen ab. Durch Berühren der Probekugel mit einer gleichartigen ungeladenen Kugel am Isolierstab wird die Ladung halbiert. Wieder mißt man die Kraft, die zum Zurückstellen erforderlich ist. Entlädt man die Kugel am Isolierstab und berührt die Probekugel noch einmal, dann verbleibt nur noch ein Viertel der ursprünglichen Ladung usw.

Beispiel für eine Meßreihe

Ladung Q des Probekörpers	Kraft F in Skt.
Q_0	22,0
$\frac{Q_0}{2}$	11,0
$\frac{Q_0}{4}$	5,0
$\frac{Q_0}{8}$	2,5

Die Tabelle zeigt, daß bei konstanter Spannung U und konstantem Abstand s der Kondensatorplatten der Betrag der Feldkraft F proportional der Probeladung Q ist.

$$F \sim Q \quad \text{für} \quad U = \text{konst.} \quad \text{und} \quad s = \text{konst.}$$

Versuch 2: Abhängigkeit der Feldkraft von der Spannung

Wieder soll der Abstand s der Kondensatorplatten 12 cm betragen. Wie im Versuch 1 legt man an die Platten eine Spannung von 5 kV, lädt die Probekugel durch Berühren mit der positiven Platte auf und mißt die Kraft, die zum Zurückstellen erforderlich ist. Nun verringert man die Feldspannung stufenweise und mißt jeweils die wirkende Kraft.

Beispiel für eine Meßreihe

U in kV	F in Skt.	$\frac{F}{U}$ in $\frac{\text{Skt.}}{\text{V}}$
5	21,0	4,2
4	17,0	4,2
3	12,3	4,1
2	8,5	4,2
1	5,0	5,0

Aus der Tabelle ersieht man, daß der Quotient aus dem Betrag der Kraft F und der Spannung U mit guter Annäherung konstant ist, was auch durch eine grafische Darstellung bestätigt werden kann. Daraus folgt:

$$F \sim U \quad \text{für} \quad Q = \text{konst.} \quad \text{und} \quad s = \text{konst.}$$

Man wiederholt die Messungen mit veränderter Probeladung bzw. verändertem Abstand.

Versuch 3: Abhängigkeit der Kraft vom Abstand der Kondensatorplatten

Nach dem Anlegen der Hochspannung von 5 kV und dem Aufladen der Probekugel verändert man den Abstand der Kondensatorplatten und mißt die wirkende Kraft.

Beispiel für eine Meßreihe

Abstand der Platten s in cm	Kraft F in Skt.	$F \cdot s$ in Skt. · cm
10	27,5	275
12	23,0	276
14	19,0	266
16	16,0	256
18	14,0	252

Die Tabelle zeigt, daß das Produkt $F \cdot s$ angenähert konstant ist. Somit ist

$$F \sim \frac{1}{s} \quad \text{für} \quad U = \text{konst.} \quad \text{und} \quad Q = \text{konst.}$$

Insgesamt gilt die Proportionalität

$$F \sim \frac{Q \cdot U}{s}$$

oder

$$\frac{F}{Q} \sim \frac{U}{s}.$$

Bei der Wahl geeigneter Einheiten (z. B. F in N, Q in A · s, U in V und s in m) gilt Gleichung:

$$\frac{F}{Q} = \frac{U}{s}.$$

Da die elektrische Feldstärke E als Quotient aus der Feldkraft F und der Probeladung Q definiert ist, sagt die Gleichung aus, daß im homogenen Feld eines Plattenkondensators die elektrische Feldstärke auch als Quotient aus der Spannung U und dem Plattenabstand s berechnet werden kann:

$$E = \frac{U}{s}.$$

Bemerkungen

1. Vor dem Aufladen der Probekugel überprüfe man ihre Mittellage und die Nullstellung, da störende Influenzerscheinungen bereits jetzt einen Ausschlag hervorrufen können. Es empfiehlt sich deshalb, eine eventuell vorhandene Influenzladung auf dem Isolierstück durch Befächeln mit einer Flamme zu beseitigen.
2. Zur besseren Beobachtung der Nullstellung der Probekugel kann man den zum Gerät gehörenden kleinen Spiegel auf den Objektträger stecken und einen Lichtzeiger verwenden.
3. Das Absinken der Werte für $F \cdot s$ im Versuch 3 ist auf die Abnahme der Ladung während der Messung zurückzuführen. Das kann man vermeiden, indem man die Probekugel jedesmal mit einer Spannung von 5 kV neu auflädt.
4. Ein Ausschlag der Probekugel kann auch dadurch verursacht werden, daß sich die Kugel nicht genau in der Mitte zwischen den beiden Platten befindet. Deshalb ist eine genaue Justierung unumgänglich. Aus dem gleichen Grund darf die Teilung der Ladung im Versuch 3 nur dann vorgenommen werden, wenn sich die Probekugel genau in der Mitte des Feldes befindet.
5. Da der Körper, der die Probeladung trägt, nicht punktförmig ist, wird durch ihn die Homogenität des Feldes gestört. Auch dadurch ergeben sich Abweichungen von den Idealwerten.



5.2.7. Bestätigung des Coulombschen Gesetzes mit einer Drehwaage

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät für Hochspannung (0 ... 6 kV)
2. Hochspannungsmeßgerät
3. Gerät für Messungen in elektrischen und magnetischen Feldern; Aufbauteile daraus:
 - a) Grundgerät mit unterem Spanndraht (\varnothing 0,15 mm)
 - b) Wirbelstrombremse
 - c) Kugel, (\varnothing 26 mm) mit langem Stiel
 - d) Kugel, (\varnothing 26 mm) mit kurzem Stiel
 - e) Kupplungsstück für Objektträger
 - f) Kupplungsstück für Schlitten

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 3. ohne 3. e und 3. f, außerdem

- g) Isolierstück für Objektträger
- h) Isolierstück für Schlitten

Methodische Hinweise

1. In diesem Experiment soll durch zwei Meßreihen das Coulombsche Gesetz

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

bestätigt werden. Im ersten Teilversuch weist man nach, daß

$$F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

ist.

Da die Ladungen gleich sind, kann man dafür auch setzen

$$F \sim Q^2.$$

Wegen der Proportionalität von Ladung und Spannung genügt es, nachzuweisen, daß

$$F \sim U^2$$

ist.

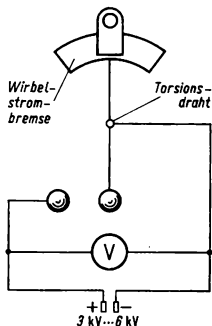
2. Um annähernd punktförmige Ladungen zu realisieren, verwendet man die kleinsten Kugeln. Bei größeren Kugeln ergeben sich besonders für kleine Abstände Abweichungen vom Entfernungsgesetz. Andererseits werden bei zu großen Abständen die zu messenden Kräfte sehr klein.
3. Um das Entladen der Kugeln durch feuchte Luft zu verhindern, schließt man im Versuch 1 beide Kugeln ständig an die Hochspannungsquelle an. Dazu werden beide Kugeln durch entsprechende Kupplungsstücke leitend mit dem Objektträger bzw. mit dem Schlitten verbunden.
Beim Versuch 2 kann man die Kugeln nicht ständig an die Hochspannungsquelle angeschlossen lassen, weil sich bei der Veränderung des Abstandes r auch die Kapazität der Meßanordnung ändert. Dadurch wäre bei konstanter Spannung die Ladung nicht mehr konstant. Um die Fehler, die durch die unvermeidliche allmähliche Entladung der Kugeln entstehen, möglichst klein zu halten, ist es erforderlich, das Experiment sehr zügig durchzuführen.
4. Zur Justierung des Gerätes vergleiche V 5.1.7.!

Versuch 1: Abhängigkeit der Feldkraft von der Ladung bei konstantem Abstand

Man versieht die beiden kleinen Kugeln mit den metallischen Kupplungsstücken, steckt die mit dem langen Stiel in einen der Schlitten und die mit dem kurzen Stiel in die obere Buchse des Objektträgers (Abb. 5.2.7./1). Man schließt beide Kugeln an die Pole der Hochspannungsquelle an. Die Spannungszuführung für die Kugel am Objektträger erfolgt über den oberen Torsionsdraht. Als Abstand beider Kugelmittelpunkte wählt man 5 cm, er wird während des Experiments konstant gehalten.

Um zu vermeiden, daß sich die Kugeln infolge der Anziehungskraft beim Anlegen einer Spannung berühren, erzeugt man durch Drehen des Skalentopfes beim Einschalten des Stromversorgungsgerätes eine Gegenkraft. Zur Sicherheit kann man außerdem ein Stück Papier oder Plastfolie dazwischenhalten, das man aber bei

Abb. 5.2.7./1 Versuchsanordnung zur Bestätigung des Coulombschen Gesetzes



Messungen wieder entfernt. Auch die Verwendung eines Schutzwiderstandes in einer der Zuleitungen kann empfohlen werden. In einer Meßreihe bestimmt man für verschiedene Spannungen den Betrag der Feldkraft in Skalenteilen. Die Auswertung erfolgt in Form einer Tabelle.

Beispiel für eine Meßreihe

U in kV	U^2 in kV ²	F in Skt.	$\frac{F}{U^2}$ in $\frac{\text{Skt.}}{\text{kV}^2}$
5,5	30,2	19,0	0,63
5,0	25,0	16,0	0,64
4,5	20,2	12,8	0,63
4,0	16,0	10,0	0,62
3,5	12,2	7,7	0,63
3,0	9,0	5,5	0,61

Die Tabelle zeigt, daß der Quotient aus der Feldkraft und dem Quadrat der Spannung mit guter Annäherung konstant ist. Somit ist

$$F \sim U^2$$

und wegen der Proportionalität von U und Q auch

$$F \sim Q^2.$$

Die Meßreihe wird mit einem anderen Abstand der Kugeln wiederholt.

Versuch 2: Abhängigkeit der Feldkraft vom Abstand der geladenen Körper bei konstanter Ladung

Bei diesem Experiment ersetzt man die Kupplungsstücke an den Stielen der Kugeln durch Isolierstücke. Beide Kugeln werden durch kurzzeitiges Berühren mit einem Pol der Hochspannungsquelle gleichnamig aufgeladen. Dazu stellt man die höchstmögliche Spannung (6 kV) ein. Man mißt bei verschiedenen Abständen der Kugelmittelpunkte die wirksame Kraft in Skalenteilen.

Beispiel für eine Meßreihe

r in cm	r^2 in cm ²	F in Skt.	$F \cdot r^2$ in Skt. · cm ²
3	9	8,0	162
4	16	13,5	216
5	25	8,5	213
6	36	6,0	216
7	49	4,5	220
8	64	3,0	192

Wenn man berücksichtigt, daß bei dem kleinsten Abstand die Tatsache, daß die Ladungen nicht punktförmig sind, störend wirkt und daß beim größten Abstand die Kraftmessung sehr ungenau ist, kann man registrieren, daß das Produkt von F und r^2 angenähert konstant ist. Somit ist

$$F \sim \frac{1}{r^2}.$$

Die Meßreihe wird mit anderen Ladungen der Kugeln wiederholt. Faßt man die Ergebnisse der beiden Teilversuche zusammen, so ergibt sich:

$$F \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

Durch Einführen des Proportionalitätsfaktors $\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon}$ erhält man das Coulombsche Gesetz.



5.2.8. Unmittelbarer und stufenweiser Aufbau oder Abbau eines elektrischen Feldes

Zu Versuch 1

1. Influenzmaschine oder Bandgenerator oder Stromversorgungsgerät für Hochspannung
2. Braunsches Elektrometer oder Elektroskop
3. 2 Kondensatorplatten
4. 4 Fußklemmen
5. 2 Ladungslöffel

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 5., außerdem

6. Stromversorgungsgerät für Mittelspannung
7. Blockkondensator (4 µF)
8. Holzstab
9. empfindliches Galvanometer
10. Kleinspannungsglühlampe (2 V)
11. Glimmlampe mit Schutzwiderstand
12. kleine Metallkugel an Dederonfaden

Methodische Hinweise

- Bei der Auswertung dieser Experimente können folgende Begriffe erarbeitet werden:
 - das selbständige elektrische Feld,
 - Ladungstransport,
 - Stromfluß.
 Besonderen Wert sollte man auf das Erarbeiten der Erkenntnisse legen, daß Ladungen teilbar sind und daß es sich bei einem Stromfluß stets um einen Ladungstransport handelt.
- Die Experimente eignen sich auch zur Einführung des allgemeinen Modells des elektrischen Leitungsvorganges.

Versuch 1: Unmittelbarer und stufenweiser Aufbau eines elektrischen Feldes

Man berührt zwei isoliert aufgestellte Kondensatorplatten kurzzeitig mit den beiden geladenen Konduktoren einer Influenzmaschine (Abb. 5.2.8./1). Ein parallel zu den Platten geschaltetes Elektrometer zeigt sofort den vollen Ausschlag. Das elektrische Feld hat bei der Berührung der Platten in außerordentlich kurzer Zeit seine volle Stärke erreicht.

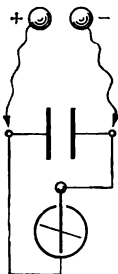


Abb. 5.2.8./1
Unmittelbarer Aufbau eines elektrischen Feldes durch Berühren der Kondensatorplatten mit den Polen einer Influenzmaschine

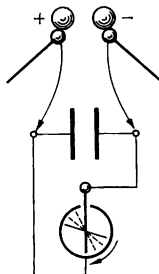


Abb. 5.2.8./2
Stufenweiser Aufbau eines elektrischen Feldes durch die Übertragung kleiner Ladungen mit zwei Ladungslöffeln

Überträgt man dagegen mit je einem Ladungslöffel Ladungen von den Konduktoren der Influenzmaschine zu den Kondensatorplatten, so zeigt das Elektrometer nur einen kleinen Ausschlag. Wiederholt man diesen Vorgang mehrfach, so erkennt man, daß der Ausschlag des Elektrometers jedesmal etwas größer wird. Das elektrische Feld wird *stufenweise* aufgebaut (Abb. 5.2.8./2).

Bemerkung

Statt der Influenzmaschine kann auch ein Bandgenerator oder ein Stromversorgungsgerät für Hochspannung benutzt werden. Das Stromversorgungsgerät hat den Vorzug, daß seine Spannung während der Experimente konstant bleibt.

Versuch 2: Unmittelbarer und stufenweiser Abbau eines elektrischen Feldes

Man läßt die beiden Kondensatorplatten durch Berühren mit den geladenen Konduktoren der Influenzmaschine auf. Überbrückt man sie mit einem Verbindungs-

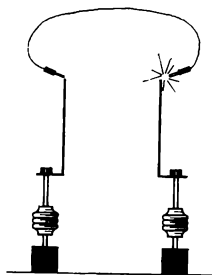


Abb. 5.2.8./3 Unmittelbarer Abbau eines elektrischen Feldes durch Überbrücken der beiden geladenen Kondensatorplatten. Das Elektroskop ist nicht mitgezeichnet.

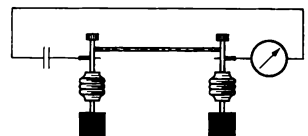


Abb. 5.2.8./4 Entladen eines Blockkondensators über ein Galvanometer und einen Holzstab

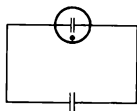


Abb. 5.2.8./5 Entladen eines Blockkondensators über eine Glimmlampe

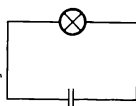


Abb. 5.2.8./6 Entladen eines Blockkondensators über eine Glühlampe

leiter, so beobachtet man unmittelbar vor der Berührung der zweiten Platte einen Funkenüberschlag. Der Ausschlag des Elektrometers geht dabei schlagartig auf Null zurück (Abb. 5.2.8./3).

An die Anschlüsse eines Kondensators legt man kurzzeitig eine Gleichspannung von etwa 400 V an. Verbindet man sie danach über ein empfindliches Galvanometer und einen etwa 20 cm langen Holzstab miteinander (Abb. 5.2.8./4), dann beobachtet man am Meßgerät einen schnell abklingenden Stromfluß.

Einen kurzen Stromfluß beobachtet man auch, wenn man die Anschlüsse über eine Glimmlampe miteinander verbindet (Abb. 5.2.8./5). Die Glimmlampe leuchtet für kurze Zeit auf. Ersetzt man sie durch eine Kleinspannungsglühlampe (Abb. 5.2.8./6), so beobachtet man einen sehr kurzen Stromstoß. Die Lampe leuchtet für einen kurzen Augenblick sehr hell auf.

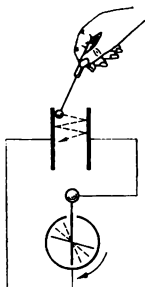


Abb. 5.2.8./7 Stufenweiser Abbau eines elektrischen Feldes mit einem Ladungslöffel

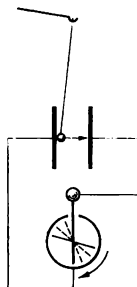


Abb. 5.2.8./8 Stufenweiser Abbau eines elektrischen Feldes mit einem Pendel

Bei diesen Experimenten wird das elektrische Feld *unmittelbar* abgebaut. Bewegt man einen elektrischen Löffel wiederholt von einer geladenen Kondensatorplatte zur anderen (Abb. 5.2.8./7), so wird das Feld stufenweise abgebaut, der Ausschlag des Elektrometers geht bei jeder Berührung der Platten um ein Stück zurück. Die gleiche Erscheinung kann man auch beobachten, wenn man eine kleine Metallkugel an einem Dederonfaden als Pendel zwischen die geladenen Kondensatorplatten hängt. Die Kugel berührt, von elektrostatischen Kräften getrieben, abwechselnd die positive und die negative Platte und entlädt sie allmählich (Abb. 5.2.8./8).

Bei diesen Experimenten erfolgte der Abbau des elektrischen Feldes *stufenweise*.

Bemerkungen

1. Der Kondensator sollte mindestens eine Kapazität von $4\ \mu\text{F}$ haben, damit die Erscheinungen deutlich sichtbar werden.
2. Als empfindliches Galvanometer kann man ein Spiegelgalvanometer oder einen Strommesser mit einem Meßbereich von einigen Hundert Mikroampere oder einigen Milliampere benutzen.
3. Um die Glühlampe vor Überlastung zu schützen, schaltet man einen Widerstand von etwa $30\ \text{k}\Omega$ in Reihe.
Bei Bienenkorbglimmlampen und Spannungsprüfern sind bereits Schutzwiderstände eingebaut.

5.2.9. Die Spitzenwirkung an einem elektrisch geladenen Körper

Zu Versuch 1

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Fußklemme mit Einsteckspitze

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 2., außerdem

3. Kerze
4. elektrisches Windrädchen auf Isolierfuß

Zu Versuch 3

Gerät 1., außerdem

5. Kondensatorplatte mit Isolierfuß
6. Kugelkonduktor mit horizontaler Spitze auf Isolierfuß
7. Elektroskop

Zu Versuch 4

Gerät 1., außerdem

8. Gerät zur Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien
9. Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220
oder Tageslichtschreibprojektor
10. Grieß
11. Rizinusöl oder Paraffinöl

Methodische Hinweise

1. Das Experiment dient zur Untersuchung der Beschaffenheit des elektrischen Feldes in der Nähe von Spitzen und scharfen Kanten geladener Körper sowie der damit zusammenhängenden Erscheinungen: Koronaentladung, Sprühverluste, Elmsfeuer.
2. Die Reihenfolge der Experimente kann verschieden gewählt werden. So kann man z. B. von den Erscheinungen ausgehen und danach das elektrische Feld untersuchen oder auch den umgekehrten Weg gehen.

Versuch 1: Elmsfeuer

Eine Fußklemme mit Einsteckspitze wird an den negativen Pol einer Hochspannungsquelle angeschlossen. Nachdem sich die Augen an die Dunkelheit gewöhnt haben, erkennt man im gut verdunkelten Raum an der Spitze eine Leuchterscheinung, das „Elmsfeuer“. Sie ist darauf zurückzuführen, daß infolge der großen Feldstärke in der Nähe der Spitze Teilchen der Luft durch Stoßionisation zum Leuchten angeregt werden. Elmsfeuer tritt vor Gewittern auch in der Natur auf. Man kann es an hohen stählernen Bauwerken, an Kränen, an Hochspannungsmasten, an Mastspitzen auf Schiffen und an Blitzableitern beobachten.

Versuch 2: Sprühwirkung einer Spitze

Vor die Einsteckspitze der Fußklemme stellt man eine brennende Kerze. Infolge der großen Feldstärke an der Spitze treten Elektronen aus, die als „elektrischer Wind“ Moleküle der Luft mit sich reißen und die Kerzenflamme zur Seite blasen (Abb. 5.2.9./1). Durch die auftretenden Elektronen entsteht eine Rückstoßwirkung, die man mit einem elektrischen Windrädchen nachweisen kann (Abb. 5.2.9./2).

Versuch 3: Ladungstrennung durch Spitzenwirkung

Eine isoliert aufgestellte Kondensatorplatte wird positiv aufgeladen. Ihr gegenüber stellt man einen Kugelkonduktor isoliert so auf, daß eine seitlich eingesteckte Spitze der Platte zugekehrt ist. Durch Influenz kommt es auf der Kugel zu einer Ladungs-

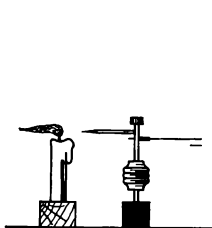


Abb. 5.2.9./1
Nachweis des elektrischen
Windes mit einer Kerzen-
flamme

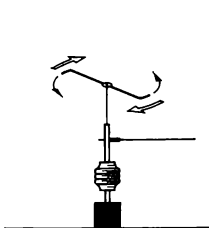


Abb. 5.2.9./2
Nachweis der Rückstoß-
wirkung heraustretender
Elektronen mit einem
elektrischen Windrädchen

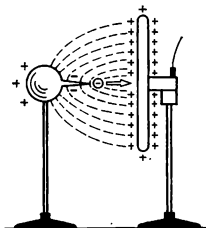


Abb. 5.2.9./3
Ladungstrennung durch
Influenz und Sprüh-
wirkung

trennung (Abb. 5.2.9./3). Die negative Ladung wird von der positiven Ladung der Platte angezogen und tritt aus der Spitze aus. Der Kugelkonduktor wird positiv geladen. Seine Ladung weist man mit einem Elektroskop nach.

Versuch 4: Feldlinienbild eines Würfelmodells

Man erzeugt von einem Würfelmodell nach V 5.2.3. ein Feldlinienbild. Als Schnitt durch einen Würfel dient eine quadratische Blechelektrode. An den Innenrand der Glasschale des Gerätes zur Veranschaulichung der elektrischen Feldlinien legt man als zweite Elektrode einen Draht. Die Grießkörner ordnen sich zu Ketten, die das Feldlinienbild veranschaulichen. Die große Feldliniendichte in der Nähe der Ecken deutet auf eine hohe Feldstärke hin.

Bemerkung

Statt des Würfelmodells im Versuch 4 kann auch das Modell einer Kugel mit Spitze (Abb. 5.2.3./1d) verwendet werden.

5.2.10. Nachweis des elektrischen Erdfeldes mit einer Flammensonde

1. Flammensonde ⑧, dazu erforderliches Material:
 - a) Bambusstange (Länge mindestens 5 m) oder leichte Holzstange
 - b) zylindrisches Glasrohr
 - c) Kreisscheibe aus Holz (zum Glasrohr passend)
 - d) dünner, isolierter Draht
2. Braunsches Elektrometer
3. PVC-Stab mit Dederon- oder Wolltuch

Methodische Hinweise

1. Das Ergebnis dieses Experiments hängt von der Wetterlage ab. Unter günstigen Bedingungen kann man hohe Feldstärken nachweisen ($E \approx 100 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$).
2. Bei der Erklärung der physikalischen Zusammenhänge kann man darauf eingehen, daß die Luft in der Nähe der Flamme durch Ionisation leitfähig wird.
3. Im Zusammenhang mit diesem Experiment kann man auf den Franklinschen Versuch mit dem Drachen hinweisen.

Versuch

Man befestigt am dünnen Ende einer möglichst langen Bambusstange eine kreisrunde Holzscheibe, die man mit einer Bohrung zur Aufnahme einer Kerze versehen hat. Die Kerze umgibt man zum Schutz vor Zugluft mit einem Glaszylinder. Durch die Holzplatte führt man einen isolierten Draht, den man oben umbiegt, so daß sein abisoliertes Ende in die Flamme ragt. Das untere Ende des Drahtes verbindet man mit einem Braunschen Elektrometer (Abb. 5.2.10./1a). Das Gehäuse des Elektrometers erdet man. Richtet man die Bambusstange steil in die Höhe, so kann man am Elektrometer einen Ausschlag beobachten. Er ist um so größer, je höher man die Flammensonde hebt. Beim Annähern eines geladenen PVC-Stabes geht der Ausschlag zurück. Es handelt sich also um positive Ladung.

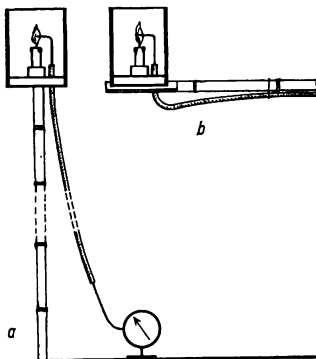


Abb. 5.2.10./1 Versuchsanordnung zum Nachweis des elektrischen Erdfeldes, a) für den Nachweis im freien Gelände, b) für den Nachweis in der Nähe einer Hauswand

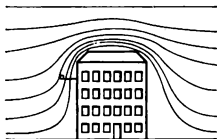


Abb. 5.2.1./2 Schematische Wiedergabe der Äquipotentialflächen in der Nähe eines Hauses

Da die Äquipotentialflächen durch Bäume und Häuser stark deformiert werden, wählt man den Beobachtungsort möglichst in einem freien Gelände. Man kann das Experiment auch vom Fenster eines hohen Hauses aus durchführen. Dazu befestigt man die Holzplatte seitlich am Stab (Abb. 5.2.10./1 b). Das Gehäuse des Elektrometers verbindet man zur Erdung am besten mit der Wasserleitung. Bei diesem Experiment wird die Tatsache ausgenutzt, daß sich die Äquipotentialflächen den Begrenzungen des Hauses anpassen und in der Nähe der Außenwände vertikal verlaufen. Einzelstehende Häuser sind dafür am besten geeignet (Abb. 5.2.10./2).

5.2.11. Modellversuch zur elektrischen Gasentstauung

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Metallrohr (lichte Weite etwa 2 cm; Länge etwa 20 cm)
3. steifer, blanker Draht
4. Räucherkerze, Streichhölzer

Methodischer Hinweis

Auf die Bedeutung der Gasentstauung für den Umweltschutz sollte hingewiesen werden.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist in der Abbildung 5.2.11./1 dargestellt. Bringt man im spannungsfreien Zustand eine glimmende Räucherkerze unter das Rohr, so steigt ihr Rauch im Rohr empor und entweicht oben. Legt man Hochspannung an, so lagern sich die ionisierten Rauchteilchen am Rohr und am Draht ab; die emporsteigende Luft entweicht rauchfrei.

Bemerkung

Will man den Vorgang der Rauchgasreinigung sichtbar machen, so nimmt man statt des Metallrohres ein Glasrohr. Man umkleidet es zur Hälfte mit einer halbzyklindrischen Schale aus dünnem Blech (z.B. Aluminiumfolie), die man gemeinsam mit dem Rohr in den Röhrenhalter einspannt. Im übrigen verläuft das Experiment wie oben beschrieben.

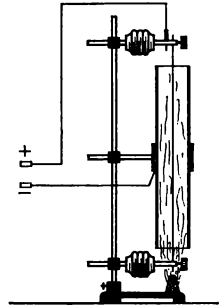


Abb. 5.2.11./1 Modell einer Gasentstaubungskammer

5.2.12. Modellversuch zur Bestimmung der Elementarladung nach dem Schwebeverfahren

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. 2 quadratische Kondensatorplatten
3. Luftballon oder dünne Stanniol- oder Aluminiumfolie
4. Wolltuch

Methodischer Hinweis

Dieses Experiment soll das Prinzip des Millikan-Versuches veranschaulichen. Statt der dort verwendeten mikroskopisch kleinen Öltröpfchen, die im elektrischen Feld zum Schweben gebracht werden, wird hier ein elektrisch geladener Luftballon oder ein Stück dünne Metallfolie verwendet. Man sollte den Schülern bewußtmachen, daß es sich hier nur um einen Modellversuch handelt, der das Experiment nach Millikan nicht ersetzen kann.

Versuch

Man bläst einen Luftballon mäßig auf, bindet ihn zu und lädt ihn durch Reiben mit einem Wolltuch elektrisch auf. Man legt ihn auf eine Kondensatorplatte, die

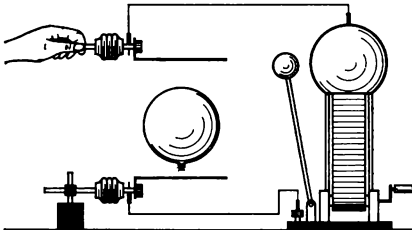


Abb. 5.2.12./1 Modellversuch zum Experiment nach Millikan

man mit einem Isolator waagrecht an einem Stativ befestigt hat. Eine zweite Platte hält man an einem Isolator über den Ballon. Die beiden Kondensatorplatten verbindet man mit den beiden Polen eines Bandgenerators oder einer Influenzmaschine.

Betätigt man die Hochspannungsquelle, dann wird der Ballon bei richtiger Polung der Platten von der unteren abgestoßen und von der oberen angezogen. Bei einigem Geschick gelingt es, ihn zwischen den Platten zum Schweben zu bringen. In diesem Zustand wird seine Gewichtskraft durch die Feldkraft kompensiert (Abb. 5.2.12./1).

Bemerkung

Statt des Luftballons kann man ein etwa handtellergroßes Stück dünner Stanniol- oder Aluminiumfolie oder eine Flaumfeder verwenden. Legt man diese auf die untere Platte, so nehmen sie von der Platte Ladung auf.

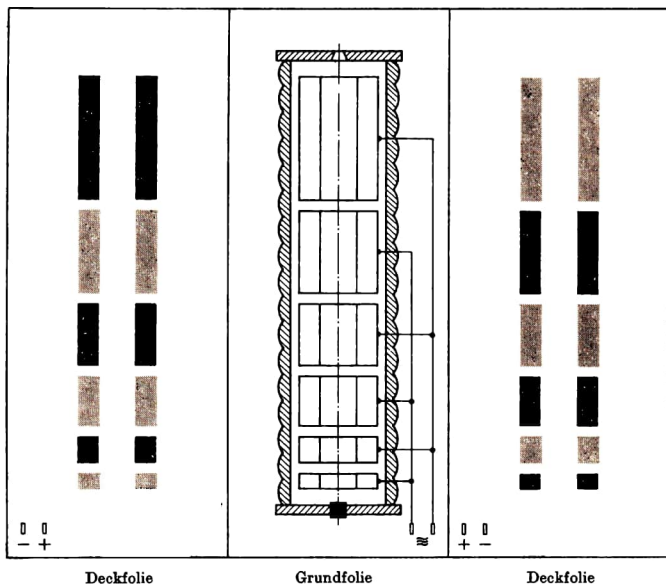


Abb. 5.2.13./1

Projektionsfolie zur Veranschaulichung der Wirkungsweise eines Linearbeschleunigers

5.2.13. Projektionsfolie zur Veranschaulichung der Wirkungsweise eines Linearbeschleunigers

1. Projektionsfolie zur Veranschaulichung der Wirkungsweise eines Linearbeschleunigers ⑧

Methodischer Hinweis

Die hier beschriebene Projektionsfolie für den Tageslichtschreibprojektor dient der Veranschaulichung der Wirkungsweise eines Linearbeschleunigers.

Beschreibung der Folie

Die Projektionsfolie (Abb. 5.2.13./1) besteht aus einer Grundfolie und zwei Deckfolien. Auf der Grundfolie ist ein Schnitt durch den Beschleuniger dargestellt. Die Deckfolien zeigen die beiden Ladungszustände der als Rohrstücke ausgebildeten Elektroden an.

Zur Vorführung deckt man die Grundfolie über die Rollfolie des Kassettenpaares. Die angelegte Wechselspannung veranschaulicht man dadurch, daß man die Deckfolien abwechselnd über die Grundfolie klappt. Die Bewegung des Ions kann man durch die Bewegung eines Farbpunktes auf der Rollfolie darstellen, indem man diesen Punkt dem jeweiligen Ladungszustand der Elektroden entsprechend weiterbewegt.

5.3. Die Kapazität — Die Dielektrizitätskonstante

5.3.1. Laden und Entladen eines Kondensators

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät
2. Elektrolytkondensator (5000 μF ; 3 V)
3. Glühlampe (4 V; 0,05 A)
4. einpoliger Umschalter oder Morsetaste

Zu Variante b

Geräte 1. und 3., außerdem

5. Kondensator (10 μF)
6. Strommesser (Nullpunktmittellage; 3 mA)

Methodische Hinweise

1. In beiden Versuchen wird nachgewiesen, daß beim Laden und Entladen eines Kondensators kurzzeitig Ströme fließen. Variante b zeigt außerdem, daß Lade- und Entladestrom entgegengesetzte Richtung besitzen.
2. Bereits nach Einführung der Wirkungsweise des Kondensators kann man die Schüler auf einige wesentliche Anwendungsbeispiele hinweisen (Sieb- und Ladekondensatoren zur Glättung pulsierenden Gleichstroms, Störschutzkondensator, Kondensator als Ladungsspeicher im elektrischen Schwingkreis).
3. Zum Laden und Entladen eines Konduktors vgl. V 5.1.2.!

Variante a: Nachweis mit einer Glühlampe

Die Schaltung wird nach Abbildung 5.3.1./1 zusammengestellt, wobei auf richtige Polung des Elektrolytkondensators zu achten ist. Schließt man den Kontakt a, so leuchtet die Glühlampe für eine kurze Zeit auf und weist damit das Fließen des Ladestromes nach. Nach dem Umschalten auf den Kontakt b leuchtet die Lampe erneut auf, jetzt infolge des fließenden Entladestromes.

Bemerkung

Soll der Versuch als Schülerexperiment ausgeführt werden, so können die Einzelteile dem Baukastensystem „Elektrotechnik/Elektronik, Stufe 5“ entnommen werden. Statt des Umschalters verwendet man in diesem Falle zwei Ein-Taster nach Abbildung 5.3.1./2. Dabei ist darauf zu achten, daß keinesfalls beide Taster gleichzeitig betätigt werden dürfen, da in diesem Falle die Spannungsquelle kurzgeschlossen würde.

Variante b: Nachweis mit einem Strommesser

Die Schaltung erfolgt nach Abbildung 5.3.1./3. Das Meßgerät wirkt als ballistisches Galvanometer und zeigt den Lade- bzw. Entladestromstoß an. Es schlägt während des Ladevorganges nach dem Schließen des Kontaktes a nach der einen Seite und während des Entladens über Kontakt b nach der entgegengesetzten Seite aus. Die Beträge der beiden Ausschläge stimmen überein: Lade- und Entladestromstoß haben gleichen Betrag, aber entgegengesetzte Polarität.

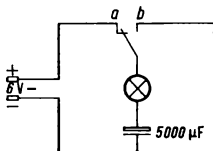


Abb. 5.3.1./1 Laden und Entladen eines Kondensators über eine Glühlampe

Abb. 5.3.1./2 Verwendung zweier Ein-Taster statt eines Umschalters

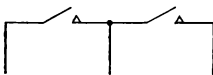
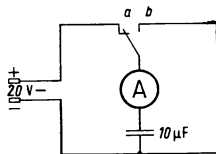


Abb. 5.3.1./3 Laden und Entladen eines Kondensators über einen Strommesser



Bemerkungen

1. Will man den zeitlichen Verlauf des Lade- bzw. Entladestromes untersuchen, so schaltet man einen Widerstand von $2\text{ M}\Omega \dots 4\text{ M}\Omega$ in Reihe zu einem empfindlichen Strommesser und benutzt eine Ladespannung von $300\text{ V} \dots 500\text{ V}$. Die Vorgänge verlaufen dadurch langsamer.
2. Bei Benutzung des Tafelschaltgerätes verwendet man einen Kondensator mit einer Kapazität von $500\text{ }\mu\text{F}$ und einen veränderlichen Widerstand von $25\text{ k}\Omega$. Als Ladespannung genügen 20 V , und als Strommesser kann das Demonstrations-

Drehspul-Meßinstrument Typ DsD mit dem Meßbereich 3 mA bei Nullpunkt-mittellage verwendet werden.

Mit dieser Versuchsanordnung kann man während des Entladens durch Verringern des Widerstandes die Stromstärke während einiger Sekunden annähernd konstant halten. Man mißt diese Stromstärke und die Zeit der Entladung. Die Ladung ergibt sich als Produkt dieser Meßgröße bzw. als Flächeninhalt im entsprechenden I - t -Diagramm.



5.3.2. Laden eines Kondensators auf eine konstante Spannung

- | | |
|---|---|
| 1. Stromversorgungsgerät (200 V... 400 V) | 6. Stoppuhr oder Metronom |
| 2. Kondensator (4 μF) | 7. Potentiometer (100 k Ω ; 1 W) |
| 3. Glimmlampe ohne Vorwiderstand | 8. Widerstand (200 k Ω ; 0,5 W) |
| (UR 110, DGL 43-02) | 9. Spannungsmesser (500 V) |
| 4. 3 Widerstände (2 M Ω) | 10. Strommesser (5 mA) |
| 5. einpoliger Umschalter oder Morsetaste | |

Methodischer Hinweis

Mit dem Versuch wird nachgewiesen, daß beim Laden eines Kondensators auf eine bestimmte Spannung das Produkt aus Stromstärke und Zeit konstant ist.

Vorversuch

Mit einer Schaltung nach Abbildung 5.3.2./1 führt man durch langsames Vergrößern der Spannung das Erreichen der Zündspannung vor. Die Zündspannung wird gemessen. Dies ist erforderlich, weil die Glimmlampe im Hauptversuch als Spannungsanzeiger verwendet wird. Außerdem läßt sich auch das Erlöschen beim Unterschreiten der Löschspannung zeigen.

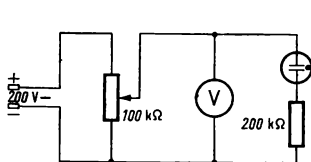


Abb. 5.3.2./1 Messung der Zündspannung einer Glimmlampe

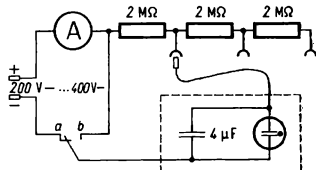


Abb. 5.3.2./2 Laden eines Kondensators auf eine konstante Spannung

Hauptversuch

Die Anordnung wird nach Abbildung 5.3.2./2 aufgebaut. Durch Schließen des Kontaktes a wird der Kondensator über den jeweils eingeschalteten Vorwiderstand geladen. Hat die Ladespannung am Kondensator den Wert der Zündspannung erreicht, so zündet die Glimmlampe und leuchtet kurz auf. Die Zeit vom Einschalten bis zum Aufleuchten wird für die eingeschalteten Widerstände (2 M Ω , 4 M Ω , 6 M Ω)

mit einer Stoppuhr oder einem Metronom gemessen. Die Ladezeiten verhalten sich wie 1:2:3. Durch die eingeschalteten Widerstände werden die Ladestromstärken begrenzt; ihre Maximalwerte werden am Strommesser abgelesen. Man findet, daß sie sich wie $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}$ verhalten. Wird der Kontakt b geschlossen, so entlädt sich der Kondensator wegen des hohen Widerstandes im Entladekreis naturgemäß langsam.

Das Produkt aus Ladestromstärke und Ladezeit ist für das Aufladen auf eine konstante Spannung konstant:

$$I \cdot t = \text{konst.} \quad \text{für} \quad U = \text{konst.}$$

Bemerkungen

1. Das Absinken der Ladestromstärke während der Ladezeit bleibt ohne Einfluß auf das Ergebnis, da bis zum Aufladen auf die vorgegebene Spannung alle Ladestromstärken auf einen bestimmten Bruchteil der Einschaltstromstärke gesunken sind.
2. Die Kondensatorzuführung und die Zuführung zu der Glühlampe müssen gut isoliert sein; Isolierung mit Schichtpreßstoffen ist ungenügend. Es sind Polystyrol, Trolitul oder Piacryl zu verwenden. Die kritischen Teile sind in Abbildung 5.3.2./2 gestrichelt eingerahmt.



5.3.3. Proportionalität zwischen Ladung und Spannung

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (200 V ... 500 V —)
2. Kondensator (4 μ F)
3. 3 Glühlampen ohne Vorwiderstand (UR 110, DGL 43-02)
4. Widerstand (5 M Ω)
5. einpoliger Umschalter oder Morsetaste
6. Stoppuhr
7. Spannungsmesser (500 V)
8. Potentiometer (100 k Ω ; 1 W)
9. Widerstand (200 k Ω ; 0,5 W)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 9., außerdem
10. empfindlicher Strommesser

Zu Variante c

Geräte 1., 5. und 10., außerdem
11. Kondensator (10 μ F)
12. Spannungsmesser (100 V)
13. Potentiometer (1 k Ω)

Methodischer Hinweis

Die Versuche dienen zum Nachweis der Proportionalität zwischen Ladung und Spannung an einem Kondensator und damit auch zur Einführung der Kapazität. Während in Variante a ein qualitativer Vergleich bei drei verschiedenen Spannungen vorgenommen wird, liefert Variante b genauere Ergebnisse. In Variante c erfolgt

die Bestätigung der Proportionalität in einer Meßreihe mit Hilfe eines ungeeichten ballistischen Galvanometers.

Variante a: Qualitativer Vergleich mit Hilfe dreier Glimmlampen

Wie im V 5.3.2. sind zunächst die Zündspannungen beim Hintereinanderschalten von einer, zwei und drei Glimmlampen zu messen (siehe V 5.3.2., Abb. 5.3.2./1). Man vergleicht sodann die Ladezeiten für das Aufladen des Kondensators auf verschiedene Spannungen, wenn erst eine, dann zwei und schließlich drei in Reihe geschaltete Glimmlampen parallel zum Kondensator liegen (Abb. 5.3.3./1). Man findet, daß mit dem Steigen der Ladezeit und demnach mit der Zunahme der Ladung die Spannung am Kondensator ansteigt: Je größer die Ladung, um so höher ist die Spannung.

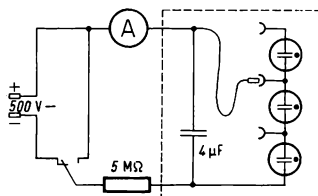


Abb. 5.3.3./1 Ermittlung der Proportionalität zwischen Ladung und Spannung mit Hilfe von Glimmlampen. Das Meßgerät ist für die Variante a entbehrlich.

Eine genaue Ermittlung der Proportionalität zwischen Ladung und Spannung ist bei dieser Versuchsanordnung nicht möglich, da der Ladestrom mit steigender Ladezeit abnimmt.

Bemerkung

Die in Abbildung 5.3.3./1 gestrichelt eingerahmten Teile sind gut zu isolieren (vgl. Bem. Nr. 2 V 5.3.2.).

Variante b: Messung mit Hilfe dreier Glimmlampen

Die Schaltung entspricht der Abbildung 5.3.3./1; der Strommesser liegt im Ladekreis. Die Meßreihe verläuft wie in der Variante a; zusätzlich werden jedoch die Einschaltstromstärke I_0 und die Stromstärke I_z beim Zünden der Glimmlampe gemessen. In erster Näherung kann $I_1 = \frac{I_0 + I_z}{2}$ als Ladestromstärke angenommen werden.

Beispiel für einen Tabellenkopf

I_0 in A	I_z in A	I_1 in A	t in s	$Q = I_1 \cdot t$ in A · s	U in V	$\frac{Q}{U}$ in $\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$

In der Auswertung der Meßwerte findet man näherungsweise, daß sich die Zündspannungen wie 1:2:3 verhalten. Die Ladungen verhalten sich ebenfalls wie 1:2:3. Folglich ist

$$Q \sim U.$$

Diese Proportionalität wird dadurch bestätigt, daß der Quotient $\frac{Q}{U}$ konstant ist. Dieser Proportionalitätsfaktor wird als Kapazität definiert.

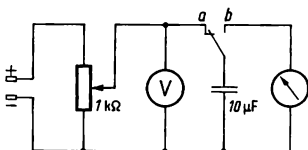


Abb. 5.3.3./2 Ermittlung der Proportionalität zwischen Ladung und Spannung mit einem ballistischen Galvanometer

Variante c: Ungeechtes ballistisches Galvanometer

Ein Kondensator wird in einer Meßreihe nach Abbildung 5.3.3./2 mit verschiedenen Spannungen über den Kontakt a aufgeladen und über den Kontakt b durch ein ballistisches Galvanometer entladen. Das Meßgerät braucht nicht in Amperesekunden geeicht zu sein, da sein Stoßausschlag x in Skalenteilen der Ladung Q proportional ist. Bei tabellarischer, rechnerischer und grafischer Auswertung der Meßreihe wird die Proportionalität zwischen dem ballistischen Ausschlag des Galvanometers und der Spannung U festgestellt.

Bemerkung

Die Durchführung der Experimente wird erheblich vereinfacht, wenn man während des Lade- oder Entladevorganges die Stromstärke konstant hält. Die Ladung ergibt sich dann als Produkt aus Stromstärke und Zeit. Eine Möglichkeit hierzu ist das manuelle Regeln der Stromstärke mit einem veränderlichen Widerstand (vgl. Bem. Nr. 2 V 5.3.1.).

Eine Schaltung zur elektronischen Regelung der Stromstärke ist von Klee in der Zeitschrift „Physik in der Schule“, Heft 3/1969 und Heft 12/1973, beschrieben worden.



5.3.4. Bestimmung der Kapazität eines Kondensators mit einem ballistischen Galvanometer

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Stromversorgungsgerät (100 V —) | 4. Galvanometer (in Amperesekunden geeicht) |
| 2. Kondensator (10 μF) | 5. einpoliger Umschalter oder Morsetaste |
| 3. Spannungsmesser (100 V) | 6. Drehwiderstand (1 kΩ) |

Methodischer Hinweis

In einer Versuchsreihe wird die Proportionalität zwischen Spannung und Ladung eines Kondensators nachgewiesen und seine Kapazität bestimmt.

Versuch

Versuchsaufbau und -durchführung entsprechen V 5.3.3., Variante c (Abb. 5.3.3./2), nur daß in diesem Falle mit einem in Amperesekunden geeichten Galvanometer gearbeitet wird. Bei der Auswertung der Meßreihe wird die Proportionalität zwischen Ladung und Spannung nachgewiesen und der Proportionalitätsfaktor als Kapazität des Kondensators bestimmt.

Kopf der Meßtabelle zur Ermittlung der Kapazität

U in V	x in Skt.	Q in $\mu\text{A} \cdot \text{s}$	C in μF

Bemerkungen

1. Die Eichung eines ballistischen Galvanometers kann nach V 5.1.3. durchgeführt werden.
2. Vergleiche Bem. zu Variante c, V 5.3.3.!

5.3.5. Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von seinen geometrischen Abmessungen

Zu Variante a

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Elektrometer oder Elektroskop
3. 4 Kondensatorplatten
4. 4 Fußklemmen

Zu Variante b

5. Stromversorgungsgerät (10 V ... 30 V —)
6. empfindliches Galvanometer
7. einpoliger Umschalter
8. Platte mit Kondensatoren

Zum Herstellen der Kondensatoren

9. Kondensatorwickel aus einem technischen Kondensator (etwa 10 cm breit)
10. Grundplatte aus gut isolierendem Schichtpreßstoff (80 cm \times 40 cm \times 4 mm)
11. 6 Polystyrol-Doppelbuchsen
12. Kupferfolie

Methodische Hinweise

1. Aus der Definition der Kapazität $C = \frac{Q}{U}$ ergibt sich, daß bei konstant bleibender Ladung die Spannung indirekt proportional der Kapazität eines Kondensators ist. Dieses umgekehrte Verhältnis kann zum Vergleich von Kapazitäten mit Hilfe eines Elektrometers genutzt werden: Einem größeren Elektrometerrausschlag entspricht demnach eine kleinere Kapazität und umgekehrt. In der Variante a untersucht man die Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von seinen geometrischen Abmessungen auf diese Weise qualitativ mit Hilfe eines Elektrometers.
2. In der Variante b benutzt man selbsthergestellte Kondensatoren, deren Plattenflächen bzw. Plattenabstände in bestimmten einfachen Verhältnissen zueinander

stehen. Hier werden die ballistischen Ausschläge eines Galvanometers verglichen. Da der Ausschlag x der Ladung Q und diese wiederum bei konstanter Spannung der Kapazität C proportional ist, gilt auch:

$$C \sim x.$$

Einem größeren Galvanometerausgang entspricht auch eine größere Kapazität und umgekehrt.

Variante a: Qualitativer Vergleich mit einem Elektrometer

Flächeninhalt

Vier Kondensatorplatten auf Fußklemmen werden nach Abbildung 5.3.5./1 a so aufgestellt, daß sie zwei Kondensatoren bilden. Das eine Plattenpaar wird mit Meßsystem und Gehäuse eines Elektrometers verbunden. Lädt man diese beiden Platten durch kurzzeitigen Anschluß an je einen Pol einer Hochspannungsquelle auf, so zeigt das Elektrometer die Spannung zwischen den Platten an. Schließt man

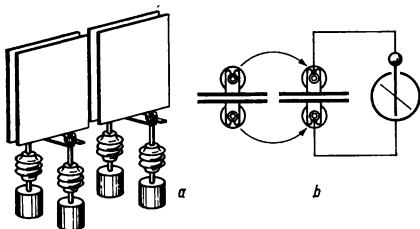


Abb. 5.3.5./1 Abhängigkeit der Kapazität von der Plattenfläche,
a) Aufstellung der Kondensatoren,
b) Vergrößerung der Plattenfläche durch Parallelschalten

nun das zweite Plattenpaar parallel zum ersten an (Abb. 5.3.5./1 b), so geht der Ausschlag des Elektrometers zurück und zeigt somit eine Vergrößerung der Kapazität an. Mit der Zunahme (Verdoppelung) der wirksamen Plattenfläche wächst also die Kapazität eines Plattenkondensators (auf das Doppelte).

Bemerkungen

1. Es kann vorkommen, daß beim Benutzen von Verbindungsleitern zum Anschluß des zweiten Plattenpaares ein Teil der Ladung infolge mangelhafter Isolation abfließt. Das kann vermieden werden, indem man die Platten jeweils durch direkte Berührung miteinander verbindet.
2. Die wirksame Plattenfläche kann auch dadurch verändert werden, daß man eine der beiden Kondensatorplatten unter Beibehaltung des Abstandes seitlich verschiebt. Dadurch kann die Wirkungsweise des Drehkondensators veranschaulicht werden.

Plattenabstand

Der Versuch wird, wie unter V 5.1.8. beschrieben, mit zwei Kondensatorplatten ausgeführt. Beim Entfernen der Platten voneinander vergrößert sich der Ausschlag des Elektrometers und zeigt damit die Abnahme der Kapazität des Kondensators an.

Variante b: Qualitative Untersuchung mit einem ballistischen Galvanometer

Herstellen der Kondensatoren

Ein 10 cm breiter Kondensatorwickel eines Metall-Papier-Kondensators wird abgewickelt. Man trennt die Metallfolien gemeinsam mit einer Paraffinpapierschicht vorsichtig ab. Die restlichen Paraffinpapierstreifen können dann einzeln oder paarweise gelöst werden. Die zuerst gelösten Papier-Metallfolie-Streifen schneidet man in 8 Stücke mit einer Länge von 64 cm, in zwei Stücke mit einer Länge von 44 cm und in zwei Stücke mit einer Länge von 24 cm. Anschließend entfernt man an den beiden Schnittenden noch je 2 cm von der Metallfolie, so daß die Papierstreifen 64 cm, 44 cm und 24 cm lang bleiben, die Folienauflagen aber nur 60 cm, 40 cm und 20 cm messen. Je zwei der verschieden langen Papier-Metallfolie-Streifen werden unter Zwischenlegen von etwas längeren Papierstreifen und unter Einlegen

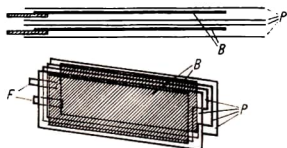


Abb. 5.3.5./2 Schichtung der Kondensatoren
B Kondensatorbelegung
P Paraffinpapier
F Anschlußfolie

zweier blanker, dünner Kupferfolien zu einem Kondensator zusammengesetzt und mit einem mäßig warmen Bügeleisen zusammengeplättet (Abb. 5.3.5./2). Es entstehen so drei Kondensatoren mit gleichem Plattenabstand, deren Plattenflächen sich wie 1:2:3 verhalten. Die restlichen Papier-Metallfolie-Streifen werden unter Zwischenlegen von zwei, vier und sechs etwas längeren Paraffinpapierstreifen zu drei Kondensatoren gleicher Plattenfläche vereinigt. Ihre Plattenabstände verhalten sich wie 1:2:3.

Die überstehenden Enden der Papierzwischenlagen werden stufig abgeschnitten. Durch farbige Markierung der einzelnen Stufen kann die Anzahl der Zwischenlagen leicht festgestellt werden.

Die so gewonnenen Vergleichskondensatoren werden mit Alleskleber auf die Preßstoffplatte aufgeklebt, und zwar auf die Vorderseite drei Kondensatoren gleichen Plattenabstandes, aber unterschiedlicher Plattenfläche. Auf die Rückseite klebt man drei Kondensatoren gleicher Plattenfläche, aber verschiedenen Plattenabstandes.

Zwischen den Metallfolien und den auf der Grundplatte befestigten Doppelbuchsen wird durch Lötten eine leitende Verbindung hergestellt. Mit einer großen Drehklemme wird die Platte in einem Stativ standsicher aufgestellt (Abb. 5.3.5./3).

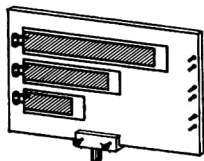


Abb. 5.3.5./3 Grundbrett mit Kondensatoren

Bemerkung

Kondensatoren bekannter Abmessungen können in ähnlicher Weise auch aus Rohfolien für den Tageslichtschreibprojektor und Aluminiumfolie hergestellt werden. Der Vergleich der Flächeninhalte kann mit Hilfe der Projektion erfolgen.

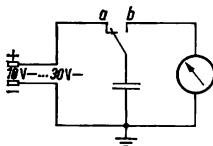


Abb. 5.3.5./4 Abhängigkeit der Kapazität vom Flächeninhalt der Plattenfläche und vom Plattenabstand

Flächeninhalt

Die drei Vergleichskondensatoren mit unterschiedlicher Plattenfläche A werden nach Abbildung 5.3.5./4 nacheinander auf die gleiche Spannung von 10 V ... 30 V geladen und dann über das ballistische Galvanometer entladen. Beim Beobachten des Stromausschlages findet man:

Verhältnis der Plattenflächen	1:2:3,
Verhältnis der Stoßausschläge	1:2:3.

Folglich verhalten sich auch die Kapazitäten wie 1:2:3. Damit ist nachgewiesen, daß die Kapazität der Plattenfläche proportional ist:

$$C \sim A.$$

Plattenabstand

In den Stromkreis werden nacheinander die drei Kondensatoren mit verschiedenen Plattenabständen d eingeschaltet. Durch Beobachten der Stoßausschläge findet man:

Verhältnis der Plattenabstände	1:2:3,
Verhältnis der Stoßausschläge	1: $\frac{1}{2}$: $\frac{1}{3}$.

Da sich diesmal die Kapazitäten wie 1: $\frac{1}{2}$: $\frac{1}{3}$ verhalten, ist die Kapazität dem Plattenabstand umgekehrt proportional:

$$C \sim \frac{1}{d}.$$

Man kann beide Proportionalitäten zu einer Aussage vereinigen:

$$C \sim \frac{A}{d}.$$

Durch Einführen einer Konstanten als Proportionalitätsfaktor ist

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad \text{mit} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r.$$

ε_0 heißt elektrische Feldkonstante, ε_r die Dielektrizitätszahl oder relative Dielektrizitätskonstante und ε die Dielektrizitätskonstante.

5.3.6. Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators vom Dielektrikum

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Elektrometer oder Elektroskop
3. 2 Kondensatorplatten
4. 2 Fußklemmen
5. Platten aus verschiedenen Isolierstoffen
(z. B. Polystyrol, Glas usw.,
etwas größer als die Kondensatorplatten)

Methodische Hinweise

1. Vgl. MH Nr. 1 V 5.3.5.1
2. Der Versuch knüpft an V 5.3.5., Variante a an und dient zum qualitativen Nachweis, daß die Kapazität eines Plattenkondensators von der Art des Dielektrikums abhängt.

Versuch

Zwei Kondensatorplatten auf Holtzschen Klemmen werden zweipolig mit einem Elektrometer verbunden. Durch kurzzeitigen Anschluß an die Pole einer Hochspannungsquelle wird der Kondensator aufgeladen, und das Elektrometer zeigt die zwischen den Platten herrschende Spannung an.

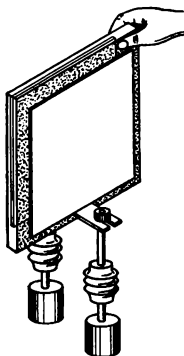


Abb. 5.3.6./1

Plattenkondensator zum Nachweis der Wirkung des Dielektrikums

Schiebt man eine Platte aus Isolierstoff zwischen die Kondensatorplatten, so geht der Elektrometerschlag zurück. Da bei diesem Vorgang die Ladung konstant geblieben ist, deutet die Abnahme der Spannung auf eine Vergrößerung der Kapazität hin. Führt man den gleichen Versuch mit Platten aus anderen Isolierstoffen aus, so erkennt man ebenfalls, daß Dielektrika verschiedener Art gegenüber Luft eine größere Kapazität des Kondensators bewirken.

5.3.7. Bestimmen der elektrischen Feldkonstanten

- 2 Stromversorgungsgeräte
- Spiegelgalvanometer bekannter Stromempfindlichkeit
- Meßplattenkondensator
oder zwei ebene, dicke Metallplatten (etwa 500 cm²) und dünner, geschliffener Objektträger
- Spannungsmesser (50 V)
- Meßschieber, bei Verwendung eines behelfsmäßigen Plattenkondensators noch zusätzlich Bügelmeßschraube
- Motor, gegebenenfalls aus Aufbauteilen zusammenstellen
- Widerstand zum Ändern der Drehzahl
- rotierender Umschalter
- stroboskopische Scheibe
- Glimmlampe
oder an Stelle von 6. bis 10.
- Relais (24 V) mit Umschaltkontakten (Schaltfrequenz 50 Hz)
- Selengleichrichter (2 Platten; 0,5 A) oder Germanium-Flächengleichrichter (GY 111)
- Zungenfrequenzmesser

Methodischer Hinweis

Wird ein Kondensator mit einer bestimmten Frequenz f abwechselnd mit einer Gleichspannung U geladen und über einen Strommesser wieder entladen, so beträgt die mittlere Stromstärke $\bar{I} = U \cdot C \cdot f$. Für einen Vakuumkondensator, näherungsweise auch für einen Luftkondensator mit dem Flächeninhalt A und dem Plattenabstand d , ergibt sich

$$\bar{I} = \frac{U \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}.$$

Durch Messen von \bar{I} , U , f , A und d kann man die elektrische Feldkonstante ermitteln:

$$\epsilon_0 = \frac{\bar{I} \cdot d}{U \cdot A \cdot f}.$$

Das periodische Auf- und Entladen kann mit Hilfe eines rotierenden Umschalters erfolgen, der von einem einstellbaren Elektromotor angetrieben wird. Die Drehzahl kann man stroboskopisch messen (Abb. 5.3.7./1); vgl. dazu 2. Teil der Physikalischen Schulversuche, V 6.1.12.!

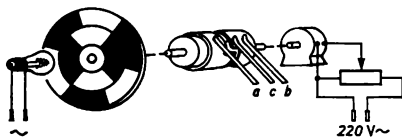


Abb. 5.3.7./1 Rotierender Umschalter mit Antriebsmotor und stroboskopischer Drehzahlmessung (nicht maßgerecht)

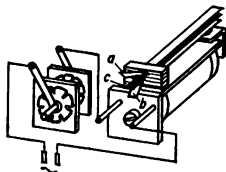


Abb. 5.3.7./2 Relais mit Umschaltkontakten und einer Schaltfrequenz von 50 Hz

Einfacher gelingt das Umschalten mit einem Relais, das Umschaltkontakte besitzt und über einen Einweg-Gleichrichter an eine Wechselspannung von 20 V ... 25 V angeschlossen wird, so daß das Laden und Entladen mit der Frequenz des unterbrochen pulsierenden Gleichstromes $f = 50 \text{ Hz}$ erfolgt (Abb. 5.3.7./2). Das Relais muß leicht schalten; nötigenfalls ist ein Nachjustieren der Kontakte erforderlich.

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt beim Verwenden eines rotierenden Schalters nach Abbildung 5.3.7./3a, beim Verwenden eines Relais mit einer Schaltfrequenz von 50 Hz nach Abbildung 5.3.7./3b.

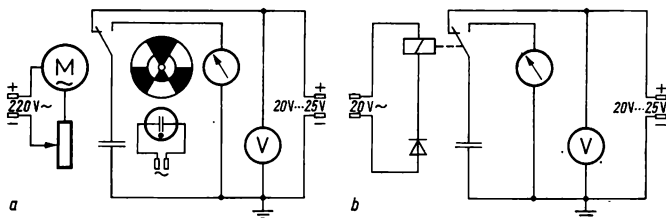


Abb. 5.3.7./3 Bestimmung der elektrischen Feldkonstanten,
a) Verwendung eines rotierenden Schalters,
b) Verwendung eines Relais mit einer Schaltfrequenz von 50 Hz

Als Kondensator verwendet man einen Meßplattenkondensator; der Plattenabstand wird auf etwa 1 mm eingestellt. Einen behelfsmäßigen Plattenkondensator stellt man aus zwei dicken, ebenen Metallplatten her. Eine Platte kann auf den Experimentiertisch gelegt werden. Isolierung ist nicht erforderlich, doch ist sie zu erden. Auf diese Platte werden drei kleine Abschnitte eines geschliffenen Objektträgers verteilt und die zweite Platte genau über die erste gelegt.

Versuch

Die Ladespannung richtet sich nach der Kapazität des Kondensators und nach der Stromempfindlichkeit des Galvanometers. Sie beträgt etwa 20 V ... 25 V—. Man stellt den Inhalt der Plattenfläche des Kondensators und den Plattenabstand fest. Nach Einschalten der Spannungsquellen werden Spannung, Stromstärke und Drehzahl bzw. Frequenz ermittelt. Die elektrische Feldkonstante berechnet man nach der Gleichung

$$\epsilon_0 = \frac{\bar{I} \cdot d}{U \cdot A \cdot f}.$$

Bemerkungen

1. Ist die Stromempfindlichkeit des Spiegelgalvanometers nicht bekannt, so kann man sie dadurch ermitteln, daß man einen Dauerstrom bekannter Stärke durch das Galvanometer fließen läßt.

2. Die oben beschriebene Versuchsanordnung ist auch zur Messung der Kapazität geeignet. Aus $\bar{I} = U \cdot C \cdot f$ folgt $C = \frac{\bar{I}}{U \cdot f}$. Liegen die zu untersuchenden Kondensatoren in der Größenordnung von $1 \mu\text{F}$, so kann man als Strommesser ein Demonstrationsdrehpulgerät verwenden.



5.3.8. Bestimmen der relativen Dielektrizitätskonstanten

Zu Versuch 1

Geräte wie im V 5.3.7., außerdem

14. verschiedene Isolierstoffe in Plattenform (1 mm ... 2 mm dick): Pappe, Glas, PVC-hart, PVC-weich, Polystyrol, Hartgummi

Zu Versuch 2

Geräte wie im V 5.3.7., außerdem

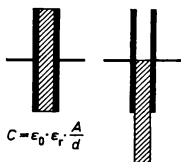
15. flacher Aluminiumtiegel mit innen ebenen Boden (\varnothing 10 cm ... 20 cm)
16. ebene, kreisförmige Aluminiumplatte mit etwas kleinerem Durchmesser als Gerät 15.
17. geschliffener Objektträger
18. verschiedene Flüssigkeiten: Wasser, Äthanol, Aceton, Glycerin

Methodische Hinweise

1. Der Versuch knüpft an V 5.3.7. an und ermöglicht die Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r von festen und flüssigen Stoffen unter der Voraussetzung, daß die elektrische Feldkonstante ϵ_0 gegeben ist. Man ermittelt den Flächeninhalt der Kondensatorplatten A sowie den Plattenabstand d und mißt die Spannung U und die mittlere Entladestromstärke \bar{I} . Die relative Dielektrizitätskonstante des Isolierstoffes ergibt sich dann aus der Beziehung

$$\epsilon_r = \frac{\bar{I} \cdot d}{U \cdot A \cdot f \cdot \epsilon_0}$$

2. Der Versuch kann aber auch in der Weise abgewandelt werden, daß man die Messungen zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstanten fester Stoffe lediglich auf zwei Stromstärkemessungen und einen Flächenvergleich beschränkt. Man füllt zuerst den ganzen Kondensator mit dem Dielektrikum und bestimmt die mittlere Stromstärke I . Danach wird das Dielektrikum zur Hälfte aus dem Kon-



$$C' = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{2d} + \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{2d}$$

Abb. 5.3.8./1 Plattenkondensator, ganz und halb gefüllt

densator entfernt und die Stromstärke \bar{I}' ermittelt (Abb. 5.3.8./1). Spannung und Frequenz bleiben bei den Teilversuchen unverändert; es sind $U = U'$ und $f = f'$. Die Auswertung ergibt:

Die Kapazität des gefüllten Kondensators ist

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}. \quad (1)$$

Die Kapazität des halb gefüllten Kondensators ist

$$C' = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{2d} \cdot (1 + \epsilon_r) \quad \text{oder} \quad 2C' = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot (1 + \epsilon_r). \quad (2)$$

Subtraktion der Gleichung (1) von Gleichung (2) liefert

$$2C' - C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad \text{mithin} \quad \epsilon_0 = \frac{d \cdot (2C' - C)}{A}. \quad (3)$$

Unter Berücksichtigung von $C = \frac{\bar{I}}{U \cdot f}$ und $C' = \frac{\bar{I}'}{U \cdot f}$ ist

$$\epsilon_0 = \frac{d \cdot (2\bar{I}' - \bar{I})}{U \cdot f \cdot A}. \quad (4)$$

Einsetzen von (4) in (1) liefert

$$C = \frac{d \cdot (2\bar{I}' - \bar{I})}{U \cdot f \cdot A} \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} = \frac{2\bar{I}' - \bar{I}}{U \cdot f} \cdot \epsilon_r.$$

Da $C = \frac{\bar{I}}{U \cdot f}$ ist, erhält man

$$\frac{\bar{I}}{U \cdot f} = \frac{2\bar{I}' - \bar{I}}{U \cdot f} \cdot \epsilon_r$$

und somit als relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = \frac{\bar{I}}{2 \cdot \bar{I}' - \bar{I}}.$

Versuch 1: Feste Stoffe

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung erfolgen wie bei V 5.3.7. Der Zwischenraum zwischen den Kondensatorplatten des Meßkondensators oder des behelfsmäßigen Plattenkondensators wird durch feste Isolierstoffe in Plattenform ausgefüllt. Der Flächeninhalt A einer Kondensatorplatte und die Dicke d des Dielektrikums werden ermittelt. Nach dem Einschalten der Spannungsquellen mißt man die Frequenz f , die Spannung U und die mittlere Stromstärke \bar{I} . Nach der in MH Nr. 1 gegebenen Gleichung wird die relative Dielektrizitätskonstante berechnet.

Führt man den Versuch in der abgewandelten Form nach MH Nr. 2 durch, so ermittelt man einmal die mittlere Stromstärke \bar{I} bei ganz mit dem Dielektrikum gefülltem Kondensator und danach \bar{I}' bei halb gefülltem Kondensator. Dabei achtet man darauf, daß Spannung und Frequenz während der Teilversuche konstant bleiben. Die relative Dielektrizitätskonstante wird nach MH Nr. 2 berechnet.

Versuch 2: Flüssige Stoffe

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind die gleichen wie beim Versuch 1. Als Kondensator verwendet man einen geerdeten Aluminiumtiegel und eine Aluminiumscheibe. Einen gut meßbaren Plattenabstand stellt man durch Zwischenlegen dreier kleiner Glasabschnitte eines geschliffenen Objektträgers her. Die Fläche der Glasabschnitte muß klein gegenüber der Plattenfläche des Kondensators sein. Den Zwischenraum füllt man mit der Flüssigkeit. Deren relative Di-

elektrizitätskonstante findet man dann nach $\epsilon_r = \frac{\bar{I} \cdot d}{U \cdot A \cdot f \cdot \epsilon_0}$, wobei A der Flächeninhalt der kleineren Kondensatorplatte ist.

**5.3.9. Ermittlung der Kapazität eines Kondensators**

1. Stromversorgungsgerät (200 V —)
 2. ballistisches Galvanometer (bei größeren Kapazitätswerten auch Demonstrationsdrehspulgerät)
 3. 2 Ein-Taster
 4. einpoliger Umschalter
 5. Kondensator unbekannter Kapazität
 6. Kapazitätsnormal
- } etwa in gleicher Größenordnung

Methodische Hinweise

1. In diesem Versuch wird die Kapazität C_x eines Kondensators durch Vergleich mit der eines Kapazitätsnormal C_n ermittelt. Da die Stoßausschläge x eines Galvanometers jeweils den Ladungen Q proportional sind,

$$x_x : x_n = Q_x : Q_n,$$

und die Ladungen sich bei konstanter Spannung wie die Kapazitäten verhalten,

$$Q_x : Q_n = C_x : C_n,$$

ergibt sich auch eine Proportionalität zwischen den ballistischen Ausschlägen und den Kapazitäten:

$$x_x : x_n = C_x : C_n$$

$$\text{oder } C_x = C_n \cdot \frac{x_x}{x_n}.$$

Daraus ergibt sich, daß für die Kapazitätsbestimmung durch Vergleichen auch ein ungeeichtes ballistisches Meßgerät genügt.

2. Will man verschiedene Methoden der Kapazitätsbestimmung einander gegenüberstellen, so führe man außer diesem Experiment noch V 5.3.4. und V 5.3.10. aus.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 5.3.9./1 ersichtlich. Die Größe der Ladespannung richtet sich nach der Kapazität der Kondensatoren und nach der Empfindlichkeit des Galvanometers und wird durch Probieren gefunden, wobei man mit kleinen Spannungen beginnt.

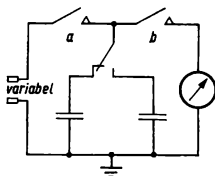


Abb. 5.3.9./1 Ermittlung der Kapazität durch Vergleichen

Man stellt den Umschalter wechselweise auf das Kapazitätsnormal und auf den Kondensator von unbekannter Kapazität ein. Durch Betätigen des Tasters *a* wird der jeweils eingeschaltete Kondensator geladen. Beim Schließen des Tasters *b* entlädt sich der Kondensator über das ballistische Galvanometer. Keinesfalls dürfen beide Taster gleichzeitig betätigt werden, da sonst das Galvanometer zerstört werden könnte. Die Stoßausschläge werden für beide Kondensatoren bei gleicher Ladespannung U gemessen. Nach der in MH Nr. 1 abgeleiteten Gleichung wird die Kapazität des unbekannten Kondensators bestimmt. Der Versuch wird in gleicher Weise bei anderen Ladespannungen durchgeführt, um durch Mittelwertbildung zu einem genaueren Ergebnis zu gelangen.

5.3.10. Vergleich der Kapazitäten zweier Kondensatoren mit Hilfe einer Wechselstrom-Meßbrücke [SE]

Zu Variante a

1. Wheatstonesche Brücke (Länge 1 m) oder Widerstandsdraht und Meßstab
2. Kondensator unbekannter Kapazität
3. Kapazitätsnormal (etwa in gleicher Größenordnung wie die unbekannte Kapazität)
4. Schalter
5. Tongenerator (z.B. Universalgenerator UVG 1 oder tonfrequenter Summer)
6. Kopfhörer
7. Ein-Taster

Zu Variante b

- Geräte 1. bis 5., außerdem
8. Verstärker (z.B. Schulmeßverstärker)
 9. Lautsprecher

Zu Variante c

- Geräte 1. bis 4., außerdem
10. Stromversorgungsggerät
 11. Demonstrations-Oszillograf (z.B. ED 1 – AB)

Methodische Hinweise

1. Da sich die Kapazität eines Kondensators im Wechselstromkreis als Blindwiderstand äußert, kann man die Kapazitäten zweier Kondensatoren an einer von Wechselstrom durchflossenen Wheatstoneschen Brücke miteinander vergleichen. Man legt die Kondensatoren an Stelle zweier Widerstände in die Zweige einer Brückenschaltung (vgl. Abb. 5.3.10./1). Eine Stromlosigkeit im Verbindungs-

stück zwischen den beiden Brückenzeigen tritt nur ein, wenn die einander entsprechenden Teilspannungen auf beiden Brückenzeigen gleich sind. Daraus ergibt sich für die Widerstände die Beziehung

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Die kapazitiven Widerstände sind

$$X_1 = \frac{1}{\omega \cdot C_n} \quad \text{und} \quad X_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_z}.$$

Somit ergibt sich

$$\frac{\frac{1}{\omega \cdot C_n}}{\frac{1}{\omega \cdot C_z}} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{oder} \quad \frac{C_z}{C_n} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Die Widerstände der Abschnitte des Meßdrahtes verhalten sich wie ihre Längen:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{a}{100 - a}.$$

Daraus folgt: $\frac{C_z}{C_n} = \frac{a}{100 - a}$ oder $C_z = C_n \cdot \frac{a}{100 - a}.$

Da die Größen der rechten Seite bekannt sind, läßt sich C_n hieraus berechnen. Der Versuch ändert sich nicht, wenn man die Wechselstromquelle und das Anzeigegerät miteinander vertauscht.

2. Variante a eignet sich besonders als Schülerexperiment, während in Variante b die prinzipiell gleiche Anordnung zur Demonstration benutzt wird. Besonders gut geeignet als Demonstrationsexperiment ist Variante c.
3. Wenn es nicht auf genaue Meßergebnisse, sondern vorwiegend auf die Darstellung des Prinzips ankommt, kann der Brückendraht auch durch ein Potentiometer, z. B. von 330 Ω , ersetzt werden.

Variante a: Akustische Anzeige, Einzelbeobachtung

Man stellt die Versuchsanordnung nach Abbildung 5.3.10./1 her. Als Wechselstromquelle verwendet man einen Tongenerator. In die Brückenleitung schaltet man als Anzeigegerät einen Kopfhörer, den man zur Verfeinerung der Beobachtung durch einen Taster kurzschließen kann. Durch Verschiebung des Brückenkontaktes stellt man auf Tonlosigkeit ein und liest die Teilstrecken des Brückendrahtes mit a und $(100 - a)$ ab.

Die unbekannte Kapazität wird nach der unter MH Nr. 1 gegebenen Gleichung berechnet.

Variante b: Akustische Anzeige, Gruppenbeobachtung

Die Versuchsanordnung entspricht der in Variante a, nur wird statt des Kopfhörers ein Lautsprecher mit Verstärker in die Brückenleitung eingeschaltet (Abb. 5.3.10./2). Dadurch kann das Einstellen der Stromlosigkeit vor der gesamten Klasse demonstriert werden.

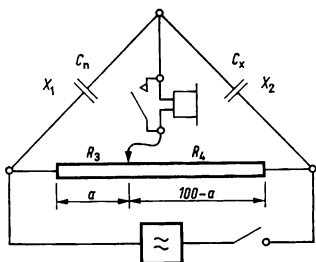


Abb. 5.3.10./1 Wechselstrommeßbrücke mit Kopfhörer

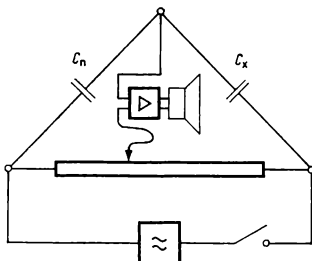
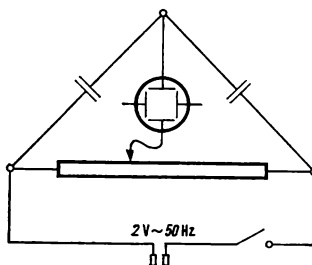


Abb. 5.3.10./2 Wechselstrommeßbrücke mit Verstärker und Lautsprecher

Abb. 5.3.10./3 Wechselstrommeßbrücke mit optischer Anzeige



Variante c: Optische Anzeige

Die Schaltung wird nach Abbildung 5.3.10./3 hergestellt. Als Wechselstromquelle dient ein Stromversorgungsgerät, als Anzeigegerät ein Oszillograf. Man benutzt Kleinspannung, deren Größe sich nach dem Widerstand des Meßdrahtes richtet. Am Oszillografen wird die Y-Verstärkung so eingestellt, daß das Verschwinden der Sinuskurve bei Stromlosigkeit der Brücke deutlich zu beobachten ist.

5.3.11. Parallelschaltung und Reihenschaltung von Kondensatoren

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. 2 Elektrolytkondensatoren (5000 μF)
3. Glühlampe (4 V; 0,05 A)
4. 2 Ein-Taster
5. Stellschalter

Zu Variante b

6. Stromversorgungsgerät (70 V —)
7. Drehpulmeßgerät als ballistisches Galvanometer
8. drei Kondensatoren (1 μF ; 2 μF ; 4 μF)
9. einpoliger Umschalter oder Morsetaste

Methodische Hinweise

1. In beiden Varianten wird die Vergrößerung der Gesamtkapazität durch Parallelschalten und ihre Verkleinerung durch Hintereinanderschalten von Kondensatoren qualitativ nachgewiesen. Dabei dient in der Variante a eine Glühlampe als Anzeigegerät. Die Dauer ihres Aufleuchtens wird beobachtet und daraus auf die Kapazität des Kondensators geschlossen. Eine längere Dauer des Lade- bzw. Entladevorganges deutet auf eine größere Kapazität hin und umgekehrt. In der Variante b vergleicht man die Kapazitäten mit Hilfe der Entladung über ein ballistisches Galvanometer, wobei man die Proportionalität zwischen dem Stoßausschlag und der Kapazität ausnutzt.
2. Vergleiche MH Nr. 1 V 5.3.9.!

*Variante a: Anzeige durch eine Glühlampe**Parallelschaltung*

Die Schaltung wird nach Abbildung 5.3.11./1 aufgebaut, wobei auf richtige Polung der Elektrolytkondensatoren zu achten ist. Bei geöffnetem Stellschalter wird der Taster a kurzzeitig betätigt und das Aufleuchten der Glühlampe während des Ladevorganges beobachtet. Danach wird durch Betätigen des Tasters b die Entladung in gleicher Weise vorgenommen. Zur Vermeidung eines Kurzschlusses dürfen die Taster keinesfalls gleichzeitig betätigt werden. Ersetzt man die beiden Taster durch einen Umschalter oder eine Morsetaste, so ist eine Fehlbildung ausgeschlossen. Schließt man nun den Stellschalter, so sind beide Kondensatoren parallel geschaltet. Mit Hilfe der beiden Taster wird das Laden und Entladen erneut durchgeführt und das Aufleuchten der Lampe beobachtet. Man erkennt, daß die Vorgänge länger dauern: Die Kapazität hat sich durch die Parallelschaltung der beiden Kondensatoren erhöht.

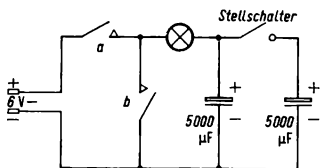


Abb. 5.3.11./1 Parallelschaltung zweier Kondensatoren

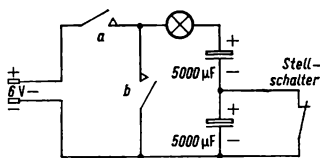


Abb. 5.3.11./2 Reihenschaltung zweier Kondensatoren

Reihenschaltung

Man ändert den Versuchsaufbau in der Weise ab, daß man die beiden Kondensatoren in Reihe schaltet und den Stellschalter parallel zu einem der Kondensatoren legt (Abb. 5.3.11./2). Durch Schließen des Stellschalters überbrückt man diesen Kondensator zunächst so, daß nur die Kapazität des anderen wirksam ist. In gleicher Weise wie bei der Parallelschaltung untersucht man nun Lade- und Entladestrom für einen Kondensator sowie für die in Reihe geschalteten Kondensatoren. Man stellt fest, daß die Kapazität bei Reihenschaltung kleiner als die eines einzelnen Kondensators ist.

Bemerkung

Wird der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt, so können die Einzelteile dem Baukastensystem „Elektrotechnik/Elektronik, Stufe 5“ entnommen werden.

Variante b: Vergleich mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers**Parallelschaltung**

Die Versuchsanordnung nach Abbildung 5.3.11./3 ermöglicht das Laden der Kondensatoren auf etwa 70 V und das Entladen über ein ballistisches Meßgerät. Als Vorversuch kann man die Kondensatoren zunächst einzeln und nacheinander auf die vorgesehene Spannung laden. Beim Entladen über das Galvanometer erkennt man die Proportionalität zwischen dem Stoßausschlag und der Kapazität.

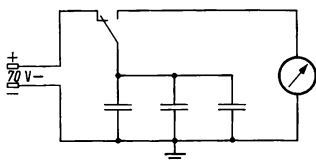


Abb. 5.3.11./3 Vergleich von Kapazitäten bei Parallelschaltung

Man schaltet die Kondensatoren zu zweien oder dreien parallel und findet, daß die Kapazität entsprechend zunimmt.

Die Gesamtkapazität parallelgeschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Reihenschaltung

Man schaltet die Kondensatoren in beliebiger Zusammenstellung, in Gruppen zu zweien oder dreien hintereinander, ein und beobachtet die Stoßausschläge beim Entladen nach vorangegangener Aufladung auf die gleiche Spannung. Die Gesamtkapazität erweist sich als kleiner als die kleinste Einzelkapazität. Durch quantitative Messungen kann nachgewiesen werden, daß das Reziproke der Gesamtkapazität gleich der Summe der Reziproken der Einzelkapazitäten ist:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Bemerkungen

1. Sollen die Gesetzmäßigkeiten über Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren exakt quantitativ bestätigt werden, so kann man in einer Versuchsreihe nach V 5.3.4. alle Kapazitäten mit Hilfe eines geeichten ballistischen Galvanometers bestimmen.
2. Zur Vereinfachung des Umschaltens und zur übersichtlicheren Anordnung der Kondensatoren kann man ein besonderes Schaltbrett nach Abbildung 5.3.11./4

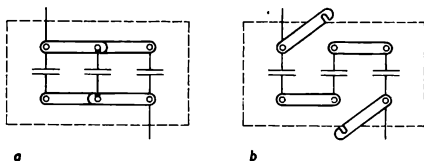


Abb. 5.3.11./4 Schaltbrett für Kondensatoren,
a) Parallelschaltung, b) Reihenschaltung dreier Kondensatoren

selbst herstellen. Die Kondensatoren werden mit Hilfe von Laschen entweder in Reihe oder parallel geschaltet.

3. Als Beispiel für die technische Ausführung der Parallelschaltung von Kondensatoren können die in der Lehrmittelsammlung vorhandenen Kondensatorbatterien dienen.



5.3.12. Spannungsverlauf beim Laden eines Kondensators

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Elektrolytkondensator (5000 μF)
3. Spannungsmesser (10 V)
4. Einstellwiderstand (10 k Ω)
5. Widerstand (50 Ω)
6. Stellschalter
7. Ein-Taster
8. Stoppuhr oder Uhr mit Sekundenzeiger

Zu Variante b

- Gerät 1., außerdem
9. Kondensator (1 nF ... 0,5 μF ; 250 V)
 10. Kondensator (25 nF; 250 V)
 11. Einstellwiderstand (1 M Ω ; 0,4 W)
 12. Glimmröhre (GRM 10-12)
 13. Oszillograf

Methodischer Hinweis

In Variante a wird der zeitliche Verlauf der Spannung während des allmählich erfolgenden Aufladens eines Kondensators messend untersucht und in einem Diagramm dargestellt. Dagegen werden in der Variante b Kippschwingungen erzeugt, und der Spannungsverlauf wird auf dem Bildschirm eines Oszillografen sichtbar gemacht.

Variante a: Spannungsmesser und Stoppuhr

Der Versuchsaufbau wird nach Abbildung 5.3.12./1 hergestellt, wobei auf richtige Polung des Elektrolytkondensators zu achten ist. Der Kondensator wird durch

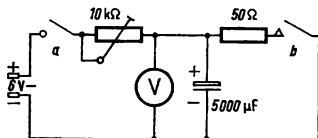


Abb. 5.3.12./1 Schaltplan zum Messen der Spannung während des Ladens eines Kondensators

Schließen des Schalters *a* über den Einstellwiderstand aufgeladen und nach Beendigung der Meßreihe wieder durch Betätigung des Tasters *b* entladen.

Der veränderliche Widerstand wird zunächst so eingestellt, daß etwa $\frac{1}{4}$ seines Bereiches wirksam ist, also etwa $2,5 \text{ k}\Omega$.

Im Augenblick des Schließens des Ladestromkreises mit Hilfe des Schalters *a* wird die Stoppuhr in Gang gesetzt. Die ansteigende Spannung wird jeweils nach 5 s abgelesen und in eine Tabelle eingetragen. Das Funktionsbild $U = f(t)$ zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung.

In gleicher Weise werden Meßreihen bei einer Einstellung des Widerstandes auf etwa $5 \text{ k}\Omega$ (Hälfte des Einstellbereiches) und $10 \text{ k}\Omega$ aufgenommen und ausgewertet. Beim Vergleich der Funktionsbilder ist festzustellen, daß der Spannungsanstieg beim Laden des Kondensators um so schneller verläuft, je kleiner der Widerstand im Ladestromkreis ist.

Bemerkung

Wird der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt, so können die Aufbauteile dem Baukastensystem „Elektrotechnik/Elektronik, Stufe 5“ entnommen werden.

Variante b: Kippschwingungen

Mit Hilfe einer Schaltung nach Abbildung 5.3.12./2 werden Kippschwingungen erzeugt und auf dem Bildschirm des Oszillografen sichtbar gemacht. Der Kondensator von $1 \text{ nF} \dots 0,5 \mu\text{F}$ wird über den Widerstand geladen und nach dem Erreichen

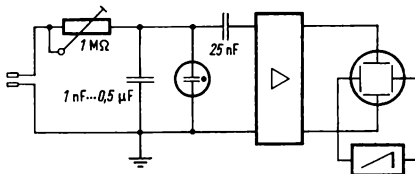


Abb. 5.3.12./2 Schaltplan zum Erzeugen und Nachweisen von Kippschwingungen

der Zündspannung über die Glimmröhre wieder entladen. Der zweite Kondensator dient zur Kopplung mit dem Y-Eingang des Oszillografen. Bei entsprechender Einstellung des Kippgenerators erhält man ein stehendes Bild des Spannungsverlaufs am Kondensator. Durch Verändern des Einstellwiderstandes und Einsetzen verschiedener Kondensatoren läßt sich zeigen, daß die Frequenz der Kippschwingung vom Widerstand im Ladestromkreis und von der Kapazität abhängt.

5.4. Die elektrische Influenz

5.4.1. Influenz an einem Plattenpaar im Feld eines Plattenkondensators

- | | |
|--|---|
| 1. Bandgenerator oder Influenzmaschine | 5. Elektrometer oder Elektroskop |
| 2. 2 Kondensatorplatten | 6. Glastab |
| 3. 2 Fußklemmen | 7. PVC-Stab |
| 4. Plattenpaar ⑤ | 8. Reibzeug (Dederontuch, Seidentuch, Wolltuch) |

Methodischer Hinweis

Im Versuch werden die im elektrischen Feld durch Influenz entstehenden Ladungen getrennt, nachgewiesen und auf ihre Polarität hin untersucht. Im Zusammenhang damit können alle wesentlichen Kenntnisse über die Influenz erarbeitet werden.

Versuche

Zwischen den Platten eines Kondensators wird ein elektrisches Feld erzeugt. In dieses Feld bringt man ein Plattenpaar (Abb. 5.4.1./1).

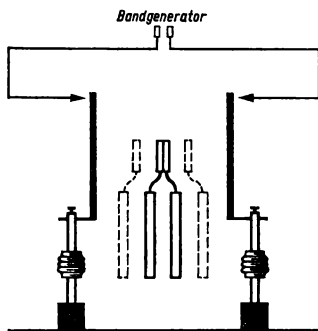


Abb. 5.4.1./1 Doppelplatte im Feld eines Kondensators

1. Das Plattenpaar wird bei gegenseitiger Berührung in das Feld gebracht und in gleicher Weise entfernt. Es erweist sich am Elektrometer als ungeladen.
2. Das Plattenpaar wird bei gegenseitiger Berührung in das Feld gebracht, die Platten werden getrennt und einzeln aus dem Feld herausgenommen. Man hält beide Platten nacheinander an das ungeladene Elektrometer; sie erweisen sich als geladen. Die Art der Ladung kann beim Annähern eines geriebenen Glasstabes bzw. eines PVC-Stabes durch Beobachten des Ausschlages ermittelt werden. Sie ist ungleichnamig zur Ladung der Kondensatorplatten, denen gegenüber sie sich befanden.
3. Die eine Platte des Plattenpaares wird aus dem Feld an das Elektrometer gebracht; dieses wird durch Berührung geladen. An das geladene Elektrometer hält man die zweite Platte aus dem Feld. Die Ladung des Elektrometers wird aufgehoben. Beide Platten sind gleich stark, jedoch entgegengesetzt geladen.

Bemerkungen

1. Die beiden Platten des Paares müssen gut isoliert sein. Man kann sie einzeln aus etwa 0,5 mm dickem Blech mit einem Durchmesser von etwa 30 mm ... 50 mm anfertigen. Die Kanten sind gut zu runden, damit Ladungsverluste klein bleiben. Zum Befestigen läßt man ein etwa 30 mm langes gerades Stück stehen. Dieses Stück wird S-förmig gebogen und mit Siegellack oder Alleskleber in einen ausgebohrten PVC-Stab eingeklebt (Abb. 5.4.1./2). Glas empfiehlt sich hierfür weniger, da meist Ladungsverluste auftreten.

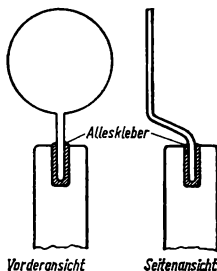


Abb. 5.4.1./2 Einzelplatte

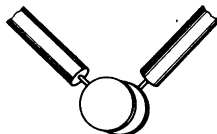


Abb. 5.4.1./3 Verwendung zweier Ladungslöffel

Man kann statt der selbstangefertigten gekröpften Platten auch zwei der üblichen Ladungslöffel verwenden, wenn man ihre Isolierstiele schräg versetzt hält (Abb. 5.4.1./3).

2. Werden die Platten wiederholt nacheinander benutzt, so können Störungen durch Restladungen entstehen, da die Platten an den Stäben einen Kondensator darstellen. Es muß bei quantitativen Versuchen darauf geachtet werden, daß die Entladung vollständig ist. Gegebenenfalls sind die Geräte vorsichtig durch eine Flamme zu ziehen.
3. Versuch 3 zeigt, daß die Ladungen gleich groß sind. Dieser Nachweis ist meist einwandfrei zu führen, da kleine Ladungsverluste der Platten den Versuch nicht stören.

5.4.2. Influenz an Metallzylindern

- | | |
|--|---|
| 1. Zwei isoliert aufstellbare Metallzylinder ⑧ | 4. Dederon- oder Wolltuch |
| 2. zwei Fußklemmen | 5. Draht |
| 3. PVC-Stab | 6. Seidenpapier oder Holundermarkkugeln |

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient zur Ergänzung von V 5.4.1. Er zeigt insbesondere die örtliche Verteilung der durch Influenz hervorgerufenen Ladungen an.

Versuch

Auf die Metallzylinder werden einige Seidenblattelektroskope an Drähten aufgesetzt (Abb. 5.4.2./1). Die Drähte werden angelötet oder mit etwas Knetmasse befestigt. Die Zylinder werden unter gegenseitiger Berührung nebeneinander aufgestellt. Nähert man dem einen Zylinderende einen geriebenen PVC-Stab, so zeigen die Elektroskope durch Spreizen der Blättchen an beiden Enden Ladungen an. Die Blättchen in der Zylindermitte bleiben in Ruhe. Wird der Staub entfernt, so verschwindet die Influenzladung.

Werden die Zylinder in der Mitte getrennt, solange der PVC-Stab angenähert ist, so bleibt in jedem Teil die Ladung bestehen. Es ist besonders zu beachten, daß sich jetzt auch der Mittelteil als geladen erweist, wie die dort befindlichen Elektroskope anzeigen.

Der Versuch kann auch mit einem geladenen Glasstab durchgeführt werden.

Die Influenzladungen lassen sich bei getrennten Zylindern durch Annähern geladener Stäbe als positiv bzw. als negativ nachweisen.

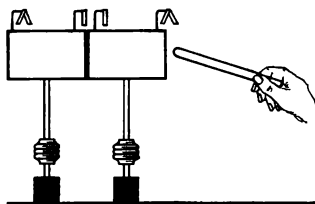


Abb. 5.4.2./1 Influenz an zwei Metallzylindern

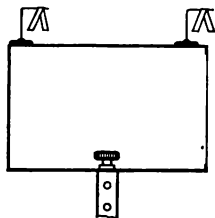


Abb. 5.4.2./2 Behelfsmäßiger Influenzzylinder

Bemerkung

Als Zylinder können, wie es in Abbildung 5.4.2./2 dargestellt ist, zwei gebrauchte Konservendosen verwendet werden, deren Deckel sauber ausgeschnitten sind. Man durchbohrt den Zylindermantel an einer Stelle, so daß er an einer Fußklemme festgeschraubt werden kann. Als Elektroskope kann man statt der Föhnchen aus Seidenpapier auch Holundermarkkugeln verwenden.

5.4.3. Nachweis der Influenz mit Hilfe einer Funkenstrecke

1. Influenzmaschine
oder Bandgenerator
2. 2 Kondensatorplatten
3. 2 Fußklemmen
4. Funkenstrecke ⑧, dazu erforderliches Material:
 - a) Glasplatte (etwa 15 cm × 10 cm)
 - b) Aluminiumfolie
 - c) Alleskleber

Methodischer Hinweis

In diesem Versuch wird die Influenz im elektrischen Feld eines Kondensators dadurch nachgewiesen, daß eine sichtbare Entladungserscheinung beobachtet werden kann.

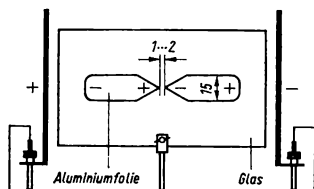


Abb. 5.4.3./1 Nachweis der Influenz durch Spitzenentladung

Versuch

Auf eine Glasplatte werden zwei nach Abbildung 5.4.3./1 zugeschnittene Streifen Aluminiumfolie geklebt. Die äußeren Enden der Streifen sollen gut abgerundet sein, damit es nicht zu unerwünschten Spitzenentladungen an diesen Stellen kommt. Bringt man diese Funkenstrecke in das elektrische Feld eines Kondensators, der ständig durch eine Influenzmaschine oder einen Bandgenerator nachgeladen wird, so ist zwischen den Spitzen eine Entladungserscheinung zu beobachten. Es empfiehlt sich, diesen Versuch im völlig verdunkelten Raum durchzuführen. Die Entladung ist eine Folge der Influenz. Im Feld des Kondensators werden Ladungen in den beiden Aluminiumstreifen so getrennt, daß sich an den Spitzen ungleichartige Ladungen gegenüberstehen (vgl. Abb. 5.4.3./1).

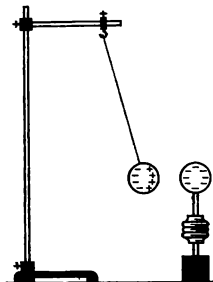
5.4.4. Aufladen eines Elektroskops durch Influenz*Zum Vorversuch*

1. Influenzmaschine oder Bandgenerator
2. Kugelkonduktor auf Isolierfuß
3. außenverspiegelte Glaskugel an Dederon- oder Seidenfaden

Zum Hauptversuch

4. Elektroskop
5. Glasstab
6. PVC-Stab
7. Dederon- oder Wolltuch
8. Seidentuch

Abb. 5.4.4./1 Influenzwirkung zwischen einem Konduktor und einer Kugel



Methodische Hinweise

1. Der Vorversuch soll zum besseren Verständnis der für die Schüler nicht leicht durchschaubaren Vorgänge im Hauptversuch führen.
2. Im Hauptversuch wird zunächst durch Influenz eine Ladungstrennung hervorgerufen. Danach wird die eine Ladung abgeleitet, während die andere auf dem Körper verbleibt.

Vorversuch

Nähert man einer ungeladenen außenverspiegelten Glaskugel nach Abbildung 5.4.4./1 einen negativ geladenen Konduktor, dann wird sie infolge der Influenz zu ihm hingezogen. Berührt man die dem Konduktor abgewandte Seite der Kugel mit einer Erdleitung oder mit der Hand, so wird die negative Ladung abgeleitet, und auf der Kugel bleibt die positive Ladung zurück.

Hauptversuch

Dem Elektroskop wird ein durch Reiben mit einem Dederon- oder Wolltuch elektrisch geladener PVC-Stab allmählich auf einen geringen Abstand genähert (Abb. 5.4.4./2a). Die vom Elektroskop angezeigte Ladung wird durch Erden bzw. Berühren mit dem Finger abgeleitet, wobei der PVC-Stab unverändert in der Nähe des Elektroskops bleibt (Abb. 5.4.4./2b). Nach Aufheben der Erdverbindung entfernt man den PVC-Stab. Das Elektroskop zeigt infolge von Influenz eine Ladung an (Abb. 5.4.4./2c).

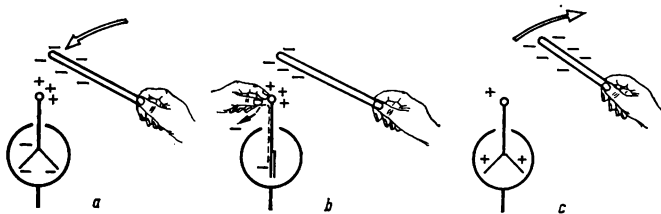


Abb. 5.4.4./2 Aufladen eines Elektroskops durch Influenz

Der Ausschlag des Elektroskops vergrößert sich beim Annähern eines geriebenen Glasstabes bzw. verkleinert sich beim Annähern eines geriebenen PVC-Stabes. Die Influenzladung ist positiv.

Die negative Aufladung eines Elektroskops wird entsprechend mit einem geladenen Glasstab durchgeführt.

Bemerkungen

1. Zweckmäßig ist es, zum Vergleich auch die direkte Aufladung des Elektroskops zu zeigen, um den Unterschied der Ladungen gegenüber dem Influenzversuch herauszustellen.
2. Läßt sich der Glasstab schlecht aufladen, so zieht man ihn zum Entfernen der anhaftenden Wasserhaut vorsichtig mehrmals durch eine Gasflamme.
3. Der Versuch kann als Schülerexperiment mit Teilen des SEG Elektrostatik ausgeführt werden.

Register

- Akkumulator** 15 ff.
Arbeit, elektrische 45, 64
Arbeitsschutz 41
- Bandgenerator** 21
Bleiakkumulator 15 f.
- Coulombsches Gesetz** 151 ff.
- Dielektrikum** 173
Dielektrizitätskonstante, relative 176 ff.
Dreheisengerät 27 f.
Drehspulgerät 27 f.
- Einstellwiderstände** 24
Elektrolyse 62
Elektronenstrom 44
Elektroskop 29, 44, 46, 52, 53, 186 f., 189 f.
Elmsfeuer 158
- Faradaybecher** 131
Farbcode 23
Feldkonstante, elektrische 174 ff.
Feldkräfte 146 ff.
Feldlinien, elektrische 142 ff.
Flammsonde 159 f.
Folien 38
Funkeninduktor 22
Funkenstrecke 188
- Galvanisches Element** 17
Gasentstaubung 160 f.
- Halbleiter** 81 ff.
- Impulszählgerät** 125
Influenz 186 ff.
- Influenzmaschine** 22
Isolator 47 f.
- Kapazität** 168
Kapazität eines Kondensators 168 ff., 173
Kilowattstundenzähler 31
Kondensator 26 f., 163 ff., 178, 184 f.
- Ladungsaustausch** 45 f.
Ladungstrennung 128
Leistung, elektrische 45, 67
Leistungsmesser 31
Leiter 47 f.
Linearbeschleuniger 163
Lötarbeiten 39 f.
- Meßbereichserweiterung** 106 ff., 115 ff.
Meßbrücke 179
Meßgeräte, ballistische 124 f.
Meßwiderstände 25 f.
- Netzadapter** 20, 43
Nickel-Cadmium-Akkumulator 15, 16
Nickel-Stahl-Akkumulator 15, 16
- Ohmsches Gesetz** 76 f.
- Parallelschaltung** 181 f.
Plaste 40
- Reihenschaltung** 103 ff., 181 f.
- Schalttafel** 20
Schülerexperimentiergeräte 32
Spannung, elektrische 44, 51, 53
Spannungsabfall 101 f.
Spannungsstufen 15

- Spannungsteilerschaltung 116 ff.
Spannungsverlauf 184
Spannungsverteilung 104 f.
Spannungswaage 54
Spiegelgalvanometer 29
Spitzenwirkung 157 ff.
Stromkreis, elektrischer 44, 55, 100 ff.
Stromrichtung, elektrische 44
Stromstärke, elektrische 45
Stromstoß 124
Stromversorgungsgerät 17
Stromverzweigung 110 ff.
Temperaturabhängigkeit 78 f.
Tesla-Transformator 22 f.
unverzweigter Stromkreis 100 ff.
verzweigter Stromkreis 100 ff.
Vielfachmeßgerät 28, 30 f.
Vorwiderstand 109
Wechselstrom 50
Wheatstonesche Meßbrücke 94
Widerstand, elektrischer 76 ff.
Widerstand, spezifischer 88 f.
Widerstandsbestimmung 91 ff.
Widerstandsgesetz 85 ff.
Widerstandssubstitution 99
Windrädchen, elektrisches 158
Wirkungsgrad 71

Quellennachweis der Abbildungen

Brunstein, W., Greifswald: 1.1.4./2, 1.1.4./3, 1.1.4./4, 1.1.5./1, 1.2.2./2, 1.3.1./2, 1.3.4./2, 1.3.5./1, 1.4.6./2, 1.4.6./5, 3.1.1./2, 3.1.1./3, 3.3.4./2, 4.1.2./2; Held, L., Weimar: 5. 0.2./1; Seifert, Volk und Wissen, Berlin: 1.2.2./1, 1.3.1./2, 1.3.4./1; VWV Archiv: 1.1.4./1, 1.1.7./1, 1.1.7./2, 1.1.7./3, 1.1.7./4, 1.2.3./1, 1.2.4./1, 1.3.1./3, 1.3.6./1, 1.4.5./1, 1.4.5./2, 1.4.6./1, 1.4.8./1a, 1.4.8./1b, 5.2.3./2, 5.2.3./3, 5.2.3./5, 5.2.3./6.