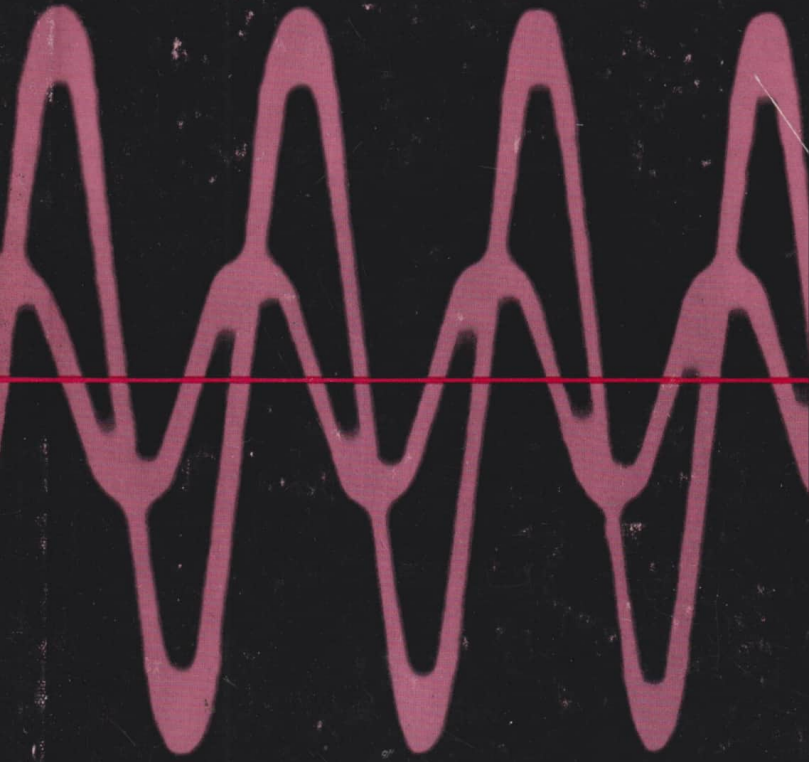
Physikalische Schulversuche 9

Elektrizitätslehre II



Physikalische Schulversuche

Neunter Teil
Elektrizitätslehre II

Herausgegeben von Georg Sprockhoff
Bearbeitet von Wolfgang Brunstein

6. Auflage



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1980

Verfaßt von

Wolfgang Brunstein (1.0., 1.1.3.*, 1.1.14., 1.3.10., 1.4.5. bis 1.4.8., 1.4.11.*, 2.0., 2.1. außer 2.1.6., 2.3., 4.0., 4.1.3., 4.2.1.*, 4.2.2.*, 4.2.4.*,4.2.7.*, 4.3.1.*, 4.3.2. bis 4.3.4., 4.3.6., 5.0.*, 5.2.4.*, 5.3.1. bis 5.3.10.)

Josef Fischer und Heinrich Paucker (1.1.1., 1.1.2., 1.1.4. bis 1.1.7., 1.1.9., 1.1.11. bis 1.1.13., 1.1.15. bis 1.1.18., 1.2.1., 1.2.15., 1.2.16., 3.2.8*, 5.2.1. bis 5.2.3., 5.2.4.*, 5.2.5. bis 5.2.16., 5.3.11. bis 5.3.13.)

Dr. Jan Groeneveld (4.1.6.)

Gerhard Heise (2.4., 3.0., 3.1., 3.2.1. bis 3.2.7., 3.2.8.*)

Dr. Otto Joachimi (1.2.10., 1.2.11., 1.3.1., 1.3.2., 4.1.2 ., 4.1.4., 4.1.5., 4.2.*, 4.4.)

Dr. Wolfgang Manthei (2.2.1.*, 2.2.2. bis 2.2.13., 2.2.14.*)

Hans Reichelt (1.2.1.*, 1.2.2. bis 1.2.4., 1.2.6., 1.2.9., 1.2.12., 1.2.14., 1.3.3. bis 1.3.9., 2.1.6.)

Dr. Helmut Roth (4.1.1., 4.3.1.*, 4.3.5., 5.1.)

Georg Sprockhoff (1.1.8., 1.1.10., 1.2.5., 1.2.7., 1.2.8., 1.2.13., 1.4.1. bis 1.4.4., 2.2.14.*)

Kurt Weber (1.1.19. bis 1.1.22., 1.4.9., 1.4.10., 1.4.11.*, 2.2.15.)

Kollektiv des Bereiches Methodik des Physikunterrichts, Pädagogische Hochschule „Liselotte Herrmann", Güstrow (1.1.3.*, 3.1.10., 3.1.11., 4.2.4.*, 4.2.7.*, 4.2.10., 5.0.*, 5.3.14. bis 5.3.19.)

Versuchsbeschreibungen mit einem Stern (*) wurden von mehreren Autoren erarbeitet.

Redaktion: Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1975
Die 1. bis 3. Auflage erschienen unter der Bestell-Nr. 022109
Lizenz Nr. 203 · 1000/80 (DN 022145-3)
LSV 0645
Einband: Manfred Behrendt
Zeichnungen: Heinrich Linkwitz
Typografie: Atelier vwv, Wolfgang Lorenz
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza
Schrift: 9/10 Extended Monotype
Redaktionsschluß: 1.8.1979
Bestell-Nr. 706827 2
DDR: 13,50 M

Inhalt

Einleitung 11

1. Das konstante magnetische Feld 15

1.0. **Methodische Bemerkungen** 15

1.1. **Permanente Magnete** 17

1.1.1. Nachweis der magnetischen Wirkung von Magneteisenstein 17
1.1.2. Kraftwirkung eines Magneten auf Stoffe 18
1.1.3. Dia- und paramagnetische Stoffe im Magnetfeld 18
1.1.4. Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Eisenstück 20
1.1.5. Kraftverteilung an Magneten 21
1.1.6. Vergleich der Pole eines Magneten 22
1.1.7. Bestimmen der Polarten eines Stabmagneten 23
1.1.8. Untersuchung des Erdfeldes am Beobachtungsort 24
1.1.9. Kraftwirkung zwischen Magnetpolen 25
1.1.10. Durchlässigkeit von Stoffen für magnetische Kraftwirkungen 27
1.1.11. Veranschaulichung magnetischer Feldlinien durch Eisenfeilspäne 28
1.1.12. Herstellen dauerhafter Feldlinienbilder mit Hilfe von paraffiniertem Papier oder mit Hilfe von Fotopapier 29
1.1.13. Nachweis der magnetischen Influenz 30
1.1.14. Influenz in magnetisch weichem und hartem Eisen 31
1.1.15. Magnetisierung durch Influenz 31
1.1.16. Modellversuch zum Veranschaulichen des Magnetisierungsvorganges 32
1.1.17. Teilung eines Magnetstabes 32
1.1.18. Magnetisieren eines Stahlkörpers mit Hilfe von Influenz durch das Magnetfeld der Erde 33
1.1.19. Akustische Wahrnehmung der Wandverschiebung bzw. Wandumklappung Weißscher Bezirke — Barkhausen-Geräusch 34
1.1.20. Abbilden einer Hysteresisschleife mit Hilfe eines Katodenstrahloszillografen . . 35
1.1.21. Nachweis des remanenten Magnetismus in einem geschlossenen Eisenkern . . . 37
1.1.22. Nachweis des Curie-Punktes 38

1.2. **Magnetfeld stromdurchflossener Leiter** 39

1.2.1. Ablenkung einer Magnetnadel an einem stromdurchflossenen Leiter 39
1.2.2. Feldlinienbild eines stromdurchflossenen Leiters 41
1.2.3. Der Richtungssinn der magnetischen Feldlinien eines stromdurchflossenen geradlinigen Leiters — Bestimmung mit Hilfe einer Kompaßnadel 42
1.2.4. Der Richtungssinn der magnetischen Feldlinien eines vom Strom durchflossenen geradlinigen Leiters — Nachweis durch eine schwimmende Stricknadel 42

1.2.5. Gegenseitige Anziehung und Abstoßung zweier stromdurchflossener geradliniger Leiter . . . 43
1.2.6. Feldlinienbilder an parallelen stromdurchflossenen Leitern . . . 44
1.2.7. Aufwendeln eines stromdurchflossenen Lamettafadens um einen Magnetstab . 45
1.2.8. Die Ablenkung einer Kompaßnadel in einer stromdurchflossenen Leiterschleife 46
1.2.9. Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Leiterschleife . . . 47
1.2.10. Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf eine Kompaßnadel . . . 48
1.2.11. Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf einen Weicheisenkern . . . 49
1.2.12. Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule . . . 50
1.2.13. Feldlinienverlauf an einer Kastenspule . . . 51
1.2.14. Kräfte an stromdurchflossenen Spulen . . . 52
1.2.15. Marschkompaß als behelfsmäßiges Galvanoskop . . . 53
1.2.16. Selbstbau eines Vertikalgalvanoskops . . . 54

1.3. **Elektromagnete** . . . 55

1.3.1. Die Tragkraft von Elektromagneten . . . 55
1.3.2. Feldlinienbilder von Elektromagneten . . . 56
1.3.3. Modell eines Morseapparates . . . 57
1.3.4. Modell einer Fallklappe . . . 58
1.3 5 Modelle von Relais . . . 59
1.3.6. Wagnerscher Hammer — Elektrische Klingel . . . 60
1.3.7. Modellversuch zur Wirkungsweise eines Mikrofons und Telefons . . . 61
1.3.8. Modell eines Dreheisenmeßwerks . . . 63
1.3.9. Modell eines Drehspulmeßwerks . . . 64
1.3.10. Modell eines Leistungsmessers . . . 66

1.4. **Feldgrößen des Magnetfeldes** . . . 67

1.4.1. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung einer Balkenwaage . . . 67
1.4.2. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung eines Magnetometers . . . 68
1.4.3. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung eines magnetischen Zeigers . . . 70
1.4.4. Bestimmung der Horizontalintensität der magnetischen Feldstärke der Erde . 71
1.4.5. Untersuchung der Lorentzkraft und der magnetischen Induktion . . . 73
1.4.6. Bestimmung der magnetischen Induktion im homogenen Feld durch Messung der Lorentzkraft mit Hilfe einer Balkenwaage . . . 75
1.4.7. Untersuchung der Lorentzkraft mit Hilfe des Gerätes zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern . . . 78
1.4.8. Abhängigkeit der magnetischen Induktion im Innern einer langen Spule . . . 81
1.4.9. Angenäherte Bestimmung der relativen Permeabilität durch Abreißversuch . . 82
1.4.10. Bestimmen der relativen Permeabilität durch Messen von Spannungsstößen . . 83
1.4.11. Schirmwirkung des Eisens . . . 85

2. Die elektromagnetische Induktion 87

2.0. **Methodische Bemerkungen** 87

2.1. **Die Gesetze der elektromagnetischen Induktion** 89

2.1.1. Induktionsspannung in einer beweglichen Leiterschleife 89
2.1.2. Induktionsspannung in bewegten Spulen 91
2.1.3. Induktionsspannung im veränderlichen Feld eines Elektromagneten 93
2.1.4. Untersuchung der Bedingungen für Induktionsspannungen 94
2.1.5. Untersuchung der Abhängigkeit der Induktionsspannung mit dem Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes 96
2.1.6. Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetflusses 97
2.1.7. Abhängigkeit des induzierten Spannungsstoßes von Feldstärke, Fläche und Windungszahl 100
2.1.8. Nachweis der Lenzschen Regel 102
2.1.9. Thomsonscher Ringversuch 104

2.2. **Der Transformator** 104

2.2.1. Wirkungsweise eines Transformators mit Wechselstrom geringer Frequenz . . 104
2.2.2. Induktionswirkung einer Primärspule auf eine Sekundärspule 106
2.2.3. Das Umspannen von Wechselstrom — Hinauftransformieren 107
2.2.4. Das Umspannen von Wechselstrom — Heruntertransformieren 109
2.2.5. Ändern der Spannung und der Stromstärke durch einen Transformator . . . 111
2.2.6. Spannung und Stromstärke am belasteten Transformator 113
2.2.7. Der Wirkungsgrad eines Transformators 114
2.2.8. Energieumwandlungen an einem unbelasteten Transformator 116
2.2.9. Sparschaltung eines Transformators 117
2.2.10. Modell einer Fernleitung zur Energieübertragung 118
2.2.11. Modellversuch zum Punktschweißen 119
2.2.12. Modellversuch zur Wirkungsweise des Induktionsofens 120
2.2.13. Modelle von Meßwandlern 121
2.2.14. Modell der Zündanlage eines Kraftwagens 122
2.2.15. Modell eines elektrischen Weidezaungerätes 123

2.3. **Die Selbstinduktion** 124

2.3.1. Selbstinduktion im Gleichstromkreis beim Zerhacken des Gleichstromes . . . 124
2.3.2. Nachweis der Selbstinduktion beim Ausschalten durch eine Glimmlampe . . . 125
2.3.3. Nachweis der Selbstinduktion beim Einschalten durch Glühlampen 126
2.3.4. Abreißen eines Lichtbogens infolge von Selbstinduktion 127
2.3.5. Modell eines Funkeninduktors aus Aufbauteilen 128
2.3.6. Zündung einer Leuchtstoffröhre 128

2.4. **Wirbelströme** 130

2.4.1. Waltenhofensches Pendel 130
2.4.2. Modell einer Wirbelstrombremse 131
2.4.3. Versuche mit der Aragoscheibe 132
2.4.4. Modell eines Tachometers 133
2.4.5. Einfluß der Blätterung eines Eisenkerns 134
2.4.6. Modell eines Wechselstromzählers 135

3. Elektrische Maschinen 137

3.0. **Methodische Bemerkungen** 137

3.1. **Generatoren und Motoren für Gleichstrom und für Wechselstrom** . . 144

3.1.1. Modell eines Generators mit Permanentmagnet 144
3.1.2. Untersuchung der Wechselspannungskurve mit dem Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes 147
3.1.3. Modell eines Generators mit fremderregtem Feldmagneten 149
3.1.4. Modell eines Wechselstromgenerators als Innenpolmaschine 151
3.1.5. Modell eines Nebenschluß- und Reihenschlußgenerators für Gleichstrom . . . 152
3.1.6. Modelle verschiedener Gleichstrommotoren 154
3.1.7. Der Gleichstrommotor als Generator 158
3.1.8. Modell eines Wechselstrom-Synchronmotors 159
3.1.9. Modellversuch zum Kommutator 161
3.1.10. Leistungslose Drehzahlmessung am Generator-Motor-Modell 163
3.1.11. Ermittlung des Wirkungsgrades eines Generators 165

3.2. **Drehstromgeneratoren und -motoren** 167

3.2.1. Erzeugen von drei phasensymmetrischen Wechselströmen 167
3.2.2. Untersuchung der Dreiphasenwechselspannung mit Hilfe eines Flüssigkeitswiderstandsgerätes 168
3.2.3. Modell eines fremderregten Drehstromgenerators 170
3.2.4. Die Verkettung der Ströme eines Drehstromgenerators in Sternschaltung und in Dreieckschaltung 172
3.2.5. Verkettung von Spannungen und Stromstärken 175
3.2.6. Modellversuch zum Drehfeld 177
3.2.7. Modelle von Drehstrommotoren 178
3.2.8. Hebeschalter- und Walzenschaltermodell eines Stern-Dreieck-Schalters . . . 181

4. Der Wechselstromkreis 184

4.0. **Methodische Bemerkungen** 184

4.1. **Nachweis eines Wechselstromes** 187

4.1.1. Erzeugung von Wechselströmen niedriger Frequenz 187
4.1.2. Nachweis des Wechselstromes durch einen Schleifenoszillografen 188
4.1.3. Nachweis des Wechselstromes durch Glimmlicht 189
4.1.4. Vergleich einer unbekannten Wechselstromfrequenz mit der Frequenz der Netzspannung 192
4.1.5. Modell eines Frequenzmessers 194
4.1.6. Nachweis von Wechselspannungen und Messen von Frequenzen durch Staubfiguren 195

4.2. **Der Wechselstromwiderstand** 198

4.2.1. Der Ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis 198
4.2.2. Der Übergang zum induktiven Widerstand 199
4.2.3. Die Drosselspule im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis 200
4.2.4. Abhängigkeit des induktiven Widerstandes von der Induktivität und von der Frequenz 201

4.2.5. Bestimmen des induktiven Widerstandes und der Induktivität 205
4.2.6. Verhalten eines Kondensators im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis — Der kapazitive Widerstand 207
4.2.7. Abhängigkeit des kapazitiven Widerstandes von der Kapazität und von der Frequenz 208
4.2.8. Bestimmen des kapazitiven Widerstandes und der Kapazität 211
4.2.9. Das Zusammenschalten verschiedener Wechselstromwiderstände 212
4.2.10. Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen 216

4.3. Phasenverschiebungen im Wechselstromkreis 217

4.3.1. Nachweis der Phasenverschiebung an Wechselstromwiderständen mit Meßgeräten 217
4.3.2. Nachweis der Phasenverschiebung an großen Widerständen im Wechselstromkreis 220
4.3.3. Nachweis der Phasenverschiebung an kleinen Widerständen im Wechselstromkreis 221
4.3.4. Nachweis der Phasenverschiebung an Wechselstromwiderständen mit dem Katodenstrahloszillografen 222
4.3.5. Nachweis der Phasenlage der Spannungen und der Stromstärken in Resonanzkreisen 223
4.3.6. Untersuchung eines Parallelschwingkreises mit dem Katodenstrahloszillografen 225

4.4. Effektivgrößen der Spannung und der Stromstärke — Arbeit und Leistung im Wechselstromkreis 226

4.4.1. Verhalten eines Drehspulstrommessers im Wechselstromkreis 226
4.4.2. Vergleich zwischen dem Maximalwert und dem Effektivwert einer Wechselspannung 227
4.4.3. Messen der Effektivwerte von Stromstärke und Spannung 228
4.4.4. Leistungsberechnung aus Stromstärke und Spannung — Vergleich zwischen Gleichstrom und Wechselstrom 230
4.4.5. Scheinleistung eines Wechselstromes —Bestimmen von cos φ 232

5. Elektrische Leitungsvorgänge 236

5.0. Methodische Bemerkungen 236

5.1. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten 238

5.1.1. Elektrische Leitfähigkeit von Flüssigkeiten 238
5.1.2. Veranschaulichung der Ionenwanderung 239
5.1.3. Nachweis von Ionen bei Leitungsvorgängen in Flüssigkeiten 242
5.1.4. Nachweis des negativen Pols einer Spannungsquelle mit Hilfe von Polreagenzpapier 243
5.1.5. Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie und umgekehrt — Modell eines Akkumulators 244
5.1.6. Elektrolyse einer wäßrigen Bleiazetatlösung 245
5.1.7. Untersuchung des Stromdurchganges durch eine Kupfer (II)-sulfatlösung mit Hilfe einer Waage 246
5.1.8. Ableitung des 1. Faradayschen Gesetzes 249
5.1.9. Ermittlung der Faradayschen Konstanten 251
5.1.10. Bestimmung der Stoffmenge von Kupfer und Ermittlung der Faradayschen Konstanten 253

5.1.11. Ableitung des 2. Faradayschen Gesetzes 255
5.1.12. Bestätigung des 2. Faradayschen Gesetzes 258

5.2. Leitungsvorgänge in Gasen 259

5.2.1. Unselbständige Entladung durch Ladungsträger im elektrischen Feld 259
5.2.2. Selbständige Entladung bei normalem Luftdruck 261
5.2.3. Selbständige Leitung in Gasentladungsröhren bei niedrigem Druck 263
5.2.4. Nachweis des Edison-Effektes 264
5.2.5. Untersuchung der Katodenstrahlen 265
5.2.6. Wirkungsweise der Diode 269
5.2.7. Gleichrichterwirkung einer Röhrendiode 270
5.2.8. Kennlinie der Röhrendiode 271
5.2.9. Röhrendiode als Einweggleichrichter 273
5.2.10. Zweiweggleichrichtung durch eine Duodiode 275
5.2.11. Kennlinie einer Triode 277
5.2.12. Die Triode als Verstärkerröhre 279
5.2.13. Nachweis des Hallwachs-Effekts 281
5.2.14. Nachweis des Fotostroms in einer Fotozelle 282
5.2.15. Anwendung der Fotozelle in Sicherungs-, Alarm- und Zählanlagen 282
5.2.16. Modellversuch zum Tonfilm 284

5.3. Leitungsvorgänge in festen Körpern und ihren Grenzschichten 286

5.3.1. Eigenleitung in Halbleitern 286
5.3.2. Durchlaß- und Sperrichtung an Halbleiterdioden 287
5.3.3. Aufnahme der Kennlinie von Halbleitergleichrichtern 288
5.3.4. Gleichrichterwirkung an Ge- bzw. Si-Flächengleichrichtern 290
5.3.5. Black-box-Versuch zur Diode 291
5.3.6. Zweiweggleichrichtung mit zwei Dioden 292
5.3.7. Untersuchung der Stromkreise am Transistor 294
5.3.8. Spannungsverstärkung am Transistor in Basisschaltung 295
5.3.9. Stromverstärkung am Transistor in Emitterschaltung 297
5.3.10. Transistor in Emitterschaltung als Schalter 299
5.3.11. Nachweis des thermoelektrischen Effekts 301
5.3.12. Nachweis von Wärmestrahlung mit Hilfe einer Thermosäule 302
5.3.13. Thermoelektrischer Magnet 303
5.3.14. Stromstärke — Spannung — Kennlinie von Fotowiderständen 304
5.3.15. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotowiderstand 306
5.3.16. Stromstärke — Spannung — Kennlinie von Fotodioden 306
5.3.17. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einer Fotodiode 308
5.3.18. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotoelement 308
5.3.19. Spannung — Temperatur — Kennlinie von Thermopaaren 309

Register 311

Einleitung

1. Der 9. Teil der „Physikalischen Schulversuche" setzt die mit dem 6. Teil begonnene Behandlung der Elektrizitätslehre fort.
   Im 6. Teil sind Erläuterungen zu Unterrichtsmitteln und zur Experimentiertechnik in der Elektrizitätslehre und Versuche zu den Gebieten elektrischer Strom, elektrische Spannung, Arbeit, Energie und Leistung, zu den Gesetzen im elektrischen Stromkreis und Versuche zum elektrischen Feld enthalten, weil ein großer Teil von ihnen zur Einführung in die Elektrizitätslehre genutzt werden kann. Der 9. Teil enthält alle Versuche zum magnetischen Feld, zur Induktion, zu den elektrischen Maschinen, zum Wechselstromkreis und zu den Leitungsvorgängen. Die Versuche zu elektromagnetischen Schwingungen und Wellen sind im 10. Teil beschrieben.
2. Die bewährten methodischen und experimentellen Gesichtspunkte, nach denen das Gesamtwerk angelegt ist, wurden beibehalten. Um die unterrichtliche Einordnung der Versuche zu erleichtern, wurden vielen Versuchen „Methodische Hinweise" vorangestellt.
   Das Buch dient der Förderung der experimentellen Kenntnisse und Fähigkeiten. Dementsprechend setzt es die rein physikalischen Kenntnisse bei seinen Lesern voraus. In besonders gelagerten Fällen, wo es aus methodischen Gründen geboten erscheint, wird kurz auf die ursächlichen Zusammenhänge physikalischer Erscheinungen 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 vornehmen, 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. Ein Teil von ihnen wird auch von Lehrern in der Berufsausbildung und im polytechnischen Unterricht genutzt werden können.
3. Allgemeine Ausführungen über die Unterrichtsmittel zur Elektrizitätslehre sind im ersten Kapitel des 6. Teils zu finden. In den methodischen Bemerkungen zu jedem Kapitel dieses Buches werden am Anfang 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. In einer Reihe von Versuchen ergibt sich aber zwangsläufig eine Bindung an ein bestimmtes Gerät, z. B. an das Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern.

In diesen Fällen sind die Beschreibungen aber auch 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 ganze Versuchsgeräte aufgenommen. Dadurch ist es möglich, die Versuche mit industriell gefertigten Lehrmitteln durch Varianten zu ergänzen und eine Anregung für die Tätigkeit in Arbeitsgemeinschaften zu geben.

4. Im folgenden sind Einzelheiten der Gestaltung des Buches zusammengestellt, um den Leser über die Benutzung zu orientieren.
   - Das Buch ist in 5 Kapitel gegliedert, jedes Kapitel in Abschnitte, jeder Abschnitt in abgeschlossene Versuchsbeschreibungen.
   - Jedes Kapitel wird durch „Methodische Bemerkungen" eingeleitet. Diese sind nicht allgemeiner 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. 4.0.2. gehört zum Abschnitt 4.2.
   - Am Ende der „Methodischen Bemerkungen" stehen Selbstbauanleitungen, die für das ganze Kapitel oder ganze Abschnitte von Bedeutung sind.
   - Die Abschnitte sind durch die Kapitelnummer und eine eigene Ziffer zweistellig gekennzeichnet, z. B. 5.3. Für die einzelnen Versuchsbeschreibungen tritt eine Versuchsnummer an die dritte Stelle, z. B. 5.3.4. Diese Ziffern werden auch bei den zugehörigen Abbildungen verwendet, wobei hinter einem Schrägstrich die laufende Nummer der Abbildung angehängt wird, z. B. Abb. 5.3.4./2.
   - 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.
   - Die Abkürzung [SE] hinter der Versuchsüberschrift sagt aus, daß dieser Versuch auch als Schülerexperiment oder Praktikumsversuch geeignet ist. Versuche, bei denen sich Varianten oder Teilexperimente gut als Schülerexperimente eignen, sind durch einen Hinweis in den Bemerkungen gekennzeichnet. Meist sind dann an Stelle der Geräte für Demonstrationsexperimente die entsprechenden Teile aus den Sätzen für Schülerexperimente zu verwenden.
   - 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 sein 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 der Stückliste zur Verbesserung der Übersicht in die Abbildungen eingesetzt.
- Selbstbauteile sind durch Ⓢ kenntlich gemacht.
- Die Angaben der Daten der Bauelemente (750/1500 Wdg., 11 Ω, 4 µF 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. einsetzen.
- Abmessungen in Zeichnungen sind in Millimeter angegeben.
- Meßtabellen von Versuchsauswertungen sind bei der Versuchserprobung aufgenommen worden. Sie geben Richtwerte für die erzielbare Genauigkeit. Es ist wenig wahrscheinlich, 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" zu achten.
   Schüler dürfen nur mit Schülerstromversorgungsgeräten und den zulässigen Kleinspannungen arbeiten. Bandgeneratoren und Influenzmaschinen bilden durch Schreckreaktionen Gefahren, obwohl ihre Ladungen trotz hoher Spannungen nicht lebensgefährlich sind. Alle Versuchsbeschreibungen dieses Buches sind so angelegt, daß auch die Demonstrationsexperimente möglichst mit Kleinspannungen auszuführen sind. Spannungen in der Größenordnung der Netzspannung und größer soll man nur dort verwenden, wo es nicht anders geht, z. B. bei Versuchen mit Glimmlampen und Katodenstrahlen.

1. Das konstante magnetische Feld

1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.0. Die meisten Versuche zu diesem Stoffgebiet sind mit Teilen des *Aufbaugerätesatzes* oder mit Teilen des *Schülerexperimentiergerätes Elektrizitätslehre* auszuführen. Einige kleinere Hilfsmittel sind im Selbstbau leicht anzufertigen
Für die quantitativen Untersuchungen im Magnetfeld sind das *Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern* und das *Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes* besonders für die Abiturstufe geeignet.
Das Gerät *zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern* arbeitet nach dem Prinzip einer Torsionswaage mit Rückdrehung der Auslenkung und ist in zwei seiner Aufbauvarianten einzusetzen, einmal mit Rahmenspulen, die Versuche ermöglichen, wie sie früher mit dem Ampereschen Gestell ausgeführt wurden, zum anderen mit einer großen längenveränderlichen Spule und einer Meßspule am Torsionsdraht. Das *Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes* ermöglicht durch sein großes homogenes Magnetfeld mit Hilfe einiger selbst zu bauenden Zusatzteile gute Meßmöglichkeiten in diesem Feld. Für qualitative Untersuchungen sind die Geräte auch geeignet, aber nicht unbedingt notwendig. Eine große Anzahl der Demonstrationsversuche in diesem Kapitel wird durch eine Projektion erheblich eindrucksvoller. Am besten sind dazu lichtstarke Tageslichtschreibprojektoren geeignet.

1.0.1. Im Abschnitt 1.1. ist eine Reihe von Versuchen zu magnetischen Vorgängen in Stoffen, besonders in ferromagnetischen Stoffen zusammengestellt, obgleich diese Sachverhalte des permanenten Magnetismus im Unterricht meist nicht in einer eigenen Stoffeinheit, sondern in engem Zusammenhang mit den magnetischen Sachverhalten in stromdurchflossenen Leitern behandelt werden.
Im Schulunterricht ist es nicht möglich, die magnetischen Eigenschaften der Stoffe bis auf die magnetischen Momente der Elementarteilchen in den Atomstrukturen zurückzuführen. Es muß den Schülern aber klarwerden, daß die Ursachen für die magnetischen Eigenschaften der Stoffe in ihrer atomaren Struktur liegen und dort untrennbar von elektrischen Sachverhalten sind. In diesem Sinne werden in den Versuchen zunächst äußere, leicht beobachtbare magnetische Vorgänge beschrieben (V 1.1.1. bis V 1.1.15.).
Die folgenden Versuche sollen, soweit das in der Schule möglich ist, die äußeren Vorgänge aus der Struktur der Stoffe erklären. Dabei kann man bis zu den Weißschen Bezirken gehen, die zunächst modellmäßig mit V 1.1.16. bis V 1.1.18. dargestellt und mit V 1.1.19. akustisch nachgewiesen werden. Die abschließenden Versuche zeigen dann wieder durch äußere Vorgänge indirekt Vorgänge in der Struktur ferromagnetischer Stoffe. Es wird ausdrücklich davor gewarnt, die früher benutzten Vorstellungen von Kreisströmen im molekularen oder atomaren Bereich zur Erklärung der Weißschen Bezirke heranzuziehen, weil diese nicht den neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen entsprechen.

Die Weißschen Bezirke sind die kleinsten magnetischen Komplexe, die sich unter dem Mikroskop direkt beobachten lassen. Daß ihr Magnetismus auf elektromagnetischen Sachverhalten beruht, ist in der Schule nur durch die Tatsache zu belegen, daß bewegte Ladungen magnetische Eigenschaften haben, wie es alle Versuche der folgenden Abschnitte zeigen.

1.0.2. Die Versuche im Abschnitt 1.2. führen vom einfachen stromdurchflossenen Leiter über die Leiterschleife bis zur Spule. Dabei wird jedesmal von dem äußeren qualitativen Nachweis der wirkenden Kräfte ausgegangen und dann das Feldlinienmodell gezeigt, um die Wechselwirkung zwischen den magnetischen Feldern deutlich werden zu lassen. Diese Systematik entspricht ganz dem methodischen Vorgehen, wie es für den Unterrichtsablauf zweckmäßig ist.
Bei einer Wiederholung oder vielleicht auch bei der Einführung des Feldes der Spule kann man aber durchaus vom Feldlinienbild ausgehen und daraus die Kraftwirkungen herleiten.

1.0.3. Der Abschnitt 1.3. führt die mit den Versuchen aus dem Abschnitt 1.2. gewonnenen physikalischen Erkenntnisse in Richtung auf ihre technische Anwendung weiter. Im Unterricht sollte man sich auf einige ausgewählte Versuche beschränken, aber dabei auf keinen Fall die Modelle des Relais, des Wagnerschen Hammers und der Meßgeräte auslassen, weil die Kenntnisse hierüber zum polytechnischen Grundwissen gehören.

1.0.4. Die Versuche im Abschnitt 1.4. sind im wesentlichen für die quantitative Untersuchung des Magnetfeldes in höheren Klassenstufen bestimmt, und zwar werden die magnetische Feldstärke, die magnetische Induktion, die Lorentzkraft und die Permeabilität experimentell bestimmt. Die Versuche zur magnetischen Feldstärke und zur magnetischen Induktion könnten prinzipiell gleichermaßen für beide Größen ausgewertet werden, weil gilt: $B \sim H$.
Um die Analogiebetrachtungen zum elektrischen Feld und zum Gravitationsfeld leichter zu gestalten, sind die Versuche zur magnetischen Feldstärke mit Probemagneten und zur magnetischen Induktion mit bewegten Ladungen ausgeführt. Allgemein ist die Feldstärke eines Feldes festgelegt als Quotient aus der Feldkraft und einer Probequelle des Feldes, im Gravitationsfeld $E_g = \frac{F}{m_{Pr}}$, im elektrischen Feld $E = \frac{F}{Q_{Pr}}$, dementsprechend im Magnetfeld $H = \frac{F}{\Phi_{Pr}}$. Dazu muß die Kraftwirkung auf einen Probemagneten mit dem Magnetfluß Φ_{Pr} gemessen werden. Im Magnetfeld ist aber auch eine andere Analogie möglich, indem man als Quelle die bewegte Ladung betrachtet. Das führt zu: $B = \frac{F}{Q \cdot v} = \frac{F}{I \cdot l}$, also dem Quotienten aus Lorentzkraft und der bewegten Ladung, auf die sie einwirkt. Obwohl man mit beiden Größen die effektive Stärke eines Magnetfeldes für jeden Punkt des Feldes beschreiben könnte, ist es üblich geworden, zu diesem Zweck die magnetische Induktion B und die Feldstärke H zur Beschreibung der Erzeugung des Magnetfeldes in folgendem Sinn zu benutzen:
$H = \frac{I \cdot N}{l}$ faßt die feldbestimmenden Größen einer Spule zusammen, unter Heranziehung der absoluten und relativen Permeabilität ergibt sich in einem Stoff ein Magnetfeld, dessen effektive Stärke durch die magnetische Induktion $B = \mu_0 \cdot H$

erfaßt wird. Durch Multiplikation mit der Fläche A wird das in einem Stoff über dieser Fläche wirksame Magnetfeld in seiner Gesamtheit durch den Magnetfluß $\Phi = B \cdot A$ beschrieben. Während man die absolute Permeabilität deduktiv herleiten kann (V 1.4.7.), erhält man mit schulischen Mitteln für die relative Permeabilität nur sehr ungenaue Werte (V 1.4.9. und V 1.4.10.).
Die hier ausgeführte Betrachtung der magnetischen Feldgrößen bereitet einige methodische Schwierigkeiten in der Analogie zu den elektrischen Feldgrößen. Die elektrische Feldstärke $E = \frac{F}{Q}$ kann im homogenen Feld zwischen zwei Platten durch die feldbestimmenden Größen ausgedrückt werden, $E = \frac{U}{l}$. Die zweite feldbeschreibende Größe im elektrischen Feld ist die elektrische Verschiebung oder Ladungsdichte $D = \varepsilon_0 \varepsilon^* \cdot E$. Diese ergibt mit der Fläche A multipliziert die felderzeugende Ladung $Q = D \cdot A$, mit der die Gesamtheit des Feldes erfaßt werden kann. Danach ist die folgende Analogie zu bilden:

elektrisches Feld	magnetisches Feld
$E = \frac{F}{Q_{Pr}} = \frac{U}{l}$	$H = \frac{F}{\varphi_{Pr}} = \frac{I \cdot N}{l}$
$D = \varepsilon_0 \varepsilon^* \cdot \frac{U}{l} = \frac{Q}{A}$	$B = \mu_0 \mu^* \cdot \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Phi}{A}$
$Q = \varepsilon_0 \varepsilon^* \cdot \frac{U \cdot A}{l} = I \cdot \Delta t$	$\Phi = \mu_0 \mu^* \cdot \frac{I \cdot N \cdot A}{l} = U \cdot \Delta t$

Dieser Analogie steht gegenüber, daß es auf Grund der Erzeugung des Magnetfeldes durch bewegte Ladungen sinnvoll ist, die magnetische Induktion $B = \frac{F}{Q \cdot v}$ der elektrischen Feldstärke $E = \frac{F}{Q_{Pr}}$ als entsprechend zu betrachten.
Durch diese Betrachtung wird die Relativität der beiden Felder deutlicher, und, um die Analogiebetrachtungen für die Schüler nicht zu komplizieren, wird im Unterricht die magnetische Feldstärke nur kurz gestreift und die elektrische Verschiebung fortgelassen.

1.1. Permanente Magnete

1.1.1. Nachweis der magnetischen Wirkung von Magneteisenstein

1. Magneteisenstein 2. kleine Eisennägel

Methodischer Hinweis

Durch die Demonstration von Magneteisenstein kann man den Schülern die Entdeckung magnetischer Kräfte im Altertum näher bringen.

Versuch

Ein Stück Magneteisenstein wird mit kleinen Nägeln überschüttet und hochgehoben. Ein Teil der Nägel bleibt an dem Erzstück haften. Besonders groß ist die

Anzahl der Nägel in der Nähe der Pole, die sich an dem Erzstück annähernd gegenüber liegen.

Bemerkung

Eisenfeilspäne lassen sich von Magneteisenstein nur schwer entfernen.

1.1.2. Kraftwirkung eines Magneten auf Stoffe [SE]

1. Stabmagnet
2. kleine Körper aus Eisen (z. B. Nägel, Schrauben, Eisenblech, Eisendraht, Stahlkugel)
3. kleine Körper aus anderen Stoffen (z. B. Glas, Papier, Plast, Holz, Leder, Kupfer, Messing, Blei, Aluminium)

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt das besondere Verhalten der ferromagnetischen Stoffe. Er soll den Schülern bewußtmachen, daß die Kraftwirkungen im Magnetfeld anderer Art sind als im elektrischen Feld.

Versuch

Der Magnet wird den Körpern aus verschiedenen Stoffen genähert. Nur die Körper aus Eisen werden angezogen.

1.1.3. Dia- und paramagnetische Stoffe im Magnetfeld

Zu Variante a

1. Manipermstab
2. eisenfreies Stativ
3. Angelsehne
4. Doppelhaken aus Draht Ⓢ
5. kleiner Spiegel
6. Physikleuchte
7. Transparentskale Ⓢ
8. Körper aus diamagnetischen Stoffen (Blei, Schwefel, Wismut, Wasser)
9. Körper aus paramagnetischen Stoffen (Aluminium, Magnesium, Chrom)
10. Aluminiumblech (100 mm × 100 mm, 1 mm dick)

Zu Variante b

11. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V —)
12. U-Kern, geblättert
13. 2 Spulen (1500 Wdg.)
14. Strommesser (10 A)
15. angeschliffene Magnetpole
16. U-Rohr aus Glasröhren (⌀ 2 mm und 3 mm), gebogen

17. Glühlampe im Lampengehäuse (6 V; 30 W)
18. Linse ($f = 120$ mm)
19. Kerze
20. $FeCl_3$-Lösung, konzentriert
21. Kondensator (4 µF bis 8 µF)
22. Schalter

Methodischer Hinweis

Während man sich im Anfangsunterricht damit begnügt, die großen Kraftwirkungen auf ferromagnetische Stoffe zu zeigen, ist den Schülern höherer Klassen bewußt zu machen, daß das Magnetfeld auf Körper aus allen Stoffen Wirkungen ausübt. Die Variante b ist als Schülerexperiment im fakulativen Physikunterricht vorgesehen.

Variante a

Versuchsaufbau

Der Stabmagnet aus Maniperm wird an einer Angelsehne waagerecht an ein eisenfreies Stativ gehängt (Abb. 1.1.3./1). Er stellt sich etwa in Nord-Süd-Richtung ein.

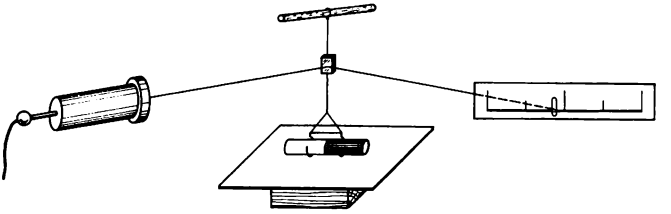


Abb. 1.1.3./1 Versuchsaufbau zum Nachweis des Para- und Diamagnetismus

An die Angelsehne heftet man mit etwas Knetmasse einen kleinen Spiegelglasstreifen. Spiegel, Leuchte und Transparentskale werden so eingerichtet, daß der Lichtpunkt in der Mitte der Skale liegt und die Schüler die Skale von ihrem Platz aus sehen können. Der Vorführende muß alle Körper aus Eisen ablegen, die er bei sich trägt, Schlüssel, Uhr usw., weil durch ihre Bewegung die Anordnung beeinflußt werden kann. Zur Wirbelstromdämpfung der Torsions-Schwingungen legt man dicht unter den Manipermstab ein Aluminiumblech.

Versuch

Von der Seite führt man die verschiedenen Körper dicht an den einen Pol des Stabmagneten heran. Es treten sehr kleine, aber noch deutlich erkennbare Ausschläge des Lichtzeigers auf. Anziehung beobachtet man bei paramagnetischen und Abstoßung bei diamagnetischen Stoffen.

Bemerkung

Metalle und Legierungen enthalten oft Spuren von Eisen, so daß durch ferromagnetische Wirkung eine erhebliche Anziehung auftritt. Das ist bei Messing besonders ausgeprägt.

Variante b

Versuch 1: Nachweis paramagnetischer Eigenschaften

Auf einen geblätterten Eisenkern werden die beiden Spulen gesteckt. Diese werden an 2 in Reihegeschaltete Stromversorgungsgeräte angeschlossen, so daß durch jede Spule etwa ein Strom der Stärke 2,2 A fließt. Zur Kontrolle wird in den Stromkreis der Strommesser geschaltet. Auf die Schenkel des U-Kerns werden die angeschliffenen Magnetpole gesetzt. Zwischen diesen Polen wird das U-Rohr befestigt, in das vorher konzentrierte $FeCl_3$-Lösung gefüllt wurde. Die Oberkante des Flüssigkeitsspiegels in dem Röhrchen soll gerade an der unteren Kante der Polschuhe liegen. Der Flüssigkeitsspiegel wird mit der Sammellinse auf eine 2 m bis 3 m entfernte Wand projiziert. Parallel zum Kippschalter wird ein Kondensator von 4 µF bis 8 µF zur Funkenunterdrückung gelegt.
Beim Einschalten wird die Flüssigkeit in das magnetische Feld hineingezogen.

Versuch 2: Nachweis diamagnetischer Eigenschaften

Es wird wieder ein starkes Magnetfeld wie beim Versuch 1 erzeugt. Zwischen die Spulen wird eine Kerze gestellt, deren Flamme zwischen den Polschuhen brennt. Diese Flamme wird mit der Sammellinse auf eine etwa 2 m bis 3 m entfernte Wand abgebildet. Um ein inhomogenes Magnetfeld zu erhalten, werden die Polschuhe gegeneinander verdreht.
Beim Einschalten des Stromes wird die Kerzenflamme aus dem inhomogenen Magnetfeld herausgedrückt.

1.1.4. Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Eisenstück [SE]

1. Magnet (Stahl oder Maniperm in Hufeisen- oder Stabform)
2. Eisenstück etwa gleicher Größe
3. kleine Plast- oder Glasschale
4. größere Plast- oder Glasschale

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch kann im Unterricht in verschiedener Weise eingesetzt und ausgewertet werden. Er zeigt einmal einfach die Kraftwirkung zwischen Magnet und Eisen, zum anderen die Wechselseitigkeit der Kraftwirkung und weiter die Kraftübertragung in Feldern, wie sie analog auch im elektrischen und im Schwerefeld auftritt.

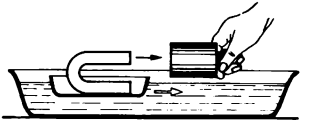


Abb. 1.1.4./1
Kraftwirkung zwischen einem Magneten und einem Eisenstück

Versuch

Man läßt den Magneten oder das Eisenstück in der kleinen Schale auf dem Wasser in der großen Schale schwimmen. Bei Annäherung des Eisenstücks bzw. des Magneten an den schwimmenden Körper wird dieser angezogen (Abb. 1.1.4./1).

Bemerkung

Der Versuch läßt sich dahin abändern, daß man einen Stativstab auf einem Stativfuß waagerecht einspannt. Den Stabmagneten setzt man auf einen Wagen in gleicher Höhe.

1.1.5. Kraftverteilung an Magneten [SE]

1. Hufeisenmagnet
2. Stabmagnet
3. Eisenfeilspäne
4. Eisennägel verschiedener Größe

Methodischer Hinweis

Die Versuche können zur Erarbeitung der Begriffe Magnetpol und indifferente Zonen dienen. Sie können zur Problemstellung genutzt werden, die Kräfte im Feld der Magneten genauer zu untersuchen.

Variante a

Ein Stabmagnet und ein Hufeisenmagnet werden in Eisenfeilspäne getaucht und hochgehoben. An der Verteilung der Späne erkennt man deutlich die Lage der Pole und der indifferenten Zone.
Anstelle der Eisenfeilspäne kann man auch kleine Eisennägel verwenden. Man kann sie besser vom Magneten abstreifen als Eisenfeilspäne. Das Abstreichen der Eisenfeilspäne erfolgt in der Art, daß man sie nach der indifferenten Zone hin schiebt und sie dann dort abschüttelt oder mit einem Pinsel entfernt.

Variante b

Ein Stabmagnet wird in horizontaler Lage an einem Stativ befestigt. Man nähert ihm von unten her große Nägel, so daß sie ihn mit den Spitzen berühren. Sie bleiben nur in der Nähe der Pole hängen. An den noch frei gebliebenen Stellen versucht man es mit kleineren Nägeln. Aus der Größe der hängenden Nägel kann man auf die der magnetischen Kraft schließen (Abb. 1.1.5./1).

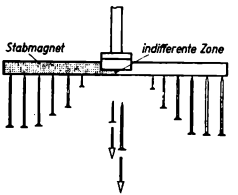


Abb. 1.1.5./1
An einem Stabmagnet hängende Nägel.
Zur Vereinfachung
sind die Nägel nicht gespreizt gezeichnet.

1.1.6. Vergleich der Pole eines Magneten

1. Magnetisiertes Stahlband
   (etwa 300 mm langes Stück Uhrfeder
   oder Meßband aus Stahl)
2. Eisennägel
3. 2 gleichartige Stabmagneten

Methodischer Hinweis

Während mit V 1.1.5. das Vorhandensein der Magnetpole gezeigt wird, soll dieser Versuch Aufschluß über die entgegengesetzt gerichtete Kraftwirkung der Magnetpole geben.

Variante a

Das magnetisierte Stahlband wird etwas außerhalb seiner Mitte horizontal an ein Stativ geklemmt und an einem Pol mit einem Nagel belastet. Danach wird es gebogen, bis sich beide Pole berühren (Abb. 1.1.6./1). Der Nagel fällt ab. Die Wirkungen der Magnetpole heben sich demnach gegenseitig auf.

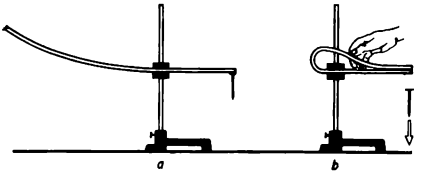


Abb. 1.1.6./1
Nagel an einem Stahlband. Der Nagel fällt ab, wenn sich beide Pole berühren.

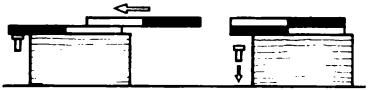


Abb. 1.1.6./2
Überdecken eines Magnetpols durch den ungleichnamigen P eines anderen Magneten

Variante b

Man kann den Vergleich auch durchführen, indem man zwei gleichartige und gleich starke Stabmagnete benutzt. Man legt den einen Magneten auf einen hohen Unterlegklotz, so daß der eine Pol übersteht, an den ein großer Nagel gehängt wird. Schiebt man den zweiten Magneten der Länge nach behutsam über den ersten, so fällt der Nagel ab, sobald sich ungleichnamige Pole decken (Abb. 1.1.6./2). Dasselbe erreicht man, wenn man den zweiten Magneten mit gleichnamigen Polen auf den ersten legt und ihn dann um eine durch seine Mitte gehende vertikale Achse um 180° dreht, bis ungleichnamige Pole übereinanderliegen. Der Nagel fällt wieder ab.

1.1.7. Bestimmen der Polarten eines Stabmagneten [SE]

1. Stabmagnet
2. Doppelhaken aus Draht ®
3. Kompaßnadel

Methodische Hinweise

1. Die Versuche dienen zur Einführung der Begriffe Nordpol und Südpol.
2. Sie ermöglichen die Überprüfung der Polarität von Magneten.

Variante a

An einem eisenfreien Stativ wird ein Stabmagnet an einem dünnen Faden mittels eines Doppelhakens aus Draht aufgehängt (Abb. 1.1.7./1). Hierbei ist zu beachten, daß sich in der näheren Umgebung keine Magnete oder Eisenteile befinden dürfen. Nach einigen Schwingungen kommt der Magnet in der Nord-Süd-Richtung zur Ruhe. Der nach Norden weisende Pol wird als Nordpol bezeichnet, der andere heißt Südpol.

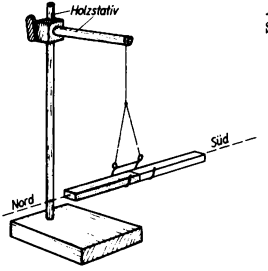


Abb. 1.1.7./1
Stabmagnet, an einem Stativ hängend

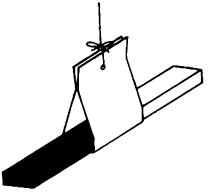


Abb. 1.1.7./2
Behelfsmäßige Aufhängung eines Magnetstabes

Bemerkungen

1. Zum Aufhängen des Magneten kann man statt des Doppelhakens auch ein Papierblatt benutzen, das man zu diesem Zwecke um den Magnetstab legt (Abb. 1.1.7./2).
2. Anstelle eines eisenfreien Stativs ist ein hölzerner Kartenständer geeignet.

Variante b

Zum Bestimmen der Nord-Süd-Richtung wird eine auf einem Magnetnadelfuß schwingende Magnetnadel auf den Tisch gestellt. Sie kommt nach einigen Schwingungen zur Ruhe. Die Richtung, in der sie einspielt, wird auf der Tischplatte durch einen Kreidestrich gekennzeichnet. Sie liegt mit großer Annäherung in Nord-Süd-Richtung. So oft man auch die Nadel aus dieser Ruhelage bringt, immer stellt sie sich wieder in die Nord-Süd-Richtung ein.
Nähert man der einen Spitze der Kompaßnadel einen Pol eines Magneten, so kann man aus der Bewegung der Kompaßnadel auf die Polarität des angenäherten Magneten schließen (vgl. V 1.1.9.).

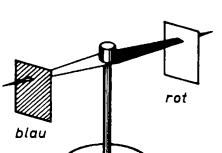


Abb. 1.1.7./3 Farbige Papierfähnchen an den Enden einer Magnetnadel

Bemerkung

Damit die Schüler die Bewegung der Magnetnadel von ihren Plätzen aus gut beobachten können, hält man über die Versuchsanordnung einen um etwa 45° geneigten Spiegel so, daß die Schüler die Magnetnadel und den Kreidestrich im Spiegelbild sehen. Außerdem empfiehlt es sich, den Nordpol der Nadel durch ein rotes und den Südpol durch ein blaues Papierfähnchen kenntlich zu machen (Abb. 1.1.7./3).

1.1.8. Untersuchung des Erdfeldes am Beobachtungsort

1. Fadenlot (kein Eisenkörper)
2. Kompaßnadel
3. Zeichenkarton
4. Inklinationsnadel

Methodischer Hinweis

Diese Versuche sollen gegenüber V 1.1.7. den Schülern mit größerer Präzision die Richtung der Kraftwirkungen des Magnetfeldes der Erde zeigen.

Versuch 1: Bestimmung der Deklination

Man heftet mit einigen Reißzwecken ein Blatt Zeichenkarton auf einen von der Sonne beschienenen Tisch und läßt darauf den Schatten eines über dem Tisch hängenden Lotes fallen. Genau um 12 Uhr markiert man den Schatten des Fadens durch einen Bleistiftstrich und stellt eine Magnetnadel so auf den Strich, daß dieser durch die Mitte des Fußes verläuft. Man stellt fest, daß die Magnetnadel angenähert in die Richtung der durch den Strich angegebenen geographischen Nord-Süd-Richtung zeigt.

Bemerkungen

1. Der beschriebene Versuch ermöglicht nur einen groben Vergleich, da bei ihm die Abweichung der Ortszeit von der mitteleuropäischen Zeit (MEZ) und die Zeitgleichung nicht berücksichtigt wurden.
2. Man kann den Versuch dadurch verfeinern, daß man zuvor die Uhrzeit t_{me} (Mitteleuropäische Zeit) berechnet, die der wahren Mittagszeit (12^h) des Beobachtungsortes entspricht. Zwischen dem Ortslängenkreis und dem 15. Längenkreis besteht ein Zeitunterschied Δt; eine Tafel für die Kulminationszeiten der Sonne liefert die für den Beobachtungstag geltende Zeitgleichung z. Die für die Sonnenkulmination zutreffende Uhrzeit ergibt sich nach der Gleichung $t_{me} = 12^h + \Delta t + z$.

Genau zur Zeit t_{me} wird dann der Schatten des Fadens durch einen Bleistiftstrich nachgezeichnet. Mit Hilfe eines Marschkompasses, dessen Meßkante man an den Strich legt, läßt sich dann die Deklination bestimmen.

Versuch 2: Bestimmung der Inklination

Mit einem Kompaß wird die Nord-Süd-Richtung bestimmt und auf dem Experimentiertisch gekennzeichnet. Nach dem Entfernen des Kompasses wird eine Inklinationsnadel so aufgestellt, daß sie in der Meridianebene beweglich ist. An der Winkelteilung wird die Inklination abgelesen.

Bemerkung

Beim Aufstellen der Magnetnadel ist darauf zu achten, daß sich im Umkreis von etwa 2 m keine Eisenteile befinden.

1.1.9. Kraftwirkung zwischen Magnetpolen

Zu Variante a

1. 2 Stabmagnete
2. Doppelhaken aus Draht ®

Zu Variante b

3. Kompaßnadel
4. Stab- oder Hufeisenmagnet

Zu Variante c

5. 2 zylindrische Stabmagnete

Zu Variante d

6. Glastrog
7. 2 magnetisierte Stricknadeln
8. 2 Korken

Zu Variante e

9. 3 magnetisierte Rasierklingen
10. 2 Holzklötzchen

Zu Variante f

11. 2 magnetisierte Rasierklingen oder 2 Manipermringe
12. 2 Glasstäbe
13. Holzklotz

Methodischer Hinweis

In verschiedenen Varianten werden Möglichkeiten gezeigt, die Schüler mit der Wechselwirkung zwischen zwei gleich- oder verschiedenartigen Magnetpolen vertraut zu machen.

Variante a

Ein Stabmagnet wird wie in V 1.1.7. (Abb. 1.1.7./1 oder 2) aufgehängt. Nachdem er sich in die Nord-Süd-Richtung eingestellt hat, nähert man seinem nach Norden weisenden Ende nacheinander den Nordpol und den Südpol eines zweiten Stabmagneten. Auf gleiche Weise wird mit dem nach Süden weisenden Ende des

hängenden Magnetstabes verfahren. Man erkennt, daß gleichnamige Pole einander abstoßen, ungleichnamige einander anziehen.

Variante b

Man bezeichnet nach Abbildung 1.1.7./3 die Art der Pole an einer Magnetnadel. Dann nähert man ihrem Nordpol nacheinander den Nordpol und den Südpol des Magneten. In gleicher Weise verfährt man mit dem Südpol der Magnetnadel. Man erkennt wieder, daß gleichnamige Pole einander abstoßen und ungleichnamige einander anziehen.

Variante c

Zwei gleiche zylindrische Magnetstäbe werden dicht nebeneinander auf eine glatte Tischfläche gelegt, so daß gleichnamige Pole nebeneinanderliegen. Die Magnetstäbe rollen auseinander. Die beiden Stäbe werden in einem Abstand von einigen Zentimetern parallel so nebeneinandergelegt, daß neben einem Nordpol ein Südpol liegt. Die Magnetstäbe rollen zusammen. Der Versuch kann auch mit zwei magnetisierten Stricknadeln ausgeführt werden, ist aber dann nicht so wirkungsvoll wie mit zylindrischen Magnetstäben.

Variante d

Auf zwei 15 cm lange Stücke magnetisierter Stricknadeln werden Korken gesteckt, so daß sie, in einen mit Wasser gefüllten Glastrog gesetzt, lotrecht schwimmen und etwa 2 cm aus dem Wasser ragen. Richtet man es so ein, daß gleichnamige Pole nebeneinanderliegen, beispielsweise beide Nordpole über dem Wasser und beide Südpole im Wasser, so stoßen die Stricknadeln einander ab und schwimmen auseinander (Abb. 1.1.9./1). Verschiebt man den Korken der einen Nadel und setzt sie so ins Wasser, daß jetzt ihr Südpol herausragt, dann beobachtet man eine Anziehung der ungleichnamigen Pole.

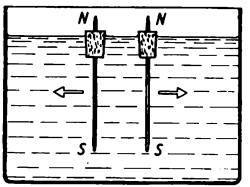


Abb. 1.1.9./1
Kraftwirkung
zwischen schwimmenden Magnetstäben:
Gleichnamige Pole stoßen einander ab

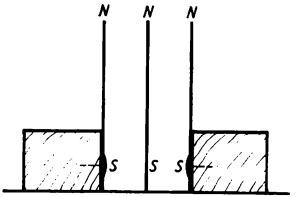


Abb. 1.1.9./2
Eine zwischen
zwei Klingen von gleicher Pollage frei
stehende magnetisierte Rasierklinge

Variante e

Zwei magnetisierte Rasierklingen werden mit Reißzwecken so an je einem Holzklötzchen oder einer Streichholzschachtel befestigt, daß gleichnamige Pole in gleicher Höhe liegen. Die beiden Rasierklingen werden mit einem Abstand von etwa 2 cm bis 3 cm parallel zueinander aufgestellt. In den zwischen ihnen befindlichen Zwischenraum wird eine dritte magnetisierte Klinge mit gleicher Lage der Pole

gebracht. Die mittlere Rasierklinge steht frei zwischen den beiden anderen, weil sich die gleichnamigen Pole abstoßen (Abb. 1.1.9./2).

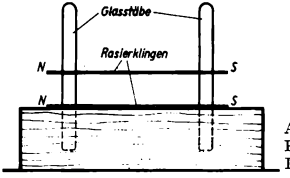


Abb. 1.1.9./3 Zwei mit gleichen Polen aufeinandergelegte magnetisierte Rasierklingen. Die obere schwebt über der unteren.

Variante f

In einen Holzklotz werden im Abstand der Löcher einer Rasierklinge zwei Löcher mit einem Durchmesser von etwa 4 mm senkrecht zur Grundfläche gebohrt und zwei Glas- oder Plaststäbe hineingesteckt, so daß Rasierklingen leicht daran gleiten können. Steckt man zwei magnetisierte Rasierklingen so auf die Stäbchen, daß gleichnamige Pole übereinanderliegen, dann schwebt die obere Klinge in einem Abstand von einigen Millimetern über der unteren (Abb. 1.1.9./3).
Noch eindrucksvoller läßt sich der Versuch mit zwei Maniperm-Ringmagneten durchführen, bei denen die Pole in den Endflächen liegen. Legt man die Magnete mit gleichnamigen Polen aufeinander und benutzt zur Führung eine Glasröhre oder eine Flasche mit etwas kleinerem Durchmesser als der Innendurchmesser der Ringmagnete, so schweben diese in einem Abstand von etwa 15 mm übereinander.

Bemerkungen

1. Die Varianten a, b und c können auf der Schreibfläche eines Tageslichtschreibprojektors ausgeführt und projiziert werden.
2. Die Varianten d, e und f können zweckmäßig mit Schattenwurf abgebildet werden.
3. Die Varianten b und c sind gut als Schülerexperimente geeignet.

1.1.10. Durchlässigkeit von Stoffen für magnetische Kraftwirkungen[SE]

1. Hufeisenmagnet
2. kleine Eisennägel
3. Papierblatt, Pappe, Plast-, Holz- und Glasplatte, Bleche aus Eisen, Zink, Aluminium, Messing, Kupfer, Nickel

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.1.2. und V 1.1.3.!

Versuch

Man nähert einen Magneten von oben her einem Häufchen kleiner Eisennägel und hält den zu untersuchenden Stoff, z.B. ein Blatt Papier, zwischen die Nägel und den Magneten. Die magnetische Kraft wirkt durch das Papier hindurch. Die Nägel bleiben beim Hochheben des Magneten unter dem Papierblatt haften. Auf diese Weise untersucht man auch ein Stück Pappe und die anderen Platten und Bleche.

Während die Kraftwirkung durch die meisten Stoffe nicht beeinträchtigt wird, wirkt das Eisenblech stark, das Nickelblech schwächer abschirmend; die Nägel bleiben nicht haften, weil der Magnetfluß durch das Eisen- oder Nickelblech verläuft und nur ein Streufeld auf die Nägel einwirken kann.

1.1.11. Veranschaulichung magnetischer Feldlinien durch Eisenfeilspäne [SE]

1. 2 Stabmagnete
2. Hufeisenmagnet
3. Weicheisenstück
4. Weicheisenring
5. Streubüchse mit Eisenfeilspänen
6. Glasplatte
7. weißer Papierbogen
8. Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Die Feldlinien zeigen im Modell das magnetische Feld in der Nähe des Magneten. Im Unterricht ist an solche Versuche anzuknüpfen, bei denen eine Kraftwirkung über einen größeren Abstand hinweg zu erkennen ist, z. B. V 1.1.9.
2. Obwohl es einfach ist, die Feldlinienbilder zu projizieren, sollte jeder Schüler im Schülerexperiment das Entstehen von Feldlinienbildern selbst erleben.
3. Auf den Modellcharakter der Feldlinienbilder ist hinzuweisen. Das Feld besteht in jedem Punkt des Raumes. Die Ketten von Eisenfeilspänen aber entstehen nur entlang bestimmter Linien, so wie die Späne zufällig auf die Platte fallen und sich unter dem Einfluß des Feldes aneinanderhängen.

Versuch

Es empfiehlt sich, die Feldlinienbilder durch Eisenfeilspäne auf einer Glasplatte zu erzeugen, so daß der zu untersuchende Magnet selbst sichtbar bleibt. Damit sich die Feldlinien deutlich vom Untergrund abheben, legt man unter den Magneten einen weißen Papierbogen. Man kann auch auf den Magneten einfach eine weiße Kartonscheibe legen und auf diese Eisenfeilspäne streuen. Die Konturen des Magneten heben sich ebenfalls scharf von der Umgebung ab.
Man streut Eisenfeilspäne mit einer Streubüchse auf die Glasplatte und klopft leicht gegen diese. Die Späne ordnen sich in den Richtungen der magnetischen Kräfte. Auf diese Weise kann man die Bilder der verschiedensten Magnetfelder erzeugen. Insbesondere kommen in Frage:

— das Feld eines Stabmagneten,
— das Feld eines Hufeisenmagneten,
— das Feld zwischen zwei in einer Geraden angeordneten Stabmagneten, bei denen ungleichnamige Pole einander gegenüberliegen,
— das Feld zwischen zwei in einer Geraden angeordneten Stabmagneten, bei denen gleichnamige Pole einander gegenüberliegen,
— das Feld eines Hufeisenmagneten, zwischen dessen Polen sich ein Weicheisenstück befindet (die Feldlinien verlaufen im Weicheisenstück; sie werden von ihm gesammelt und werden nach außen nicht wirksam),
— das Feld eines Hufeisenmagneten, zwischen dessen Polen sich ein Weicheisenring befindet. (Der Raum im Innern des Ringes bleibt feldfrei.)

Zur Projektion werden die Versuche auf der Schreibfläche eines Tageslichtschreibprojektors ausgeführt.

1.1.12. Herstellen dauerhafter Feldlinienbilder mit Hilfe von paraffiniertem Papier oder mit Hilfe von Fotopapier

1. bis 5. wie bei V 1.1.11., außerdem

Zu Variante a

6. paraffiniertes Papier
7. Heizsonne oder Infrarotstrahler

Zu Variante b

8. Fotopapier
9. Dunkelkammereinrichtung

Methodische Hinweise

1. Die Anfertigung dauerhafter Feldlinienbilder ist besonders vorteilhaft für den Einsatz bei Wiederholungen, Zusammenfassungen und Vergleich von Feldern.
2. Die Herstellung wird als Arbeitsgemeinschaftstätigkeit empfohlen.

Variante a

Weißes Papier wird paraffiniert, indem man es kurzzeitig in geschmolzenes Paraffin taucht und es danach erkalten läßt. Wie im V 1.1.11. werden Feldlinienbilder mit Hilfe von Eisenfeilspänen auf diesem Papier erzeugt. Um die Späne in ihrer Lage zu fixieren, erhitzt man die Paraffinschicht von oben mit einem Wärmestrahler (Heizsonne oder Infrarotstrahler), bis sie zu schmelzen beginnt. Nun dringen die Eisenfeilspäne in das Paraffin ein und sitzen nach dem Erkalten darin fest. Erst jetzt wird der Magnet entfernt.

Variante b

Im verdunkelten Raum werden bei rotem oder orangefarbenem Licht Feldlinienbilder auf einem großen Blatt Fotopapier erzeugt, das man auf einen Magneten gelegt hat. Nach dem Bestreuen mit Eisenfeilspänen wird die Deckenbeleuchtung für einige Sekunden eingeschaltet. Die Belichtungszeit richtet sich nach der Beleuchtungsstärke und dem verwendeten Fotopapier. Sie wird durch einige Belichtungsproben ermittelt. Danach nimmt man bei Dunkelkammerlicht das Fotopapier vom Magneten und schüttelt die Eisenfeilspäne ab; das Papier wird in der üblichen Weise entwickelt, fixiert und gewässert. Die Feldlinien erscheinen hell auf dunklem Grund. Als Fotopapier eignet sich besonders hartes oder extrahartes Vergrößerungspapier.

Bemerkung

Projektionsfähige Feldlinienbilder kann man in gleicher Weise auf fototechnischem Planfilm herstellen.

1.1.13. Nachweis der magnetischen Influenz [SE]

1. Stabmagnet
2. Hufeisenmagnet
3. Nägel

Methodischer Hinweis

Der Versuch knüpft an V 1.1.10. an und soll einführend zeigen, daß unmagnetisches Eisen unter Einfluß eines Magnetfeldes magnetisch wird.

Variante a

Man klemmt einen Stabmagneten in seiner Mitte in waagerechter Lage an einem Stativ fest und nähert dem einen Pol einen Nagel. Der Nagel wird angezogen. Nähert man dem am Magneten hängenden Nagel einen zweiten Nagel, so bleibt er am ersten haften. Dies geschieht unter Umständen auch noch einmal, wenn man dem zweiten Nagel einen dritten nähert (Abb. 1.1.13./1). Die Nägel sind durch magnetische Influenz selbst magnetisch geworden. Nimmt man den ersten Nagel vorsichtig vom Magneten ab, so fallen auch die anderen Nägel herab.
Verwendet man einen Hufeisenmagneten, so können die Nägel einen geschlossenen Bogen bilden, der von einem Pol zum andern reicht.

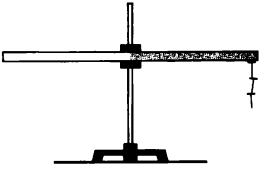


Abb. 1.1.13./1
Nägel in einer Reihe an einem Pol eines Stabmagneten

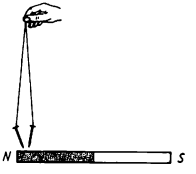


Abb. 1.1.13./2
Zwei Nägel, die an zwei Fäden über einem Magnetpol hängen

Variante b

Zwei eiserne Nägel werden an Zwirnsfäden gebunden und an diesen aufgehängt. Nähert man den Nägeln von oben her einen Pol des Stabmagneten, so spreizen sie sich etwas auseinander (Abb. 1.1.13./2). Infolge der magnetischen Influenz entstehen nämlich an den unteren und den oberen Enden der Nägel jeweils gleichnamige Pole, die einander abstoßen.

Bemerkung

Damit der Versuch auch aus größerer Entfernung beobachtet werden kann, ist Schattenwurf zu empfehlen.

1.1.14. Influenz in magnetisch weichem und hartem Eisen

1. Stabmagnet
2. Quader aus gehärtetem Stahl
3. Quader aus Weicheisen
4. kleine Eisennägel

Methodischer Hinweis

Die Unterscheidung von magnetisch weichem und hartem Eisen ist wichtig für die Verwendung von weichem Eisen in Wechselfeldern (Transformatoren, Motoren, Generatoren) und hartem Eisen für Dauermagnete.

Versuch

Der Quader aus gehärtetem Stahl muß zunächst durch Glühen und Abschrecken entmagnetisiert und wieder gehärtet werden. In einem Vorversuch wird zunächst gezeigt, daß beide Eisenstücke unmagnetisch sind. Sie ziehen keine kleinen Nägel an. Dann legt man beide Eisenstücke auf die Enden eines Stabmagneten und hängt kleine Nägel an sie (Abb. 1.1.14./1). Hebt man die beiden Eisenstücke von dem Stabmagneten ab, so bleiben die Nägel an dem gehärteten Stahl haften, während sie vom Weicheisen abfallen.

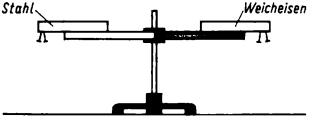


Abb. 1.1.14./1
Influenz in gehärtetem Stahl und in Weicheisen

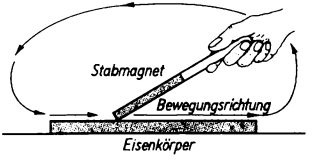


Abb. 1.1.15./1
Magnetisieren eines Eisenstabes

1.1.15. Magnetisierung durch Influenz [SE]

1. Magnet (Hufeisen- oder Stabform)
2. Stativstab
3. Schraubenzieher
4. stählerne Stricknadel
5. Messer
6. Rasierklinge
7. Eisenschlüssel
8. Aluminiumschlüssel

Methodischer Hinweis

Einerseits wird das besondere magnetische Verhalten des Eisens wiederholend behandelt, andererseits ist aber wie im V 1.1.14. unterschiedliches Verhalten verschiedener Eisenmaterialien zu zeigen.

Versuch

Ein kurzer Stativstab, ein Schraubenzieher, eine stählerne Stricknadel, eine Messerklinge, ein Eisen- und ein Aluminiumschlüssel werden mehrmals in derselben Richtung mit *demselben* Pol eines Magneten bestrichen (Abb. 1.1.15./1).

Danach werden die Körper mit Hilfe von Eisenfeilspänen auf magnetische Eigenschaften untersucht. Nur die Körper, die aus Stahl bestehen, sind magnetisch geworden. Der Aluminiumschlüssel zeigt keinen Magnetismus.

Bemerkung

Beim Magnetisieren eines Stabes kann man auch mit *einem* Magnetpol mehrmals von der Mitte des Stabes aus in der *einen* Richtung und danach mit dem *anderen* Pol in der *anderen* Richtung streichen. Beim Zurückführen muß der Magnet jedesmal abgehoben werden.

1.1.16. Modellversuch zum Veranschaulichen des Magnetisierungsvorganges

1. Reagenzglas mit Stopfen
2. Eisenfeilspäne
3. Kompaßnadel

Methodischer Hinweis

Da es mit schulischen Mitteln schwierig ist, die Weißschen Bezirke und ihre Veränderungen beim Magnetisieren unter dem Mikroskop nachzuweisen, wird empfohlen, durch den folgenden Modellversuch den Magnetisierungsvorgang durch Umlagerung von Elementarmagneten zu veranschaulichen und damit das Verständnis für V 1.1.17. vorzubereiten.

Versuch

Ein Reagenzglas wird mit Eisenfeilspänen gefüllt, so daß in ihm noch etwas freier Raum bleibt. Es wird durch einen Stopfen verschlossen und auf den Unterstellklotz gelegt. Beim Untersuchen mit einer Kompaßnadel erweist sich das gefüllte Reagenzglas als unmagnetisch; denn es werden von jedem Ende des Röhrchens beide Pole der Kompaßnadel angezogen. Führt man einen Pol eines kräftigen Magneten mehrmals in derselben Richtung an dem Reagenzglas entlang und untersucht danach seine magnetischen Eigenschaften durch Annähern einer Magnetnadel, so erkennt man, daß das gefüllte Reagenzglas die Eigenschaften eines Magneten angenommen hat. Durch leichtes Schütteln wird es wieder unmagnetisch.

1.1.17. Teilung eines Magnetstabes

1. Magnetisierte Stricknadel
2. Kompaßnadel
3. 2 Flachzangen

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch kann im Unterricht vor oder nach V 1.1.16. gebracht werden, um zu erklären, daß eine fortgesetzte Teilung eines Magneten auf kleinste magnetische Kristallkomplexe führt.

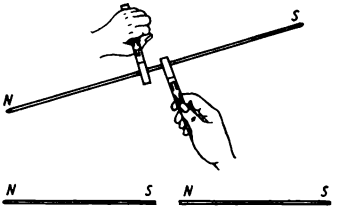


Abb. 1.1.17./1
Zerlegen einer magnetisierten Stricknadel in mehrere Teilstücke

Versuch

Eine magnetisierte Stricknadel, deren Pole durch Papierfähnchen gekennzeichnet sind, wird mit zwei Flachzangen erfaßt und an der indifferenten Zone in zwei etwa gleich lange Teile zerbrochen. Untersucht man ihre magnetischen Eigenschaften durch Annähern an eine Magnetnadel, so ergibt sich, daß beide Teile je einen Nord- und einen Südpol besitzen. Eine weitere Teilung führt zum gleichen Ergebnis. Soweit man auch die Teilung fortsetzt, immer sind die neu entstandenen Teilstücke vollständige Magnete mit zwei verschiedenen Magnetpolen (Abb. 1.1.17./1).

Bemerkung

Zum Zerteilen der Stricknadel ist auch ein Hebelvorschneider sehr geeignet.

1.1.18. Magnetisieren eines Stahlkörpers mit Hilfe von Influenz durch das Magnetfeld der Erde

1. Stativstab (500 mm)
2. Hammer
3. Kompaßnadel

Methodischer Hinweis

Der durch das Modell im V 1.1.16. veranschaulichte Vorgang wird hier in der Realität gezeigt.

Versuch

Ein unmagnetischer Stativstab wird unter dem Inklinationswinkel, den man nach V 1.1.8. bestimmt, in die Nord-Süd-Richtung gehalten und durch Klopfen mit einem Hammer leicht erschüttert. Danach stellt man durch Annähern einer Magnetnadel fest, daß der Stahlkörper einen Nordpol und einen Südpol aufweist, also magnetisch geworden ist.
Unter dem Einfluß des Magnetfeldes der Erde haben sich beim Erschüttern des Stahlkörpers die Elementarmagnete teilweise ausgerichtet. Legt man den Stab in Ost-West-Richtung und hämmert auf ihm entlang, so verliert er seinen Magnetismus wieder.

Bemerkungen

1. Längliche eiserne Gegenstände, die sich längere Zeit annähernd in der Richtung der magnetischen Feldlinien der Erde befinden (lotrecht oder horizontal in Nord-Süd-Richtung), werden durch Influenz magnetisch. Man stellt ihren Magnetismus durch Annähern einer Magnetnadel fest. Untersucht man auf diese Weise das untere Ende eines Eisenstabes, der als Riegel in ein Fenster eingebaut ist, so wird der Nordpol der Magnetnadel abgestoßen und der Südpol angezogen. Es hat sich demnach am unteren Ende des Eisenstabes ein Nordpol gebildet. Am oberen Ende ist dagegen ein Südpol entstanden.
2. Diese Vorgänge haben eine militärtechnische Bedeutung. Das vom Erdfeld influenzierte Feld in einem Schiff kann zur Zündung von Minen ausgenutzt werden. Magnetfelder von Schiffen müssen darum gemessen und kompensiert werden.

1.1.19. Akustische Wahrnehmung der Wandverschiebung bzw. Wandumklappung Weißscher Bezirke — Barkhausen-Geräusch

1. Spule (15000 Wdg.)
2. Korkstücke (⌀ 25 mm)
3. kräftiger Stabmagnet
4. dünne Drahtstücke aus Eisen, Stahl, Kupfer (⌀ etwa 1 mm, Länge etwa 200 mm)
5. zweistufiger Verstärker mit Lautsprecher oder Rundfunkgerät mit Tonabnehmerbuchsen

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ergänzt V 1.1.16., kann aber erst nach Behandlung der elektromagnetischen Induktion von Schülern verstanden werden.

Versuchsanordnung

Die Spule wird auf eine Stirnseite gestellt und mit den Eingangsbuchsen eines Verstärkers oder den Tonabnehmerbuchsen eines Rundfunkgerätes verbunden (Abb. 1.1.19./1). Man steckt einen dünnen Weicheisendraht in den Kork und setzt ihn in die Spule.

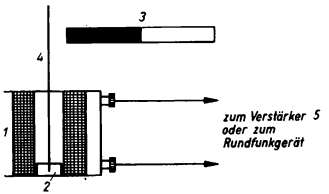


Abb. 1.1.19./1
Nachweis des Barkhausengeräuschs

Versuche

Nähert man dem Eisendraht ganz langsam den Pol des Stabmagneten, so ist ein scharrendes Geräusch im Lautsprecher zu hören. Beim Entfernen des Magneten tritt das gleiche Geräusch auf. Infolge der ruckartigen Wandverschiebung oder -umklappung der Weißschen Bezirke macht sich die Magnetflußänderung im Eisen-

draht so bemerkbar, daß in der Spule Spannungsstöße induziert werden. Diese ergeben im Lautsprecher das Geräusch. Beim Entfernen des Magneten fallen die Bezirke wieder durcheinander. Ersetzt man den Eisendraht durch einen Kupferdraht, so treten keine Geräusche auf.
Den nächsten Versuch führt man mit einem Stahldraht durch und nähert diesem den Pol des Stabmagneten. Ein scharrendes Geräusch zeigt wieder das Ausrichten der Weißschen Bezirke an. Beim Entfernen des Magneten ist ein wesentlich schwächeres Geräusch zu hören, weil der größte Teil der Bezirke geordnet bleibt. Bei erneutem Nähern des gleichen Magnetpols ist fast kein Geräusch zu hören, weil infolge der hohen Remanenz des Stahldrahtes der größte Teil der Bezirke geordnet ist. Nähert man aber den entgegengesetzten Pol des Magneten dem Drahtstück, so hört man ein besonders starkes Geräusch, da nunmehr die Wendung aller Bezirke im Stahldraht um 180° erfolgt.

Bemerkung

Es empfiehlt sich, verschiedene Drähte vorher auszuprobieren, da sich die einzelnen Eisen- und Stahlsorten magnetisch sehr unterschiedlich verhalten. Die Entfernung zwischen der Spule und dem Verstärker wähle man genügend groß, damit man aus dem Streufeld des Netztransformators herauskommt. Sollte bei dem Versuch ein andauerndes Brummen zu hören sein, so genügt es oft, das Rundfunkgerät bzw. den Verstärker zu erden. Völlig brummfrei wird die Versuchsanordnung, wenn man Spule und Verbindungskabel abschirmt und die Abschirmung erdet.

1.1.20. Abbilden einer Hysteresisschleife mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillografen

Zu Variante a

1. Katodenstrahloszillograf mit Verstärker
2. Spule (750/1 500 Wdg.)
3. Spule (125/250 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. U-Kern, massiv
7. I-Kern, massiv
8. Gleitwiderstand (300 Ω; 1,6 A)
9. Widerstand (30 kΩ; 0,25 W)
10. Kondensator (1 μF; 250 V)
11. Netzadapter

Zu Variante b

Geräte 2. bis 10., außerdem

12. Stromversorgungsgerät (6,3 V; 250 V —)
13. Katodenstrahloszillograf ohne Verstärker
14. einstufiger Meßverstärker
15. Drehwiderstand (500 kΩ; 0,5 W)

Geräte zum Selbstbau des Verstärkers ®

16. Doppeltriode ECC 81
17. Widerstand (200 kΩ; 0,5 W)
18. Widerstand (1 kΩ; 0,5 W)

19. Kondensator (20 nF)
20. Hartpapierbrett

Methodischer Hinweis

In der Abiturstufe können die magnetischen Eigenschaften verschiedener Eisensorten exakter als in den vorangehenden Versuchen durch die Hysteresiskurve untersucht werden.

Versuchsanordnung

Man stellt aus dem geblätterten U-Kern und dem I-Kern, der Spule mit 1500 Wdg. und der Spule mit 125 Wdg. nach Abbildung 1.1.20./1 einen Transformator zusammen. Der Verstärker mit dem Widerstand R_2 und der Oszillograf sind zu einem Gerät vereinigt. Die Spannung für die Zeitplatten wird an dem Gleitwiderstand R_1 abgegriffen.

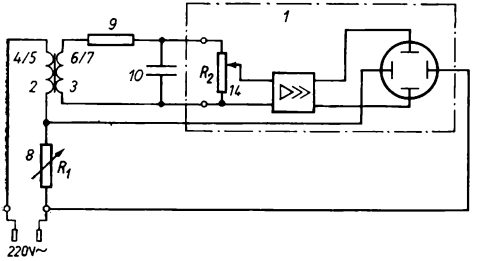


Abb. 1.1.20./1
Schaltung für Oszillografen mit eingebautem Verstärker

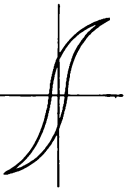


Abb. 1.1.20./2
Hysteresisschleife von geblättertem Kern

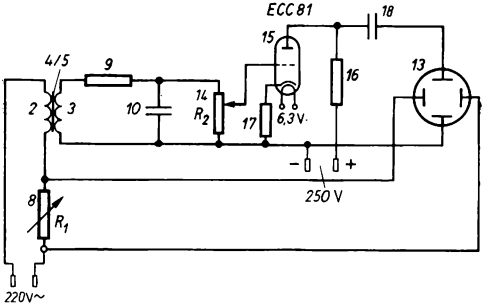


Abb. 1.1.20./3
Schaltung für Oszillografen mit eingebautem Verstärker

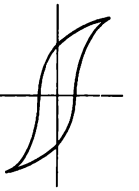


Abb. 1.1.20./4
Hysteresisschleife von massivem Kern

Variante a: Oszillograf mit eingebautem Verstärker

Untersucht wird der geblätterte U-Kern mit dem geblätterten I-Kern. Mit Hilfe der Widerstände R_1 und R_2 wird die Hysteresisschleife so eingestellt, daß sie auf dem Bildschirm Platz hat. Die Schleife zeigt etwa die Form wie Abb. 1.1.20./2. Der Flächeninhalt der von der Schleife eingeschlossenen Fläche gibt die Energie an, die bei dem ständigen Ummagnetisieren in Wärme umgewandelt wird. Sodann werden die geblätterten Kerne gegen Massivkerne ausgetauscht. Nach dem Einstellen erhält man eine Schleife wie in Abbildung 1.1.20./4. Die Schleife umschließt eine größere Fläche; die in Wärme umgewandelte Energie ist beim Massivkern größer als beim geblätterten Kern.

Variante b: Oszillograf ohne eingebauten Verstärker

Die Versuche lassen sich auch mit einer Anordnung durchführen, bei der der Verstärker mit dem eingebauten Widerstand R_2 vom Oszillografen getrennt ist.
Einen sehr einfachen Meßverstärker kann man nach Abbildung 1.1.20./3 auf einem Hartpapierbrett aufbauen. Die Daten der Einzelteile gehen aus der Abbildung 1.1.20./3 hervor. Von der Röhre ECC 81 wird nur ein Triodenteil verwendet. Die Sockelschaltung zeigt Abbildung 1.1.20./5. Die Heizspannung von 6,3 V und die Anodenspannung von 250 V liefert das Stromversorgungsgerät.

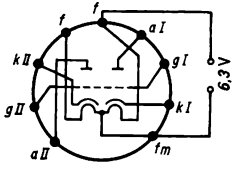


Abb. 1.1.20./5 Sockelschaltung für die ECC 81

Bemerkung

Man vermeide das längere Stehenlassen der Schleife mit großer Helligkeit auf dem Bildschirm, damit das Einbrennen, besonders an den Umkehrpunkten, verhütet wird. Mit einer Spiegelreflexkamera mit Zwischenringen kann die Kurve fotografiert werden. Richtwerte bei mittlerer Helligkeit und einem Film NP 20; Blende 1:4; Belichtungszeit 1 s.

1.1.21. Nachweis des remanenten Magnetismus in einem geschlossenen Eisenkern

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Spule (750/1500 Wdg.)
3. U-Kern
4. I-Kern
5. Glühlampe (6 V; 0,05 A)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch präzisiert V 1.1.14., indem er zeigt, daß Weicheisen nicht völlig unmagnetisch wird. Er ergänzt V 1.1.19.
2. Er sollte als Vorversuch zum dynamoelektrischen Prinzip (V 3.1.5.) gezeigt werden.

Versuch

Die Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 1.1.21./1. Es wird eine Gleichspannung von 4 V verwendet.
Beim Einschalten leuchtet die Glühlampe nur schwach. Der I-Kern läßt sich infolge der Magnetisierung nicht mehr abheben. Man schaltet aus. Die Lampe blitzt infolge der Selbstinduktion der Spule hell auf. Spule und Lampe stehen nun mit der Stromquelle nicht mehr in Verbindung. Man reißt gleich nach dem Ausschalten des Stromes den I-Kern mit einem Ruck ab. Die Lampe leuchtet kurz auf, da der Magnetfluß des remanenten Magnetismus schnell zusammenbricht, wenn man den I-Kern abreißt. Er induziert dabei eine Spannung in der Spule, die die Lampe aufleuchten läßt.

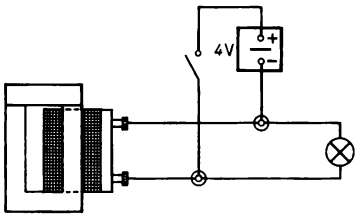


Abb. 1.1.21./1
Nachweis
des remanenten Magnetismus durch Induktion

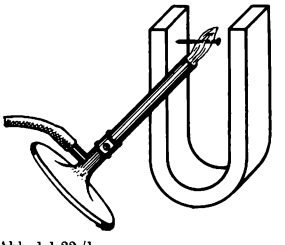


Abb. 1.1.22./1
Nachweis
der Curie-Temperatur an einem Nagel

1.1.22. Nachweis des Curie-Punktes

1. Hufeisenmagnet 2. Nagel 3. Bunsenbrenner

Methodischer Hinweis

Die Schüler sollen erkennen, daß erhöhte Wärmeschwingungen das Kristallgefüge des Stahls stören und die magnetische Ausrichtung beseitigen und verhindern.

Versuch

Zwischen die Schenkel des Hufeisenmagneten bringt man einen magnetisierten Nagel, so daß er mit der Spitze an dem einen Schenkel haftet und das andere Ende mindestens 5 mm vom anderen Schenkel entfernt ist (Abb. 1.1.22./1). Der Nagel stellt sich in Richtung der magnetischen Feldlinien ein.

Durch den Bunsenbrenner bringt man den Nagel zum Glühen, ohne den Magneten zu erhitzen. Sobald das Eisen seine Curie-Temperatur (769 °C) erreicht hat, verliert es den Magnetismus. Der Nagel kippt nach unten, er dreht sich dabei um seine Spitze. Nimmt man die Flamme weg, so stellt sich der Nagel als Folge der magnetischen Influenz durch den Magneten wieder in die ursprüngliche Stellung.

Bemerkungen

1. Die günstigste Länge und Gewichtskraft des Nagels muß man ausprobieren. Der Kopf ist unter Umständen abzukneifen. Wenn sich der Nagel wieder zurückstellen soll, muß man die Flamme wegnehmen, ehe er ganz heruntergeklappt ist.
2. Man darf den Magneten nicht erwärmen, da dabei auch der Curie-Punkt des Magneten erreicht und überschritten werden kann. Die Gefährdung des Magneten vermeidet man, wenn man an seiner Stelle eine magnetisierte und U-förmig gebogene Stahlstricknadel und einen entsprechend leichten Nagel verwendet.

1.2. Magnetfeld stromdurchflossener Leiter

1.2.1. Ablenkung einer Magnetnadel an einem stromdurchflossenen Leiter [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Kompaßnadel
3. steifer Kupferdraht (500 mm lang)
4. 3 Glühlampen (6 V; 3 W)

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist als Oerstedtscher Versuch bekannt und vermittelt den Schülern einen ersten Einblick in die magnetischen Wirkungen eines elektrischen Stromes. Es empfiehlt sich, den Versuch in der unten angegebenen Reihenfolge in 4 Teilversuchen durchzuführen, durch die die Kenntnisse allmählich erweitert werden.

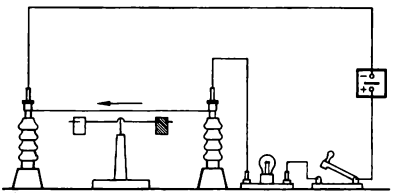


Abb. 1.2.1./1
Ablenkung einer Magnetnadel durch einen in einem geradlinigen Leiter fließenden Strom

Versuch 1

Aus einer Gleichspannungsquelle (6 V —), einer Kleinspannungsglühlampe und einem Schalter wird ein Stromkreis gebildet. Ein aus steifem Kupferdraht bestehendes Teilstück des Stromkreises wird zwischen zwei Fußklemmen in der Nord-Süd-Richtung aufgestellt (Abb. 1.2.1./1).

Beim Schließen des Schalters wird die Kompaßnadel aus der Nord-Süd-Richtung abgelenkt. Durch mehrfaches Wiederholen des Versuches wird festgestellt, daß die Ablenkungswinkel und die Ablenkungsrichtungen immer gleich sind.

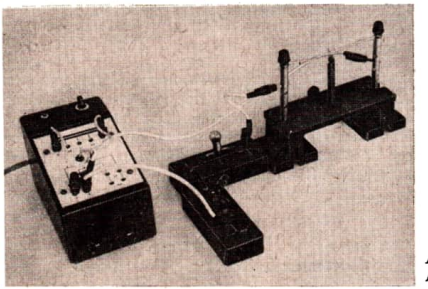


Abb. 1.2.1./2
Aufbau mit dem SEG Elektrik

Versuch 2

Parallel zur ersten wird eine zweite und dann noch eine dritte Glühlampe in den Stromkreis geschaltet, wodurch die Stromstärke anwächst.
Mit Hilfe der so abgewandelten Versuchsanordnung wird nachgewiesen, daß bei größerer Stromstärke auch der Ablenkungswinkel größer ist.

Versuch 3

Durch Vertauschen der Anschlüsse an der Spannungsquelle wird die Stromrichtung umgekehrt. Der Ausschlag der Nadel erfolgt nach der entgegengesetzten Seite.

Versuch 4

Die Kompaßnadel wird auf einen Holzklotz gestellt, so daß sie sich dicht über dem stromdurchflossenen Leiter befindet. Sie wird über dem Leiter in entgegengesetzter Richtung abgelenkt wie unter ihm.

Bemerkungen

1. Damit die Ablenkung der Kompaßnadel deutlich wird, sind Kleinspannungsglühlampen zu verwenden, die eine möglichst große Stromstärke haben.
2. Die Kompaßnadelpole sind wie in V 1.1.7. mit Papierfähnchen zu markieren.

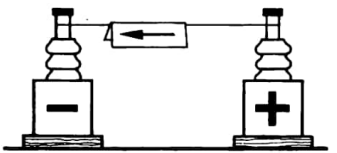


Abb. 1.2.1./3
Veranschaulichen der Stromrichtung durch Pappschilder

3. Zum Veranschaulichen der elektrischen Stromrichtung wird empfohlen, Pappschildchen mit den Zeichen + und — vor die Fußklemmen zu stellen sowie ein weiteres Schildchen mit einem Pfeil an den Leiter zu hängen (Abb. 1.2.1./3).
4. Eine Projektion mit einem Tageslichtschreibprojektor ist möglich, indem man die Kompaßnadel auf die Schreibfläche stellt und den Draht darüberspannt.

1.2.2. Feldlinienbild eines stromdurchflossenen Leiters

1. Akkumulatorenbatterie (6 V bis 12 V —)
2. Kupferdraht (⌀ 2 mm; 200 mm lang)
3. weißer Karton (120 mm × 120 mm)
4. Korken
5. Eisenfeilspäne

Methodische Hinweise

1. Während im V 1.2.1. lediglich die magnetischen Kraftwirkungen nachgewiesen werden, wird hier gezeigt, wie jeder stromdurchflossene Leiter von einem konzentrischen Magnetfeld umgeben ist.
2. Vergleiche MH V 1.1.11.!

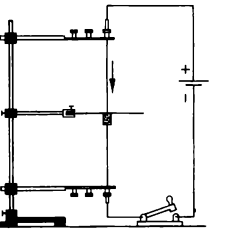


Abb. 1.2.2./1
Nachweis des Magnetfeldes eines einzelnen stromdurchflossenen geradlinigen Leiters

Versuch

Man klebt unter den Karton in der Mitte einen Korken, durch den man zur Befestigung den Kupferdraht hindurchsteckt. An einem Stativ befestigt man waagerecht übereinander zwei Klemmenstangen. Zwischen diese klemmt man in vertikaler Lage den Kupferdraht (Abb. 1.2.2./1). Den Draht verbindet man über einen Schalter mit einer Akkumulatorenbatterie und bestreut den Karton rings um den Draht mit Eisenfeilspänen. Dann schließt man kurzzeitig den Stromkreis und klopft dabei leicht gegen den Karton. Die Eisenfeilspäne ordnen sich in Kreisen um den Draht in Richtung der magnetischen Feldlinien. Man macht die Feldlinien den Schülern dadurch sichtbar, daß man sie von der Seite her stark beleuchtet und einen Spiegel, schräg nach vorn gerichtet, darüber hält.

Bemerkungen

1. Ein Stromversorgungsgerät ist bei diesem Versuch als Spannungsquelle nicht zu verwenden, da es die starken Ströme von etwa 15 A, die für den Versuch erforderlich sind, nicht liefern kann. Man ist daher auf einen Akkumulator angewiesen, den man kurzzeitig stark belasten kann. Es ist aber zu empfehlen, ihm trotzdem einen kleinen Schutzwiderstand vorzuschalten.
2. Als sehr zweckmäßig erweist es sich, an Stelle des Kartons eine Scheibe aus Piacryl oder aus einem anderen durchsichtigen Plast zu nehmen. Man kann dann die Feldlinien durch Schattenwurf an die Decke projizieren. Auch durchbohrte Glasplatten sind geeignet. Die Lehrmittelindustrie stellt dazu ein Gerät zur Projektion mit dem Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät oder mit einem Tageslichtschreibprojektor zur Verfügung.

3. Es ist möglich, an Stelle von Gleichstrom mit Wechselstrom aus einem Hochstromtransformator zu arbeiten (Primärseite 1500 Wdg. an 220 V ~; Sekundärseite 10 Wdg.).

1.2.3. Der Richtungssinn der magnetischen Feldlinien eines stromdurchflossenen geradlinigen Leiters — Bestimmung mit Hilfe einer Kompaßnadel

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gleitwiderstand (11 Ω; 10 A)
3. Strommesser (10 A)
4. Kompaßnadel

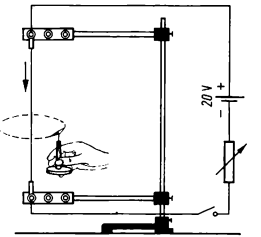


Abb. 1.2.3./1
Bestimmung der Feldlinienrichtung um einen stromdurchflossenen geradlinigen Leiter

Methodischer Hinweis

Die Festlegung des Richtungssinnes der Feldlinien ist für die Erklärung des Richtungssinnes der Feldlinien in Spulen sowie für die Polarität von Induktionsspannungen und das Lenzsche Gesetz bedeutungsvoll.

Versuch

Zwischen zwei Klemmenstangen, die an einem Stativ befestigt sind, wird ein Verbindungskabel lotrecht ausgespannt. Falls ein Eisenstativ benutzt wird, achte man darauf, daß es möglichst weit vom Kabel entfernt ist. Über einen Vorwiderstand und einen Strommesser wird dieser Leiter an eine Spannung von 20 V angeschlossen (Abb. 1.2.3./1) und die Stromstärke auf 4 A eingestellt.
Nach dem Einschalten des Stroms bringt man eine kleine, auf einer Spitze gelagerte Kompaßnadel in die Nähe des Leiters und führt sie im Kreise um ihn herum. Man stellt fest, daß die Nadel stets tangential zum Umführungskreis steht. Ihr Nordende gibt den Richtungssinn der magnetischen Feldlinien an.
Man wiederholt den Versuch in verschiedenen Höhen und weist so nach, daß der Leiter überall von einem Magnetfeld umgeben ist. Der Zusammenhang zwischen elektrischer Stromrichtung und Feldlinienrichtung wird durch die Rechte-Faust-Regel wiedergegeben. Ihre Gültigkeit wird in einem weiteren Versuch auch bei umgekehrter Richtung des Stromes nachgewiesen.

1.2.4. Der Richtungssinn der magnetischen Feldlinien eines vom Strom durchflossenen geradlinigen Leiters — Nachweis durch eine schwimmende Stricknadel

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Becherglas (600 ml)
3. magnetische Stricknadel (100 mm lang)
4. Korken
5. gerader Kupferdraht (*K* 2 mm; 300 mm lang)
6. Drahtring mit Zuleitung (Drahtdurchmesser 2 mm; Ringdurchmesser 70 mm) ⑧
7. Schwefelsäure

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.2.3.!

Versuchsanordnung

Zwei Klemmenstangen werden an einem Stativ in einem Abstand von etwa 25 cm übereinander befestigt (Abb. 1.2.4./1). An die obere Klemmenstange klemmt man einen 300 mm langen steifen Leitungsdraht, dessen unteres Ende in ein daruntergestelltes Becherglas eintaucht. Das Becherglas wird mit leicht angesäuertem Wasser gefüllt. Ein Leitungsdraht mit einem Durchmesser von etwa 3 mm und einer Länge von etwa 250 mm wird zu einem Ring mit einem äußeren Durchmesser von 70 mm gebogen. Das überstehende Ende des Drahtes wird senkrecht zur Ringfläche abgewinkelt und so an der unteren Klemmenstange befestigt, daß der Ring etwa 5 mm tief waagerecht im angesäuerten Wasser liegt. Die für diesen Versuch erforderliche Spannung von 10 V— wird einem Stromversorgungsgerät entnommen. Es wird über einen Schalter mit den Klemmenstangen verbunden. Eine magnetisierte Stricknadel wird entsprechend der Höhe des verwendeten Becherglases auf eine Länge von etwa 10 cm bis 15 cm gekürzt und durch einen Korken gesteckt. Sie schwimmt innerhalb des Ringes in lotrechter Lage, wobei sie 1 cm bis 2 cm aus dem Wasser herausragt.

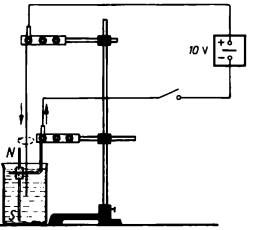


Abb. 1.2.4./1
Eine magnetisierte Stricknadel kreist um einen stromdurchflossenen Leiter

Versuch

Schaltet man den Strom ein, so beginnt die Stricknadel um den lotrechten Leiter zu kreisen. Ragt der Nordpol der Stricknadel aus dem Wasser und ist der positive Pol der Stromquelle an den lotrechten Leiter und der negative Pol an den Ring geschaltet, so kreist die Stricknadel im Uhrzeigersinn. Kehrt man die Richtung des Stromes um, so schwimmt die Stricknadel in entgegengesetzter Richtung.
Die gleiche Änderung des Richtungssinns der Bewegung erhält man, wenn man den anderen Magnetpol aus dem Wasser ragen läßt.

Bemerkung

Man kann die Stromstärke vergrößern, indem man den Säuregehalt des Wassers durch Hinzufügen von Schwefelsäure bis zu 30 Prozent steigert.

1.2.5. Gegenseitige Anziehung und Abstoßung zweier stromdurchflossener, geradliniger Leiter

1. Stromversorgungsgerät (8 V —) 2. Lamettafäden

Methodische Hinweise

1. Die Versuche können zur Einführung in die Probleme der Wechselwirkung der Magnetfelder zweier stromdurchflossener Leiter genutzt werden, wie sie in parallelverlaufenden Leitungen auftreten.

2. Eine Veranschaulichung der Kräfte kann mit dem Feldlinienbild nach V 1.2.6. gegeben werden.

Versuchsanordnung

Zwei Klemmenstangen werden übereinander im Abstand von etwa 30 cm an einem Stativ befestigt. An der oberen Klemmenstange werden zwei Lamettafäden gemeinsam an einer Klemme so festgeklemmt, daß sie in einem Abstand von etwa 5 mm nebeneinander lose herabhängen. Ihre Enden werden an je einer Klemme der unteren Klemmenstangen befestigt.

Versuch 1

Man schließt die mit den Lamettafäden verbundenen Klemmen der unteren Klemmenstange durch ein Verbindungskabel kurz. Verbindet man die obere und die untere Klemmenstange über einen Schalter mit dem Stromversorgungsgerät (8 V —), so sind die Lamettafäden parallelgeschaltet (Abb. 1.2.5./1).
Schließt man den Stromkreis, so werden sie vom Strom in gleicher Richtung durchflossen. Die Lamettafäden ziehen sich gegenseitig an und berühren sich nahezu auf ihrer ganzen Länge.

Versuch 2

Man löst das kurze Verbindungskabel zwischen den Klemmen der unteren Klemmenstange und verbindet diese beiden Klemmen mit dem Stromversorgungsgerät. Dadurch werden die Lamettafäden in Reihe geschaltet. Sie werden vom Strom entgegengesetzt gerichtet durchflossen und stoßen einander ab.

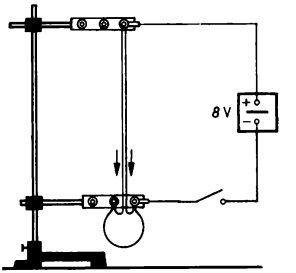


Abb. 1.2.5./1
Gegenseitige Anziehung zweier stromdurchflossener parallelgeschalteter Lamettafäden

Bemerkungen

1. Es empfiehlt sich, den Versuch in Schattenprojektion vorzuführen.
2. Zur Projektion mit einem Tageslichtschreibprojektor kann man zwei dünne Drähte oder Lamettafäden nebeneinander auf einen Holz- oder Plastrahmen spannen, den man auf die Schreibfläche legt.
3. Man kann den Versuch mit Wechselstrom durchführen. Über einen Netzadapter schließt man einen Transformator (750/10 Wdg.) an. An die 10 Wdg. werden über Hochstromkabel die an einem langen Stativstab befestigen flexiblen Leiter angeschlossen.

1.2.6. Feldlinienbilder an parallelen stromdurchflossenen Leitern

1. Akkumulatorenbatterie (6 V bis 12 V —)
2. 2 Kupferdrähte (⌀ 2 mm; 200 mm lang)
3. weißer Karton (120 mm · 120 mm)
4. 2 Korken
5. Eisenfeilspäne

Methodische Hinweise

1. Die Vorgänge aus V 1.2.5. können mit diesem Versuch durch das Feldlinienmodell anschaulich erläutert werden.
2. Vergleiche MH V 1.2.2.!

Versuch

Der Aufbau entspricht dem Aufbau für V 1.2.2. (Abb. 1.2.2./1). Die Schaltung für parallelen und antiparallelen Stromfluß wird wie im V 1.2.5. vorgenommen. Die Durchführung erfolgt wie in V 1.2.2.

Bemerkung

Vergleiche V 1.2.2.!

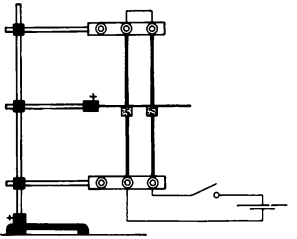


Abb. 1.2.6./1
Versuchsaufbau für Feldlinienbilder paralleler Leiter

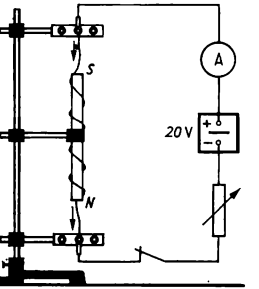


Abb. 1.2.7./1
Lamettafaden, der sich bei Stromdurchgang um einen Stabmagneten wendelt

1.2.7. Aufwendeln eines stromdurchflossenen Lamettafadens um einen Magnetstab

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gleitwiderstand (11 Ω; 10 A)
3. Strommesser (10 A)
4. Stabmagnet
5. Lamettafäden

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch eignet sich zur Problemstellung vor V 1.2.1 oder zur Wiederholung nach der Untersuchung des Feldlinienverlaufs an einem stromdurchflossenen Leiter. Er kann auch in Zusammenhang mit der stromdurchflossenen Spule demonstriert werden (V 1.2.10.).

Versuch

Ein Stabmagnet wird in senkrechter Lage mittels einer Stabmuffe an einem Stativ befestigt. Parallel zum Stabmagneten wird in geringer Entfernung ein Lametta-

faden zwischen zwei Klemmenstangen locker aufgehängt. Die Länge des Lamettafadens wird so gewählt, daß der Faden im aufgehängten Zustand mehrmals um den Stabmagneten gewunden werden kann. Die Klemmenstangen werden über einen Vorwiderstand mit einem Stromversorgungsgerät (20 V —) verbunden.
Die Stromstärke wird in einem Vorversuch vor dem Unterricht auf 4 A eingestellt. Wird der Stromkreis geschlossen, so wendelt sich der Lamettafaden mehrere Male um den Magneten (Abb. 1.2.7./1). Kehrt man die Richtung des Stromes um, so zeigt auch der Lamettafaden entgegengesetzten Wicklungssinn.

Bemerkung

Ein Vergleich mit V 1.2.4. zeigt, daß die Bewegungen relativ sind. Bei fest eingespanntem Leiter kreist der Magnetpol um den Leiter. Bei fest eingespanntem Magneten bewegt sich der Leiter um den Magneten.

1.2.8. Die Ablenkung einer Kompaßnadel in einer stromdurchflossenen Leiterschleife

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Kompaßnadel
3. steifer Kupferdraht (500 mm lang)
4. Glühlampe (6 V; 3 W)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch stellt den Übergang von geradem Leiter zur Leiterschleife und weiter zur Spule her. Er wird durch V 1.2.9. ergänzt.
2. Es ist methodisch sinnvoll, vor diesem Versuch V 1.2.1. zu wiederholen und den Draht vor den Augen der Schüler zu einer Leiterschleife zu biegen.

Versuch

Aus dem schon bei V 1.2.1. verwendeten Kupferdraht wird eine längliche Leiterschleife gebogen und zwischen den beiden Fußklemmen in der Nord-Süd-Richtung befestigt. Eine Magnetnadel stellt man so auf, daß sie sich innerhalb der Leiterschleife drehen kann (Abb. 1.2.8./1). Man schließt die Leiterschleife über eine Kleinspannungsglühlampe als Schutzwiderstand und einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle (6 V —) an. Beim Einschalten wird die Kompaßnadel aus der Nord-Süd-Richtung gedreht. Bei sonst gleichen Bedingungen wie im V 1.2.1. ist die Ablenkung der Nadel jetzt wesentlich größer, da die Kompaßnadel sowohl durch den oberen als auch durch den unteren Teil der Leiterschleife im gleichen Richtungssinn beeinflußt wird.

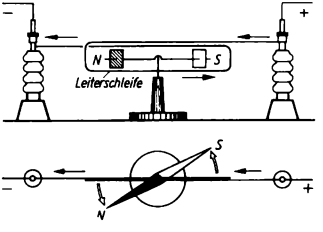


Abb. 1.2.8./1
Kompaßnadel in einer Leiterschleife

1.2.9. Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Leiterschleife

1. Akkumulatorenbatterie (6 V bis 12 V)
2. Kupferdraht (⌀ 2 mm; 350 mm lang)
3. weißer Karton
4. Eisenfeilspäne

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.2.8.!
2. Das Feldlinienbild kann deduktiv aus dem Versuch mit zwei antiparallel durchflossenen geraden Leitern entwickelt werden (V 1.2.6.).

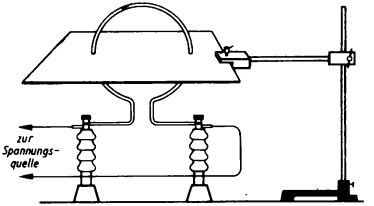


Abb. 1.2.9./1
Versuchsanordnung
zur Untersuchung
des Magnetfeldes einer Leiterschleife

Versuch

Durch ein Stück weißen Kartons sticht man im Abstande von etwa 5 cm zwei Löcher und führt einen steifen Kupferdraht so hindurch, daß er eine kreisförmige offene Schleife bildet. Die Schleifenenden werden an zwei Fußklemmen angeschlossen. Die Kartontafel wird von einem Stativ gehalten (Abb. 1.2.9./1). Die Leiterschleife wird über einen Starkstromschalter mit einer Akkumulatorenbatterie verbunden. Nachdem man den Karton gleichmäßig mit Eisenfeilspänen bestreut hat, schließt man den Schalter für wenige Sekunden und klopft dabei leicht gegen den Karton. Die Eisenfeilspäne ordnen sich zu Feldlinien an. Man erkennt, daß sich diese an keiner Stelle schneiden. Das Sichtbarmachen der Feldlinien für die ganze Klasse erfolgt wie bei V 1.2.2. durch einen Spiegel.
Auch hier sind die in den Bemerkungen zu V 1.2.2. angegebenen Verfahren zu empfehlen.

Bemerkung

Durch Annähern einer Kompaßnadel kann man feststellen, daß sich die eine Seite der stromdurchflossenen Leiterschleife wie ein magnetischer Nordpol, die andere wie ein Südpol verhält.

1.2.10. Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf eine Kompaßnadel [SE]

1. Stromversorgungsgerät (2 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Drehwiderstand (50 Ω, 25 W)
4. I-Kern
5. Kompaßnadel
6. Spiegel oder Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Nach der Untersuchung der Leiterschleife in V 1.2.9. kann man mit diesem Versuch oder V 1.2.11. zum Magnetfeld der Spule überleiten und die Erklärung dieses Feldes mit V 1.2.12. geben.
2. Es ist aber auch möglich, zuerst mit V 1.2.12. das Magnetfeld einer Spule zu erläutern und danach die Kraftwirkungen mit V 1.2.10. oder V 1.2.11. zu zeigen.

Versuch

Auf den Tisch wird eine auf einer Spitze drehbar gelagerte Kompaßnadel gestellt, die sich in die Nord-Süd-Richtung einstellt (Stellung 0). Dann legt man in einem Abstand von etwa 20 cm von der Nadel eine Spule auf einen Unterlegklotz so hin, daß die Achse der Spule in Höhe der Kompaßnadel in der Ost-West-Richtung verläuft und auf die Kompaßnadel hin gerichtet ist. Die Spule wird über einen Hebelschalter und einen Drehwiderstand an ein Stromversorgungsgerät (2 V —) angeschlossen (Abb. 1.2.10./1). Bei vollständig eingeschaltetem Widerstand wird der Stromkreis geschlossen. Dann wird der Widerstand so eingestellt, daß die Kompaßnadel um einen Winkel von etwa 20° aus der Nord-Süd-Richtung ausgelenkt wird (Stellung 1). Nunmehr wird ein I-Kern von der der Nadel abgewandten Seite her langsam in die Spule hineingeschoben. Sofort tritt eine erhebliche Vergrößerung des Nadelausschlages ein; die Kompaßnadel stellt sich schließlich in die Ost-West-Richtung ein (Stellung 2).
Durch einen schräg über die Kompaßnadel gehaltenen Spiegel kann man der Klasse diese Erscheinung besser sichtbar machen. Der Versuch kann auch auf der Schreibfläche eines Tageslichtschreibprojektors ausgeführt werden.

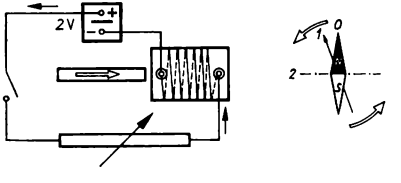


Abb. 1.2.10./1
Schaltplan zur Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf eine Magnetnadel

1.2.11. Kraftwirkung einer stromdurchflossenen Spule auf einen Weicheisenkern [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Weicheisenkern
3. Schraubenfeder oder Federkraftmesser
4. Spule (500 Wdg.)
5. Strommesser (10 A)
6. Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.2.10.!
2. In den unteren Klassenstufen kann der Versuch dazu dienen, qualitative Vorstellungen von der Abhängigkeit der Stärke des Magnetfeldes einer Spule zu vermitteln.

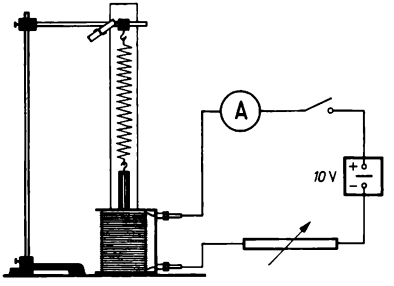


Abb. 1.2.11./1
Modell eines Weicheisenstrommessers

Versuch

Eine Spule wird so auf den Tisch gelegt, daß die eine Öffnung nach oben zeigt Über der Spule wird eine Schraubenfeder mit daran hängendem Weicheisenkern mittels einer Stabmuffe und eines Stativringes so an einem Stativ befestigt, daß der Eisenkern etwa 1 cm in das Spuleninnere taucht. Die Spule wird über einen Gleitwiderstand, einen Strommesser und einen Schalter an ein Stromversorgungsgerät (10 V —) angeschlossen (Abb. 1.2.11./1). Bei vollständig eingeschaltetem Widerstand wird der Stromkreis geschlossen. Darauf wird der Widerstand langsam so weit verringert, bis die Stromstärke auf 4 A angewachsen ist. Dadurch wird der Eisenkern immer tiefer in die Spule hineingezogen. Verringert man die Stromstärke wieder durch Vergrößern des Widerstandes, so zieht die Federkraft den Eisenkern allmählich in die Ausgangslage zurück. An Stelle der Schraubenfeder läßt sich auch ein Federkraftmesser verwenden. Der zu wählende Meßbereich richtet sich nach der Gewichtskraft des Weicheisenkerns.

Bemerkung

Erweitert man den Versuch, indem man Spulen verschiedener Windungszahl mit und ohne eingesetzten I-Kern verwendet, so ist zu demonstrieren, daß die Stärke eines Magnetfeldes mit wachsender Stromstärke, größerer Windungszahl und durch magnetische Influenz in einem Eisenkern wächst.

1.2.12. Feldlinienbild einer stromdurchflossenen Spule

1. Akkumulatorenbatterie (6 V bis 12 V)
2. Kupferdraht (⌀ 2 mm; etwa 2,5 m lang)
3. weißer Karton (200 mm · 300 mm)
4. Eisenfeilspäne
5. kurzes Rohrstück (⌀ 45 mm)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.2.10.!

Versuch

Um ein Rohr mit einem Durchmesser von 45 mm wird ein dicker, etwa 2,5 m langer Kupferdraht eng aufgewickelt. Man erhält dadurch eine Wendel mit etwa 15 Windungen. Die Wendel wird so weit auseinandergezogen, daß der Abstand zwischen den einzelnen Windungen etwa 10 mm beträgt. In den weißen Karton werden entsprechend dem Durchmesser der Wendel und dem gegenseitigen Abstand der Windungen zwei Reihen von Durchgangslöchern für die einzelnen Windungen so gebohrt, daß sie gegeneinander auf Lücke versetzt sind. Man führt die erste Windung der Wendel in die ersten beiden Löcher ein und schraubt dann die Wendel unter langsamem Drehen bis in die Mitte der Kartonebene. Die Enden der Wendel werden senkrecht zur Kartonebene nach unten gebogen und an zwei Fußklemmen befestigt (Abb. 1.2.12./1). Die Fußklemmen werden über einen Schalter an ein Stromversorgungsgerät angeschlossen (10 V —). Dann bestreut man den Karton, gleichmäßig über die ganze Fläche verteilt, leicht mit Eisenfeilspänen. Schaltet man nun den Strom kurzzeitig ein und klopft dabei leicht gegen den Karton, so ordnen sich die Späne zu Feldlinien, die das Innere der Spule der Länge nach durchsetzen und an den Enden nach außen umbiegen. Zum Sichtbarmachen der Feldlinien für die ganze Klasse dient ein schräg darüber gehaltener Spiegel.

Bemerkungen

1. Vergleiche Bemerkungen zu V 1.2.2.!
2. Bei diesem Versuch genügt notfalls die Maximalstromstärke eines Stromversorgungsgerätes mit 4 A oder 6 A.

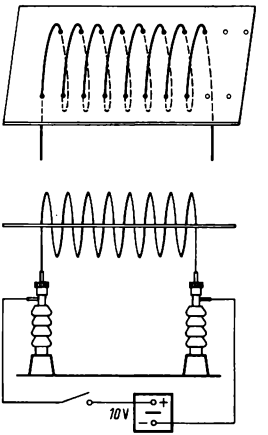


Abb. 1.2.12./1
Kupferdrahtwendel zum Nachweis des magnetischen Feldes einer vom Strom durchflossenen Spule. Darüber ein Schrägbild der Wendel

1.2.13. Feldlinienverlauf an einer Kastenspule [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. weißer Karton (A 4)
4. Eisenfeilspäne

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt den Feldlinienverlauf des Magnetfeldes einer Spule, ohne die Einzelheiten seines Entstehens durch die einzelnen Wicklungen erkennen zu lassen. Er kann zur Problemstellung vor V 1.2.12. oder zur Überleitung zum Elektromagneten nach diesem Versuch vorgeführt werden.

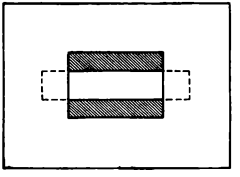


Abb. 1.2.13./1
Kartontafel zum Veranschaulichen des Magnetfeldes einer Spule

Versuch 1

Ein weißer Karton wird mit einem Ausschnitt, in den eine Spule von 500 Windungen hineinpaßt, über die Spule geschoben und von unten her durch Unterlegklötze waagerecht gehalten (Abb. 1.2.13./1). Durch den Hohlraum der Spule steckt man vorher ebenfalls einen Kartonstreifen, auf dem die Kartontafel aufliegt. Die Spule wird über einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle (6 V) angeschlossen. Man streut Eisenfeilspäne gleichmäßig auf den Karton, schließt den Stromkreis kurze Zeit und klopft dabei leicht gegen den Karton. Die Eisenfeilspäne ordnen sich in Richtung der Feldlinien. Diese werden durch einen Spiegel der Klasse sichtbar gemacht.

Versuch 2

Durch eine Änderung der Versuchsanordnung läßt sich erreichen, daß die räumliche Anordnung der Feldlinien stark in Erscheinung tritt. Die zu Versuch 1 benutzte Spule wird mit der Öffnung nach unten über eine Schachtel mit Eisenfeilspänen gehalten. In dem Augenblick, in dem der Stromkreis geschlossen wird, werden die Eisenfeilspäne in die Spule hineingerissen und hängen beim Hochheben als dichtes Büschel an ihr. An der Form dieses Büschels erkennt man deutlich, daß die Feldlinien nach allen Seiten räumlich auseinanderlaufen. Beim Ausschalten des Stromes bricht das magnetische Feld zusammen; die Späne fallen ab. Man kann den Versuch auch so durchführen, daß man die Spule mit der Öffnung nach unten an ein Stativ klemmt und ihr die Schachtel mit den Eisenfeilspänen von unten her nähert.

1.2.14. Kräfte an stromdurchflossenen Spulen

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Kupferdraht (⌀ 0,4 mm; etwa 3 m lang)
3. Standzylinder (⌀ 45 mm)
4. Fußklemme
5. 2 Klemmenstangen

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt in interessanter Weise die Kraftwirkungen zwischen den Windungen von Spulen. Er ist besonders für Problemstellungen oder zur Wiederholung geeignet.

Versuchsanordnung

Auf einem Standzylinder ohne Randverstärkung mit einem Durchmesser von 45 mm wird dünner, lackierter Kupferdraht zu einer Wendel straff gewickelt. Diese besteht aus 20 Windungen, die eng aneinanderliegen. Gibt man die Wendel frei, so schnellt sie infolge der Elastizität des Kupfers auf die etwa sechsfache Länge auseinander. Die Windung in der Mitte der Wendel wird zu einer Schlaufe mit einer Länge von 10 cm herausgezogen, in der Mitte der Schlaufe auf etwa 20 mm von der Lackschicht befreit und an eine Fußklemme geklemmt. Die Enden der Wendel werden an zwei senkrecht stehenden Klemmenstangen befestigt. Der Standzylinder wird waagerecht in eine Rohrklemme eingespannt. Die Buchsen der Klemmenstangen werden über einen Schalter mit einem Stromversorgungsgerät (12 V —) verbunden (Abb. 1.2.14./1).

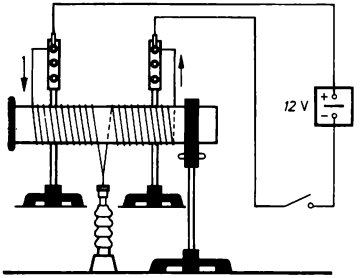


Abb. 1.2.14./1
Drahtwendel zum Nachweis der gegenseitigen Anziehung und Abstoßung zweier stromdurchflossener Leiter

Versuch 1

Schaltet man den Strom ein, so bildet sich um jede Windung der Wendel ein magnetisches Feld gleicher Richtung. Es zeigt sich die gleiche magnetische Kraftwirkung wie in V 1.2.5., Versuch 1. Die einzelnen Windungen der Wendel ziehen sich ruckartig gegenseitig an; die Wendel verkürzt sich dabei beträchtlich. Schaltet man den Strom aus, so dehnt sich die Wendel wieder bis auf ihre ursprüngliche Länge aus.

Versuch 2

Man löst ein Verbindungskabel von der Klemmenstange und legt es an die Fußklemme; die Klemmenstangen verbindet man durch ein kurzes Verbindungskabel miteinander. Die beiden Hälften der Wendel sind dann ein parallelgeschaltetes Spulenpaar, dessen einzelne Spulen vom Strom in entgegengesetztem Sinne umflossen werden. Schaltet man den Strom ein, so ziehen die Windungen der einzelnen Spulen einander an. Die beiden Spulenteile dagegen stoßen einander ab.

Bemerkungen

1. Die im Versuch gezeigten magnetischen Kraftwirkungen treten bei Großtransformatoren auf, deren Sekundär- und Primärspulen aus Scheibenspulen bestehen. Bei hoher Belastung des Transformators fließen primär- und sekundärseitig starke Ströme in entgegengesetztem Richtungssinn. Die zwischen beiden Spulen wirkenden magnetischen Kräfte haben den Betrag von mehreren Meganewton.
2. Eine Projektion der Feldlinienbilder zu diesem Versuch ist mit dem im V 1.2.2. erwähnten Gerät zur Projektion magnetischer Felder möglich.

1.2.15. Marschkompaß als behelfsmäßiges Galvanoskop [SE]

1. Flachbatterie
2. Glühlampe (3,8 V)
3. Marschkompaß
4. isolierter Kupferdraht (etwa 1 m lang)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch mit einfachen Mitteln wird beschrieben, um Schülern für Hausexperimente den Selbstbau eines Stromanzeigegerätes zu ermöglichen.

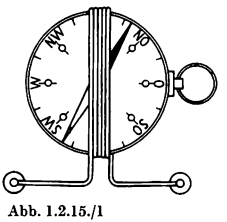


Abb. 1.2.15./1
Einfacher Wanderkompaß als behelfsmäßiges Galvanoskop

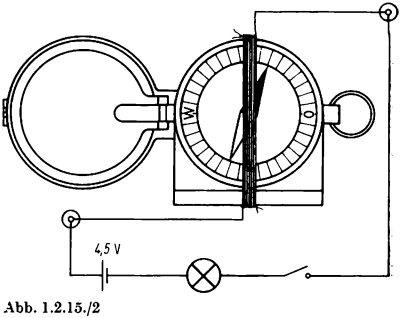


Abb. 1.2.15./2
Verwendung eines Marschkompasses zum Herstellen eines behelfsmäßigen Galvanoskops

Versuch

Man stellt den Teilring eines Marschkompasses so ein, daß die Verbindungslinie des N- und des S-Punktes genau senkrecht zur Anlegekante liegt. Um den Marschkompaß legt man dann in mehreren Windungen senkrecht zur Anlegekante einen isolierten Kupferdraht. Man bindet die Windungen auf beiden Seiten des Marschkompasses mit Zwirn zusammen, damit sie nicht vom Kompaß abrutschen. Die Enden des Kupferdrahtes klemmt man in zwei Fußklemmen und legt den Kompaß flach auf den Tisch (Abb. 1.2.15./2). Man richtet ihn so aus, daß die Kompaßnadel in der Mittellinie der Windungen liegt. Dann schließt man die Fußklemmen über eine Kleinspannungsglühlampe und einen Schalter an eine Flachbatterie mit Hilfe von zwei Krokodilklemmen an. Schließt man den Stromkreis, so schlägt die Magnetnadel aus.

1.2.16. Selbstbau eines Vertikalgalvanoskops [SE]

1. Streichholzschachtel
2. isolierter Kupferdraht (etwa 2,5 m lang)
3. Stecknadel
4. Korkstück
5. magnetisierte Stopfnadel
6. Pappscheibe (100 mm × 60 mm)
7. Isolierband
8. Klebestreifen

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.2.15.!

Versuch

Man wickelt um die Hülse einer Streichholzschachtel nahe dem Rand einen dünnen Kupferdraht in etwa 20 Windungen. Damit sich die Windungen nicht wieder lösen, legt man sie durch einige Stückchen Isolierband fest. Man steckt ein 3 cm langes Stück einer magnetisierten Stopfnadel durch ein Korkwürfelchen und steckt knapp darüber senkrecht dazu eine Stecknadel als Achse hindurch. Ein schmaler, auf die Stecknadel gesteckter Papierstreifen dient als Zeiger (Abb. 1.2.16./1). Die Stecknadel wird nun auf den Rand der umwickelten Schachtelhülle gelegt. Damit man die Zeigerausschläge vergleichen kann, klebt man an die Streichholzschachtel eine Skale aus dünnem Karton. Die so vorbereitete Schachtel stellt man zum Erreichen einer größeren Standfestigkeit auf eine kleine Pappscheibe und klebt sie an dieser mit einigen Klebestreifen fest. Danach wird die Nadelachse so eingestellt, daß der Zeiger senkrecht nach oben gerichtet ist und auf Null einspielt. Man kann auch dieses behelfsmäßige Galvanoskop als Stromanzeiger verwenden.

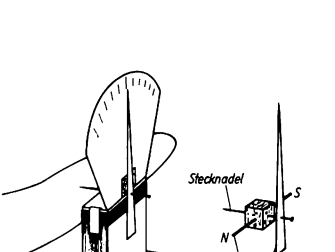


Abb. 1.2.16./1
Behelfsmäßiges Vertikalgalvanoskop

1.3. Elektromagnete

1.3.1. Die Tragkraft von Elektromagneten

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. 2 Spulen (750 Wdg.)
3. Zylinderkern
4. U-Kern
5. I-Kern
6. Laschen für Kerne
7. Spannfeder
8. Wägestück (1 kg; 5 kg)

Methodischer Hinweis

Nachdem durch V 1.2.12. und 1.2.13. das Magnetfeld einer Spule erläutert wurde, zeigen diese Versuche modellmäßig die Möglichkeiten der technischen Nutzung zum Heben von Lasten.

Versuch 1

Eine Spule mit 500 Windungen wird mit vertikal gerichteter Achse an ein Stativ geklemmt und über einen Schalter mit einem Stromversorgungsgerät (2 V —) verbunden. Schließt man den Stromkreis, so umgibt die Spule ein magnetisches Feld. Doch ist die Tragkraft so gering, daß ein eiserner Schlüssel kaum an ihr hängenbleibt. Führt man dagegen einen zylindrischen Eisenkern in die Spule ein und klemmt ihn von oben mittels einer Stabmuffe und einer Parallelmuffe ebenfalls am Stativ fest, so vermag jetzt die Spule beim Anlegen der gleichen Spannung ein 1-kg-Stück zu tragen (Abb. 1.3.1./1). Man kann die Spannung bis zu 6 V erhöhen und eine erhebliche Zunahme der Tragkraft erreichen.

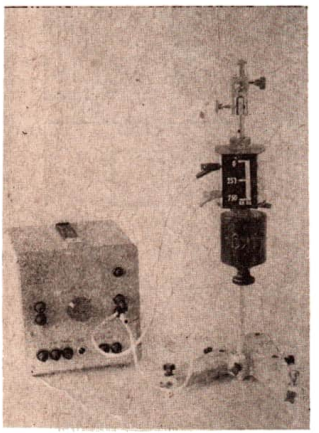


Abb. 1.3.1./1 Stabförmiger Elektromagnet

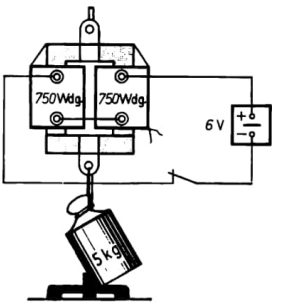


Abb. 1.3.1./2 U-förmiger Elektromagnet

Versuch 2

Man hängt einen U-Kern mit Hilfe einer dafür bestimmten Lasche an eine an ein Stativ geklemmte Stabmuffe, so daß die beiden Schenkel nach unten gerichtet sind. Auf die Schenkel schiebt man von unten her zwei Spulen mit je 500 Windungen und sichert sie durch Anlegen einer Spannfeder gegen das Herabfallen. Man schaltet beide Spulen in Reihe über einen Schalter an ein Stromversorgungsgerät (6 V —), wobei man den Wicklungssinn zu beachten hat. Schließt man den Stromkreis, so wird ein waagerecht unter den U-Kern gehaltener I-Kern kräftig angezogen. Streift man über den I-Kern eine Lasche, so wird ein an diesen Stab gebundenes 5-kg-Stück vom Elektromagneten getragen (Abb. 1.3.1./2). Man kann die Spannung bis zu 12 V erhöhen.

1.3.2. Feldlinienbilder von Elektromagneten

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Spule (750/1500 Wdg.)
3. U-Kern
4. I-Kern
5. weißer Karton
6. Eisenfeilspäne

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch setzt V 1.2.13. fort und zeigt die Veränderung im Magnetfeld einer Spule durch Eisenkerne. Er dient damit der Erläuterung der Vorgänge im V 1.3.1.

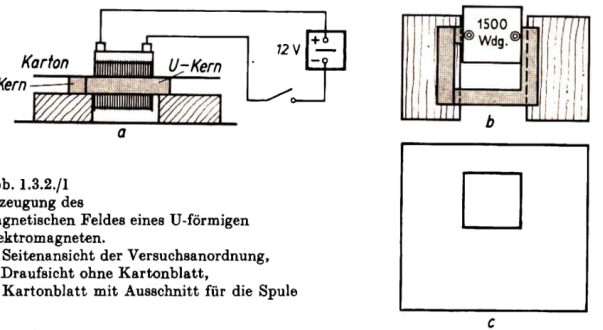


Abb. 1.3.2./1
Erzeugung des magnetischen Feldes eines U-förmigen Elektromagneten.
a) Seitenansicht der Versuchsanordnung,
b) Draufsicht ohne Kartonblatt,
c) Kartonblatt mit Ausschnitt für die Spule

Versuchsanordnung

Eine Spule mit 1500 Windungen wird auf den einen Schenkel eines U-Kernes gesteckt. Sie wird zwischen zwei Unterlegklötzen, die zur Unterstützung des U-Kernes dienen, so auf dem Tisch gelagert, daß ihre Achse waagerecht liegt. Vor dem U-Kern wird auf den einen Unterlegklotz noch ein I-Kern als Anker gelegt. Die beiden Kerne werden mit einem Bogen Karton bedeckt, der mit einem Ausschnitt über die Spule paßt. Die Spule wird sodann über einen Schalter an ein Stromversor-

gungsgerät (12 V —) angeschlossen (Abb. 1.3.2./1). Vor der Durchführung des Versuchs wird der I-Kern zunächst noch einmal fortgenommen.

Versuche

1. Der Karton wird gleichmäßig mit Eisenfeilspänen bestreut. Schaltet man den Strom ein und klopft leicht gegen den Karton, so ordnen sich die Eisenfeilspäne zu Feldlinien. Sie zeigen ein starkes Streufeld.
2. Man legt den I-Kern im Abstand von 3 cm parallel zu den Endflächen des U-Kernes und schließt den Stromkreis wieder. Die Streuung der Feldlinien ist geringer geworden. Die von den Endflächen des U-Kernes ausgehenden Feldlinien verlaufen jetzt alle auf den I-Kern zu. Die Feldlinien werden von diesem gesammelt.
3. Der I-Kern wird fest gegen den U-Kern gedrückt und der Strom von neuem eingeschaltet. Ein Streufeld ist nicht mehr festzustellen.

Bemerkung

Durch einen schräg über die Versuchsanordnung gehaltenen Spiegel kann man die Feldlinien der ganzen Klasse sichtbar machen.

1.3.3. Modell eines Morseapparates

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. I-Kern
4. Blattfeder
5. Schreibspitze
6. Morsetaste
7. 2 Gummischlauchstücke
8. Papierstreifen (etwa 10 mm breit)

Methodischer Hinweis

Obwohl Morseschreibgeräte in der Praxis weitgehend durch Fernschreiber ersetzt sind, ist die einfache Form einer Informationsübermittlung auch heute noch für die Schüler von Interesse.

Versuch

Eine Spule mit 500 Windungen wird über einen I-Kern geschoben und senkrecht auf den Tisch gestellt. Über der Spule wird waagerecht an einem Stativ eine Blattfeder befestigt, in deren Buchse ein nach unten gerichteter Schreibstift steckt. Man

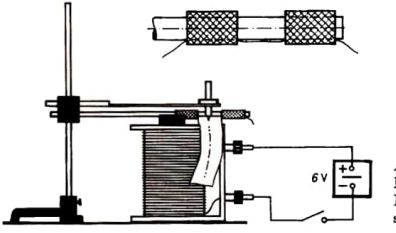


Abb. 1.3.3./1
Modell eines Morseapparates.
Im Nebenbild der Streifenhalter, stark vergrößert

verschiebt die Spule so, daß die Schreibspitze beim Anziehen der Blattfeder auf die obere Stirnfläche der Spule drückt (Abb. 1.3.3./1).
Der Morsestreifen wird aus Schreibpapier geschnitten. Die Breite des Streifens soll etwa 10 mm betragen. Damit man eine größere Länge des Streifens erhält, klebt man mehrere Streifen aneinander. Auch ein Stück einer käuflichen Papierschlange ist gut geeignet. Als Streifenhalter klemmt man unterhalb und seitlich der Blattfeder einen kurzen Stab an das Stativ. Über das freie Ende des Stabes schiebt man im Abstand von 1 cm zwei 10 mm breite Gummischlauchstücke. Zwischen diese und den Stativstab klemmt man ein Stück dünne Schnur. Zwischen der Schnur und dem Stab steckt man den Papierstreifen hindurch und führt ihn unter der Schreibspitze entlang.
Die Spule wird in Reihe mit einer Morsetaste an ein Stromversorgungsgerät (6 V —) gelegt. Zieht man den Papierstreifen langsam unter der Schreibspitze hinweg und drückt man die Morsetaste im Rhythmus der Morsezeichen, so entstehen auf dem Papierstreifen die Zeichen der Morseschrift.

1.3.4. Modell einer Fallklappe

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. I-Kern
4. Blattfeder
5. Fallklappe aus Zeichenkarton ⑧
6. Drucktaste

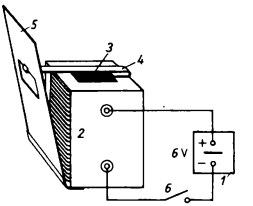


Abb. 1.3.4./1
Fallklappenmodell

Methodischer Hinweis

Die Fallklappe soll zeigen, wie ein Kurzzeitsignal in eine ablesbare Information umgewandelt werden kann und wie dabei der Elektromagnet angewendet wird.

Versuchsanordnung

Der Magnet mit Fallklappe wird nach Abbildung 1.3.4./1 aus einer Spule mit Eisenkern, einer Blattfeder und einer aus steifem Karton gefertigten Fallklappe zusammengestellt. Als Blattfeder verwendet man den Stahlstreifen eines Schnellhefters. Er wird nach Abbildung 1.3.4./1 so gebogen, daß die Fallklappe eine geringe Schräglage bekommt. Dadurch fällt sie beim Anziehen der Feder sofort herab. Die untere Seite der Fallklappe wird mit Hilfe eines Streifens dünnen Papiers an die untere Stirnfläche der Spule geklebt.

Versuch

Man schließt die Spule unter Zwischenschalten einer Drucktaste an eine Gleichspannungsquelle an. Drückt man die Taste, so wird der Stromkreis geschlossen und die Blattfeder angezogen. Die Fallklappe fällt.

Bemerkung

Damit man den Zweck der Fallklappe gut erkennen kann, bringt man hinter der Klappe an der Spule einen Karton an, auf dem eine Nachricht aufgezeichnet ist, z.B. eine Zahl, Fahrt frei oder dergleichen.

1.3.5. Modelle von Relais [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V — ; 12 V ~)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Zylinder oder I-Kern
4. Blattfeder, Klemmenstange
5. 2 Kontaktschraubenträger ⑥
6. 2 Glühlampen (14 V; 3 W)

Methodischer Hinweis

Bevor Versuche mit technischen Relais ausgeführt werden, sollen die Schüler an Modellen aus Aufbauteilen die Wirkungsweise des Relais genau kennenlernen.

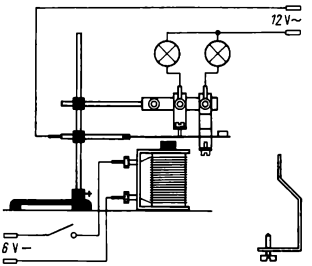


Abb. 1.3.5./1
Modellaufbau für ein Umschaltrelais.
Im Nebenbild der Kontaktschraubenträger für den Arbeitskontakt

Versuchsaufbau

Eine Spule (500 Wdg.) mit einem Eisenkern wird auf den Tisch gestellt. Sie wird über einen Schalter an eine Gleichspannung von 6 V — gelegt (Abb. 1.3.5./1). An einem Stativ wird eine Blattfeder so eingespannt, daß sie einen Abstand von wenigen Millimetern zum Eisenkern hat. Darüber wird eine Klemmenstange am Stativ befestigt. An eine ihrer Klemmen wird ein Kontaktschraubenträger geschraubt, so daß seine Kontaktschraube als Ruhekontakt die Blattfeder berührt. Der zweite Kontaktschraubenträger für den Arbeitskontakt wird nach dem Nebenbild zu Abbildung 1.3.5./1 angefertigt und so angebracht und eingestellt, daß die Blattfeder im angezogenen Zustand mit der Kontaktschraube Berührung erhält. Der Arbeitsstromkreis wird mit zwei Glühlampen (14 V; 3 W) nach Abbildung 1.3.5./1 geschaltet. Zur besseren Übersicht sind die beiden Stromkreise in der Anordnung möglichst gut räumlich zu trennen und am besten durch Verbindungsleiter mit verschiedenen Farben kenntlich zu machen.

Versuchsdurchführung

Der beschriebene Versuchsaufbau ist das Modell eines Umschaltrelais. Bei der Durchführung beginnt man zweckmäßig damit, daß man zunächst Ruhestrom- und Arbeitsstromrelais getrennt vorführt, in dem man jeweils nur einen Kontaktschraubenträger und eine Glühlampe einsetzt.

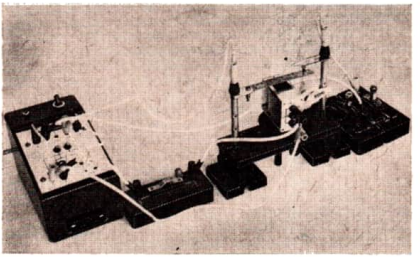


Abb. 1.3.5./2
Aufbau mit dem SEG Elektrik

Bemerkungen

1. Den Aufbau mit SEG-Teilen zeigt Abbildung 1.3.5./2.
2. Auf eine Beschreibung von Versuchen mit technischen Relais wird hier verzichtet, weil sie in ihrer Schaltung den Modellen gleichen.

1.3.6. Wagnerscher Hammer — Elektrische Klingel [SE]

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Zylinder oder I-Kern
4. Blattfeder
5. Kontaktschraubenträger
6. Klöppel
7. Glocke mit Stiel

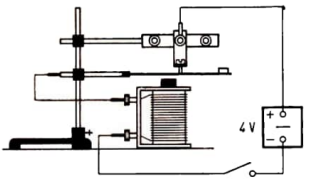


Abb. 1.3.6./1
Wagnerscher Hammer. Die Glocke ist der Einfachheit halber fortgelassen.

Methodischer Hinweis

Die Funktion des Wagnerschen Hammers ist am günstigsten aus dem Ruhestromrelais zu entwickeln, das beim Einschalten seinen Versorgungsstromkreis selbstunterbricht.

Versuch 1

Der Versuchsaufbau erfolgt wie in V 1.3.5.
Man stellt die Kontaktschraube so ein, daß sie die Blattfeder nur leicht berührt. Spule, Blattfeder und Kontaktschraube werden in Reihe geschaltet und über einen Hebelschalter an ein Stromversorgungsgerät (4 V —) gelegt. Schließt man den Strom, so wird dadurch die Feder zum Schwingen gebracht und gibt ein schnarrendes Geräusch.

Versuch 2

Die Versuchsanordnung des Versuches 1 wird durch einen Klöppel und eine Glocke mit Stiel ergänzt (Abb. 1.3.6./1).

Man steckt den Klöppel in die Buchse der Blattfeder und stellt die Glocke mit Stiel auf einem Zylinderfuß so neben den Klöppel, daß dieser die Glocke leicht berührt. Unter Umständen muß man die Blattfeder und die Kontaktschraube etwas nachstellen. Beim Einschalten des Stromes ertönt ein schriller Klingelton.

Bemerkungen

1. Nach dieser Schaltung kann man mit einem technischen Relais einen Summer aufbauen.
2. Den Aufbau mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre zeigt Abbildung 1.3.6./2.

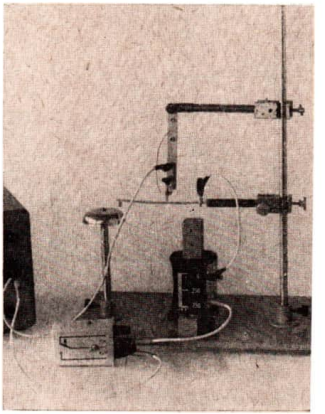


Abb. 1.3.6./2
Aufbau mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre

1.3.7. Modellversuch zur Wirkungsweise eines Mikrofons und Telefons

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. 2 Kohlestäbe einer Flachbatterie
3. Blattfeder
4. Wägestück (10 g)
5. dünne Kartonscheibe (⌀ 150 mm)
6. U-Kern, geblättert
7. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
8. Blechstreifen (35 mm × 250 mm — Konservendosenblech)
9. Spannungsmesser (1 V)
10. Papierzeiger

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll das Prinzip eines Kohlekörnermikrofons und eines Kopfhörers demonstrieren. Dabei ist es möglich, auf die Wandlung eines mechanischen Signals in ein elektrisches und umgekehrt hinzuweisen.

Aufbau des Mikrofonmodells

Zwei Kohlestäbe einer Taschenlampenbatterie werden an einem ihrer Enden konisch gefeilt und in die Buchsen einer Klemmenstange und einer Blattfeder gesteckt (Abb. 1.3.7./1). Damit die Empfindlichkeit des Mikrofonmodells möglichst groß wird, feilt man die Berührungsflächen des unteren Stabes flach ab und spitzt das Ende des oberen Stabes an. Der Abstand der Kohlestäbe soll Papierblattdicke nicht übersteigen. Eine Scheibe aus dünnem Karton wird mit Alleskleber auf der Blattfeder befestigt und dient als Mikrofonmembran. Durch ein 10-g-Stück, das auf die Blattfeder gelegt wird und dort verschoben werden kann, wird ein geringer Berührungsdruck der Kohlestäbe erzeugt.

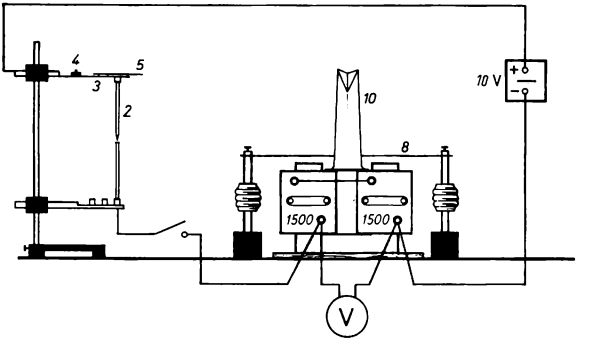


Abb. 1.3.7./1 Wirkungsweise eines Mikrofons und eines Telefons

Aufbau des Telefonmodells

Der Aufbau und die Schaltung des Telefonmodells erfolgen ebenfalls nach Abbildung 1.3.7./1. Ein 35 mm × 250 mm großer Blechstreifen wird als Membran über einem U-Kern zwischen zwei Holtzschen Klemmen ausgespannt. Durch Unterlegen mehrerer dünner Holzbrettchen nähert man den Magneten der Membran so weit, daß diese beim Schwingen den U-Kern noch nicht berührt. Auf die Stirnfläche der Spulen (1500 Wdg.) wird nach Abbildung 1.3.7./2 ein Papierzeiger geklebt. Er wird so gekniffft, daß er federnd auf der Membran aufliegt und durch die Membrankante gestützt wird. In der Ruhelage der Membran bildet der Zeiger mit den Stirnflächen einen Winkel von etwa 30°. Ein an die Spule geschalteter Spannungsmesser ermöglicht es, Spannungsschwankungen in der Spule zu beobachten. Das 10-g-Stück auf der Blattfeder wird so weit verschoben, bis der Spannungsmesser in der Ruhelage der Membran ungefähr 1 V anzeigt.

Versuch

Man bläst gegen die Membran des Mikrofons. Dadurch entstehen Stromschwankungen im Mikrofonkreis, die sich auf das Telefon übertragen. Der Spannungsmesser zeigt etwa 8 V an. Der Papierzeiger am Telefonmodell schwankt deutlich auf und nieder. Klatscht man in der Nähe des Mikrofonmodells stark in die Hände, so werden die dadurch ausgelösten Stromschwankungen ebenfalls vom Spannungsmesser und vom Papierzeiger angezeigt. Berührt man die Blattfeder

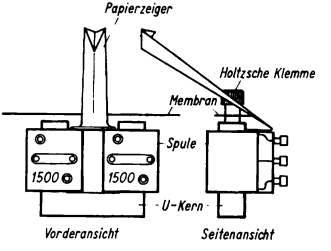


Abb. 1.3.7./2
Anordnung des Zeigers am Membranmodell

des Mikrofons leicht mit dem Finger, so schlägt der Spannungsmesser über den gesamten Skalenbereich aus; der Papierzeiger neigt sich stark.

Bemerkung

Beim Aufbau des Versuches hat man darauf zu achten, daß der Experimentiertisch schwingungsfrei steht, da schon geringe Fußbodenerschütterungen angezeigt werden und die Anzeigegeräte beeinflussen.

1.3.8. Modell eines Dreheisenmeßwerks

1. Stromversorgungsgerät (6 V —, 6 V ~)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Drehwiderstand (50 Ω; 25 W)
4. 2 Eisenstäbe (Ø 4 mm, 100 mm lang)
5. Dreheiseneinsatz oder ⑧
6. Strommesser (5 A)

Methodische Hinweise

1. In der Technik werden Dreheisenmeßgeräte zwar immer mehr durch Drehspulmeßgeräte mit Gleichrichtervorsatz verdrängt, aber ihr Wirkungsprinzip bleibt trotzdem von physikalischem Interesse.
2. Zur Erklärung ist V 1.1.9. heranzuziehen.

Vorversuch

In eine Spule mit 500 Windungen werden zwei etwa 100 mm lange Eisenstäbe (Nägel) gelegt. Durch Unterlegen eines etwas 10 mm dicken Unterlegklotzes unter die eine Längsseite der Spule wird diese etwas gekantet. Legt man an die Spule eine Spannung von 6 V — an, so stoßen sich die Stäbe gegenseitig ab. An dieser Tatsache ändert sich nichts, wenn man die Gleichspannung umpolt oder durch eine Wechselspannung mit gleichem Effektivwert ersetzt.

Herstellung eines Dreheiseneinsatzes

Aus dem Blech einer Konservendose schneidet man einen etwa 50 mm breiten und 95 mm langen Streifen und biegt ihn entsprechend Abbildung 1.3.8./1. Das untere Ende des kurzen Teiles wird zu einer flachen Rinne geformt. Diese dient zur Aufnahme eines 15 mm hohen und 70 mm langen Blechstreifens. An die eine Schmalseite des Streifens wird ein Stück Kupferdraht gelötet, das die stabile aufrechte Lage des Streifens in der Rinne sichern soll und zugleich als Zeiger dient. An das untere Drahtende wird noch eine Papierspitze geklebt.

Versuchsanordnung

Man legt eine Spule mit 500 Windungen mit der einen Öffnung nach vorn auf einen genügend hohen Unterlegklotz, so daß die vordere Spulenfläche bündig mit der vorderen Klotzfläche abschneidet, und schiebt den gebogenen Blechstreifen in das Innere ein. Danach führt man den schmalen Blechstreifen ein und setzt ihn auf die Rinne. Man läßt ihn

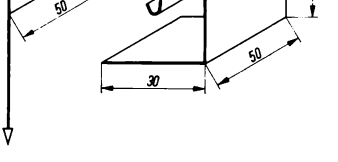


Abb. 1.3.8./1 Dreheiseneinsatz

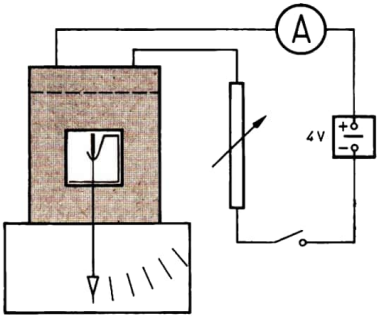


Abb. 1.3.8./2
Modell eines Dreheisenmeßwerks

etwas nach vorn herausragen, so daß der Zeiger vor der Spule frei schwingen kann (Abb. 1.3.8./2). Man schiebt unter die Spule einen um die Kante des Unterlegklotzes senkrecht nach unten gebogenen weißen Kartonbogen, damit der Zeiger gut sichtbar ist.

Versuch

Man schließt die Spule über einen Schiebewiderstand, den man zunächst noch voll einschaltet, und einen Schalter an ein Stromversorgungsgerät (4 V —) an. Schließt man den Stromkreis und schaltet den Schiebewiderstand allmählich aus, so stoßen sich der feste und der bewegliche Blechstreifen in immer stärkerem Maße ab. Es entsteht ein Zeigerausschlag. Legt man in die Leitung noch einen Strommesser, so kann man das Dreheisenmodell durch Vergleich mit dem Strommesser mit einer behelfsmäßigen Skale versehen. An dem Vorgang ändert sich nichts, wenn man das Modell an eine Wechselspannung legt.

Bemerkung

Es empfiehlt sich, beim Verwenden des selbstgefertigten Dreheiseneinsatzes den Strom nicht unvermittelt mit seiner vollen Stärke einzuschalten, sondern ihn allmählich anwachsen zu lassen, da sonst der schmale Blechstreifen durch die plötzlich einsetzende Kraftwirkung aus der Rinne gestoßen werden kann.

1.3.9. Modell eines Drehspulmeßwerks

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spule (750/1500 Wdg.)
3. 2 Stabmagnete
4. isolierter Kupferdraht (⌀ 0,3 mm, 3 m lang)
5. Gleitwiderstand (100 Ω)

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll nicht nur die Wirkungsweise des Meßwerks im Modell darstellen, sondern ist auch als Vorversuch für den Gleichstrommotor einzusetzen.

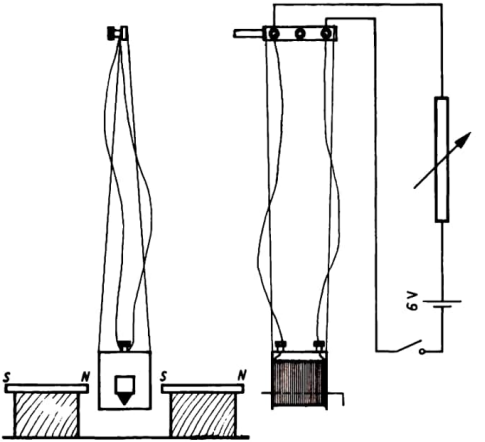


Abb. 1.3.9./1
Modell eines
Drehspulmeßwerks

Versuch

Eine Spule mit 1500 Windungen wird mit Hilfe zweier dünner Schnüre an einem Stativ bifilar aufgehängt. Als Aufhängestab verwendet man eine Klemmenstange. Die elektrische Verbindung zwischen der Spule und der Klemmenstange wird mit Hilfe von zwei etwa 0,3 mm dicken Kupferdrähten hergestellt. Dabei ist darauf zu achten, daß der Draht die Drehbewegung der Spule nicht hindert. In gleicher Höhe mit der Spulenöffnung werden beiderseits zwei Stabmagnete auf Unterlegklötze so gelegt, daß einem Nordpol des einen ein Südpol des anderen Stabes gegenübersteht (Abb. 1.3.9./1). Legt man eine Gleichspannung von etwa 4 V bis 6 V an die Klemmenstange, so dreht sich die Spule entsprechend der Richtung des Stromes aus ihrer Ruhelage. Zum besseren Erkennen der Bewegung und des Ausschlages bringt man an der Spule einen Papierzeiger an.

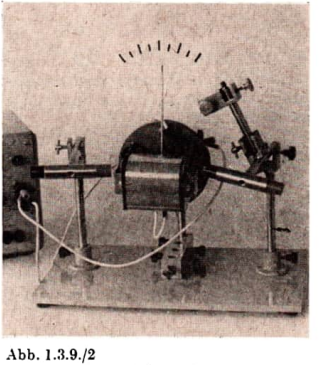


Abb. 1.3.9./2
Aufbau mit dem Aufbausatz
Elektrizitätslehre unter Verwendung
des Polwendeschalters

Bemerkung

Der Versuch kann auch mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre durchgeführt werden (Abb. 1.3.9./2).

1.3.10. Modell eines Leistungsmessers

Geräte 1. bis 4. wie in V 1.3.9., außerdem

5. Gleitwiderstand (11 Ω; 5 A)
6. Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A)
7. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
8. Strommesser (5 A)
9. Spannungsmesser (20 V)

Methodischer Hinweis

Der Versuch schließt an V 1.3.9. an und zeigt, wie man das permanente Magnetfeld durch das Feld eines Elektromagneten ersetzen kann.

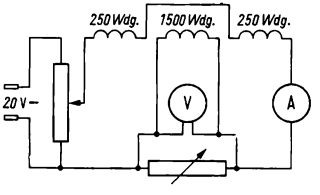


Abb. 1.3.10./1
Schaltung des Modells eines Leistungsmessers

Versuch

Der Aufbau entspricht V 1.3.9. Dabei sind an Stelle der Stabmagnete zwei Spulen von 250 Wdg. in Reihe geschaltet einzusetzen. Die Schaltung (Abb. 1.3.10./1) wird durch zwei Widerstände zur Spannungs- und Stromstärkeeinstellung auf zwei Meßgeräte ergänzt.
In der ersten Versuchsreihe hält man die Stromstärke durch die Feldspulen auf 2 A konstant und verändert die Spannung durch den Spannungsteiler in Stufen von 5 V bis auf 20 V. Der Ausschlag der Drehspule ist von der Spannung abhängig. In der zweiten Versuchsreihe hält man durch den Spannungsteiler die Spannung an der Drehspule konstant auf etwa 15 V und verändert die Stromstärke durch den zweiten Widerstand in Stufen von 1 A bis auf 4 A. Der Ausschlag der Drehspule ist von der Stromstärke in den Feldspulen abhängig.
Die Zusammenfassung ergibt, daß der Ausschlag vom Produkt aus Spannung und Stromstärke, also der Leistung, abhängt.

1.4. Feldgrößen des Magnetfeldes

1.4.1. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung einer Balkenwaage

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Waage mit Bodenhaken
3. Bruchgrammwägesatz
4. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
5. Spule (500 Wdg.)
6. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
7. Holzleiste (etwa 300 mm · 20 mm · 5 mm)
8. magnetisierte Stricknadel
9. Strommesser (100 mA; 500 mA)
10. Gleitwiderstand (300 Ω)

Methodische Hinweise

1. Die Versuche V 1.4.1. bis V 1.4.3. beschreiben drei verschiedene Verfahren zur Untersuchung der magnetischen Feldstärke H in Spulen. Dabei wird die Kraftwirkung auf kleine Probemagnete unter verschiedenen Bedingungen der Felderzeugung untersucht. Die magnetische Feldstärke H ist zu definieren als Quotient aus der Kraft F und dem Magnetfluß Φ_{Pr} des Probemagneten, auf den diese im Vakuum wirkt. $H = \frac{F}{\Phi_{Pr}}$.
   Da Φ_{Pr} in den einzelnen Teilversuchen konstant ist, ergibt sich $F \sim H$, so daß man die Kraft zum Vergleich der Feldstärken benutzen kann.
2. Vergleiche MB 1.0.4.!

Versuchsanordnung

An einem 500 mm hohen Stativ hängt eine einfache Waage, deren Schalen mit Bodenhaken versehen sind (Abb. 1.4.1./1).
An diesen hängt waagerecht an zwei Zwirnsfäden eine Holzleiste, durch die in der Mitte ein etwa 25 mm langes Stück einer magnetisierten Stricknadel vertikal hindurchgesteckt ist. Die Leiste führt man durch den Hohlraum einer Spule mit 500 Wdg., so daß sich das Nadelstück in der Mitte der Spule befindet.

Versuch 1: Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke von der Stromstärke

An die Spule wird eine Gleichspannung von etwa 12 V gelegt. Die Stromstärke wird durch den Gleitwiderstand auf etwa 40 mA eingestellt. Die Nadel wird durch die auftretende magnetische Kraft aus der vertikalen Richtung herausgedreht, so daß auch die Waage aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Durch Auflegen von Wägestücken auf die angehobene Waagschale wird das Gleichgewicht wiederhergestellt. Vergrößert man die Stromstärke auf 80 mA und 120 mA, so muß man auch die Belastung der Waagschale verdoppeln und verdreifachen, damit die Waage wieder horizontal einspielt.

Versuch 2: Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke von der Windungszahl bei gleicher Spulenlänge und konstanter Stromstärke

Man stellt bei einer Spule mit 250 Wdg. die Stromstärke auf etwa 80 mA ein und ersetzt die Spule durch eine solche mit 500 Wdg. bzw. mit 750 Wdg. bei gleicher Stromstärke. Es ist zum Ausgleich der Wirkung der Feldstärke die doppelte bzw. die dreifache Belastung erforderlich wie vorher.

Versuch 3:Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke von der Spulenlänge bei gleicher Windungszahl und konstanter Stromstärke

Man läßt durch eine Spule mit 500 Wdg. oder mit 1500 Wdg. einen Strom mit einer Stärke von etwa 80 mA fließen und stellt die zum Eintritt der Gleichgewichtslage erforderliche Belastung fest. Ersetzt man die Spule durch zwei Spulen mit je 250 Wdg. bzw. 750 Wdg. und schiebt diese dicht zusammen, so steigt damit die Gesamtlänge der Spulen auf das Doppelte. Die Stromstärke wird wieder auf den Ausgangswert eingestellt. Es ist die halbe Belastung für das Herstellen des Gleichgewichts erforderlich.

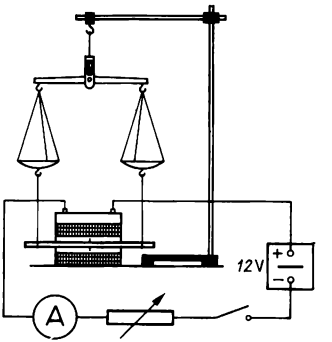


Abb. 1.4.1./1 Bestimmung der magnetischen Feldstärke durch eine Balkenwaage

Bemerkung

Die Unabhängigkeit der Feldstärke vom Flächeninhalt der Spulenfläche ist zu zeigen, indem man Spulen gleicher Windungszahl und Länge mit verschiedenen Querschnitten benutzt. Dazu eignen sich die Spulen des Geräts zum Nachweis des Induktionsgesetzes mit 600 Wdg. und den Flächen von 20 cm^2, 40 cm^2 und 60 cm^2.

1.4.2. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung eines Magnetometers

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Strommesser (500 mA)
3. Gleitwiderstand (110 Ω)
4. Zylinderspule (∅ 100 mm, Länge 400 mm; 2 × 400 Wdg. mit getrennten Anschlüssen) Ⓢ
5. Zylinderspule (∅100 mm, Länge 300 mm; 2 × 400 Wdg. mit getrennten Anschlüssen) Ⓢ
6. Zylinderspule (∅ 80 mm, Länge 400 mm; 400 Wdg.) Ⓢ
7. Holzgestell für Spulen Ⓢ
8. Magnetometer Ⓢ
9. Physikleuchte

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.4.1.!

Versuchsanordnung

Die Zylinderspule 4 wird auf einem Holzgestell horizontal gelagert und mit einer Wicklungslage über einen Gleitwiderstand an eine Gleichspannungsquelle für 4 V angeschlossen (Abb. 1.4.2./1).
In das Innere wird das Magnetometer eingeführt, dessen Konstruktion aus Abbildung 1.4.2./2 zu ersehen ist. Der Spanndraht des Magnetometers muß vertikal gerichtet sein und der kleine Magnetstab in der Ruhelage senkrecht zur Achse stehen. Von vorn wird durch eine Physikleuchte auf den Hohlspiegel Licht geworfen, das reflektiert wird und auf einer Wandskale eine Lichtmarke erzeugt.

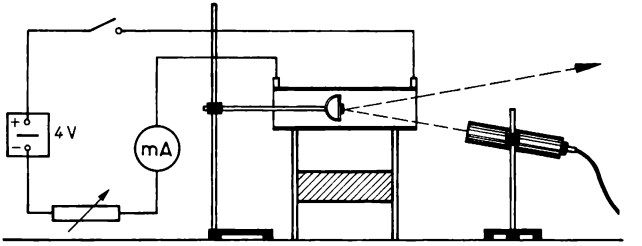


Abb. 1.4.2./1 Versuchsanordnung
zum Bestimmen der magnetischen Feldstärke mittels eines Magnetometers

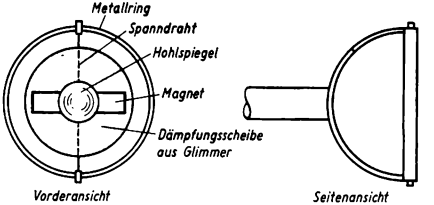


Abb. 1.4.2./2
Konstruktion
des Magnetometers

Versuche

1. Man beginnt die Versuche mit einer sehr kleinen Stromstärke. Sie bewirkt nur eine Drehung des Magneten um wenige Grad. Man kann bei kleinen Drehwinkeln bis zu etwa 5° die magnetische Kraft proportional zum Ausschlag ansehen und diesen als ein Maß für die Feldstärke betrachten. Vergrößert man die Stromstärke auf das Doppelte und auf das Dreifache, so nimmt auch der Ausschlag in entsprechender Weise zu.
2. Man schaltet die zweite Windungslage mit ein und stellt den Strom auf die gleiche Stärke ein wie im Anfang. Der Ausschlag ist auf das Doppelte angewachsen.
3. Man wiederholt die Versuche 1 und 2 bei gleicher Stromstärke mit der Zylinderspule 5, die statt 400 mm nur 300 mm lang ist. Es ergibt sich die gleiche Abhängigkeit von der Stromstärke und der Windungszahl wie vorher. Nur betragen die Ausschläge jetzt das 1,33fache der Werte wie bei den Versuchen 1 und 2. Das bestätigt, daß der Betrag der Feldstärke der Spulenlänge umgekehrt proportional ist:

$$H \sim \frac{I}{l} .$$

4. Man benutzt die Zylinderspule 6 von gleicher Windungszahl und Länge, aber mit einem geringeren Durchmesser wie Spule 4. Es ergeben sich gleich große Ausschläge wie bei Spule 4. Der Flächeninhalt des Querschnitts der Spule ist ohne Einfluß auf die Feldstärke. Die Feldstärke ist an allen Stellen im Innern der Spule gleich groß. Ausgenommen sind davon nur die Bereiche in der Nähe der

Spulenenden. Mit den Versuchen wird bestätigt, daß der Betrag der Feldstärke proportional der Stromstärke und der Windungszahl und umgekehrt proportional der Spulenlänge ist:

$$H \sim \frac{I \cdot N}{l}.$$

Bemerkung

Für die Selbstherstellung der Spulen verwendet man Rohre aus Preßspan von den angegebenen Durchmessern und bewickelt sie mit isoliertem Kupferdraht von 1 mm Durchmesser.

1.4.3. Die magnetische Feldstärke im Innern einer Spule — Verwendung eines magnetischen Zeigers

1. Stromversorgungsgerät (2 V —)
2. Strommesser (50 mA)
3. Gleitwiderstand (1300 Ω)
4. 4 Spulen (125/250 Wdg.)
5. 2 Spulen (500 Wdg.)
6. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
7. Holzleiste mit Anschlag Ⓢ
8. Magnetzeiger Ⓢ
9. Holzklotz mit Auflager Ⓢ
10. Physikleuchte
11. Linse in Fassung auf Halter
12. Streifen Millimeterpapier
13. Schalter
14. Ausgleichsgewichtsstück aus Nichteisenmetall

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.4.1.!

Versuchsanordnung

Zwei Spulen von je 250 Wdg. werden auf einer Holzleiste an einen Anschlag, der einen etwa 15 mm breiten Abstand gewährleisten soll, herangeschoben und über einen Strommesser, einen Schiebewiderstand und einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle von 2 V angeschlossen (Abb. 1.4.3./1). In den Zwischenraum ragt von oben her ein drehbar angeordneter Magnetzeiger hinein, der auf ein schwaches Magnetfeld anspricht. Sein Ausschlag wird durch eine Physikleuchte und eine davor

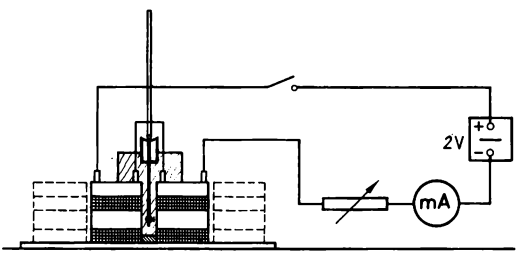


Abb. 1.4.3./1
Untersuchung der magnetischen Feldstärke einer Spule durch einen Magnetzeiger

gestellte Linse auf eine an der Wandtafel befestigte Millimeterskale projiziert. Den Magnetzeiger fertigt man nach Abbildung 1.4.3./2 aus einer stählernen Stricknadel und einem zweimal gewinkelten steifen Messingdraht an, die man beide aneinanderlötet. Die Stricknadel wird danach magnetisiert. Der Magnetzeiger wird auf ein von einem Holzklotz getragenes Auflager gesetzt und durch ein kleines anschraubbares Gewichtstück aus Nichteisenmetall im stabilen Gleichgewicht gehalten. Bei schwachen Auslenkungen des Magnetzeigers sind die Ausschläge der Feldstärke proportional.

Versuche

1. Bei Versuch 1 ordnet man auf jeder Seite des Anschlages eine Spule von 250 Wdg. an und legt eine Gleichspannung von 2 V an. Die Stromstärke wird auf 2 mA eingestellt. Der Magnetzeiger wird durch das in der Spule entstehende Magnetfeld ein wenig zur Seite gedreht; es ist ein Ausschlag von ungefähr 15 mm zu beachten. Geht man zu einer Stromstärke von 4 mA bzw. 6 mA über, so steigt der Ausschlag entsprechend auf 30 mm bzw. 45 mm.
2. Man stellt die Ausgangsstellung mit zwei Spulen von je 250 Wdg. wieder her und stellt die Stromstärke auf 2 mA ein. Geht man auf beiden Seiten zu je einer Spule mit 500 Wdg. bzw. 750 Wdg. über und behält die Stromstärke von 2 mA bei, so wächst der Ausschlag auf 30 mm bzw. 45 mm an.
3. Man stellt auf jede Seite eine Spule mit 500 Wdg. und stellt die Stromstärke auf etwa 4 mA ein. Ersetzt man die auf jeder Seite stehende Spule durch je zwei Spulen mit 250 Wdg., so sinkt der Ausschlag auf die Hälfte ab, da sich die gleiche Windungszahl auf die doppelte Länge verteilt.

Die Zusammenfassung der drei Einzelergebnisse bestätigt die Aussage:

$$H \sim \frac{I \cdot N}{l}.$$

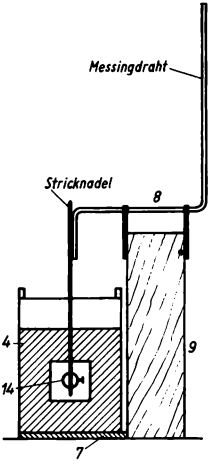


Abb. 1.4.3./2
Konstruktion
des Magnetzeigers

1.4.4. Bestimmung der Horizontalintensität der magnetischen Feldstärke der Erde

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Strommesser (500 mA)
3. Gleitwiderstand (300 Ω)
4. Standzylinder (⌀ 70 mm; Höhe 300 mm)
5. Kupferdraht (etwa 13 m)
6. Schalter
7. kleiner Kompaß
8. dicker Kartonstreifen

Methodischer Hinweis

Hier wird am Beispiel des Erdfeldes demonstriert, daß jedem Punkt eines Magnetfeldes eine Feldstärke zuzuordnen ist. Dazu wird die in V1.4.1 bis 1.4.3. untersuchte Abhängigkeit der Feldstärke von den felderzeugenden Größen benutzt.

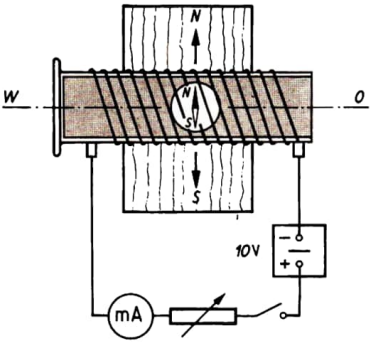


Abb. 1.4.4./1
Bestimmung der Horizontalintensität des Erdmagnetismus

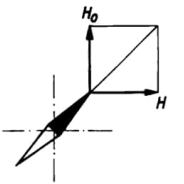


Abb. 1.4.4./2
Ablenkung der Magnetnadel beim Feststellen der Horizontalintensität des Erdmagnetismus

Versuchsanordnung

Einen Standzylinder mit der Höhe von 300 mm umwickelt man mit 50 Windungen Kupferdraht, die man über eine Länge von 250 mm gleichmäßig verteilt, so daß man in das Innere hineinblicken kann. Anfang und Ende der Wicklung werden durch Isolierband oder Leukoplast festgelegt (Abb. 1.4.4./1). Man schließt sie mittels zweier Krokodilklemmen über einen Strommesser, einen Gleitwiderstand und einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle (10 V) an. Die Spule wird auf einer Holzunterlage flach auf dem Tisch angeordnet; das Fortrollen wird durch zwei seitlich vorgelegte Holzklötze verhindert. In die Spule schiebt man horizontal einen Kartonstreifen, der knapp 1 mm schmaler ist als der Innendurchmesser des Standzylinders. Er dient zum Tragen eines kleinen Kompasses, den man durch die Lücken zwischen den Windungen deutlich erkennen kann. Man beobachtet die Spule von oben und richtet sie so aus, daß ihre Achse zu Beginn genau senkrecht zum magnetischen Meridian, mithin in der W—O-Richtung liegt.

Versuch

Man schaltet den Strom ein und wählt seine Stärke so, daß sich die Magnetnadel genau um 45° dreht. Die Feldstärke ist dann gleich der Horizontalintensität des Erdfeldes (Abb. 1.4.4./2). Dies tritt bei einer Stromstärke in der Größenordnung von etwas mehr als 70 mA ein. Die gemessene Horizontalintensität beträgt ungefähr 14 $\frac{A}{m}$.

Gegeben:	*Gesucht*:	*Lösung*:
$N = 50$ Wdg.	H	$H = \frac{I \cdot N}{l}$
$l = 0{,}25$ m		$H = \frac{0{,}07\ \text{A} \cdot 50}{0{,}25\ \text{m}}$
$I = 0{,}07$ A		$H = 14 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

1.4.5. Untersuchung der Lorentzkraft und der magnetischen Induktion

1. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V —; 12 V —)
2. Leiterschaukel ⑧
3. Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes
4. Drehwiderstand (50 Ω; 25 W)
5. Gleitwiderstand (11 Ω; 4 A)
6. 2 Strommesser (5 A; 2,5 A)
7. Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Im Abschnitt 1.2. sind zur Einführung die verschiedenen Kraftwirkungen rein qualitativ untersucht. In der Abiturstufe sind zur Einführung der Feldgrößen Versuche quantitativ auszuwerten. Dieser Versuch leitet zur quantitativen Bestimmung der Feldkräfte über, indem zunächst die Abhängigkeit der Lorentz-



Abb. 1.4.5./1
Schellen für die Leiterschaukel

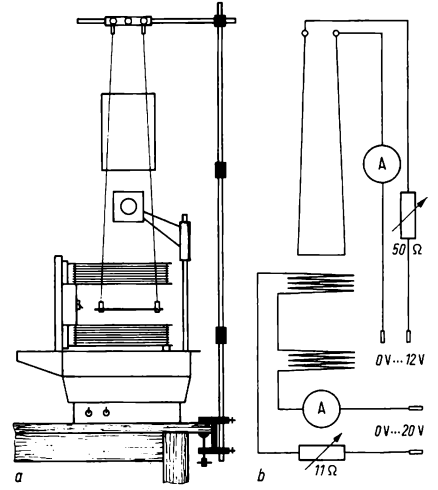


Abb. 1.4.5./2 Versuchsaufbau a) und Schaltplan b) zur Untersuchung der magnetischen Induktion

kraft von der bewegten Ladung und anschließend die Abhängigkeit der magnetischen Induktion von den felderzeugenden Größen untersucht wird.

2. Dieser Versuch ist wahlweise mit den folgenden Versuchen (bis V 1.4.8.) zu ergänzen.

Versuchsaufbau

Zunächst wird eine Leiterschaukel gefertigt. An das eine Ende von zwei flexiblen Drähten (Hf-Litze, etwa 1500mm lang) werden Kabelschuhe gelötet, an die anderen Enden zwei nach Abbildung 1.4.5./1 gefertigte Schellen aus dünnem Messingblech, durch die ein Aluminiumstab (∅ 3 mm, 340 mm lang) gehalten wird. Diese Leiterschaukel wird an einem langen Stativ mit einer Klemmenstange aufgehängt, so daß der Stab sich etwa 350 mm über der Tischfläche parallel zur Projektionswand befindet. Darunter wird der Schreibprojektor gestellt, so daß der Stab gerade noch an der unteren Bildkante abgebildet wird. Auf die Schreibfläche und auf zwei eingehängte Auflageflächen wird das Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes mit seinen beiden Helmholtzspulen gelegt, so daß die Leiterschaukel in der Mitte der Spulen hängt. Zur Dämpfung wird auf die beiden Drähte der Schaukel über dem Objektiv des Projektors mit Klebestreifen ein Blatt Papier (A 4) im Hochformat geklebt (Abb. 1.4.5./2).
Die Helmholtzspulen werden über einen Gleitwiderstand (11 Ω; 4 A) und einen Strommesser an eine Spannung 0 bis 20 V gelegt und die Leiterschaukel über einen Drehwiderstand (50 Ω; 2 A) und einen Strommesser (2,5 A) an eine Spannung von 0 bis 12 V. Die richtige Ausschlagrichtung kann durch den Umschalter am Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes hergestellt werden. Auf die Projektionsfläche wird ein Blatt Papier geheftet, auf dem die Ausschläge mit Bleistift markiert werden können.

Versuch 1: Abhängigkeit von der Stromstärke — konstante Länge

Der Abstand der Schelleninnenkanten wird auf 150 mm eingestellt, die Stromstärke in den Helmholtzspulen auf 4 A. Die Stromstärke durch die Leiterschaukel wird in Stufen von 0,2 A bis auf 1,6 A heraufgesetzt. Die Auslenkung der Schaukel kann bei kleinen Winkeln zur Messung der Kraft benutzt werden, weil sie annähernd proportional zur Kraft ist. Sie wächst proportional zur Stromstärke in der Schaukel. Also gilt:

$$F \sim I; \qquad \frac{F}{I} = \text{konst.}$$

Versuch 2: Abhängigkeit von der Länge — konstante Stromstärke

Die Stromstärken 4 A durch die Helmholtzspulen und 1,5 A durch die Leiterschaukel werden konstant gehalten. Der Abstand der Schelleninnenkanten wird auf 50 mm, 100 mm, 150 mm und 200 mm eingestellt. Die Auslenkung und damit die Kraft wachsen mit hinreichender Genauigkeit proportional zur Länge.

$$F \sim l; \qquad \frac{F}{l} = \text{konst.}$$

Die Versuchsergebnisse werden zusammengefaßt

$$\frac{F}{I \cdot l} = \text{konst.}; \qquad \frac{\frac{F}{Q \cdot l}}{t} = \frac{F}{Q \cdot v} = \text{konst.}$$

Dieser konstante Quotient ist als magnetische Induktion definiert.

Versuch 3: Abhängigkeit von der Erregerstromstärke

Man arbeite mit der Länge von 150 mm und einer Stromstärke von 1,5 A an der Schaukel. Die Feldstromstärke in den Helmholtzspulen erhöht man stufenweise um 0,5 A. Die Ausschläge und damit die Kraft und auch die magnetische Induktion wachsen proportional zur Stromstärke.

$$B \sim I_{err}.$$

Versuch 4: Abhängigkeit von der Windungszahl

Die Einstellungen an der Schaukel bleiben wie bei Versuch 3. Die Erregerstromstärke wird auf 4 A konstant gehalten. Die Windungszahlen an den Helmholtzspulen kann man durch Kurzschließen der Anzapfung mit jeweils einem Ende der Spule verändern. Man erhält so 2 · 80 Wdg. = 160 Wdg., 2 · 160 Wdg. = 320 Wdg. und 2 · 240 Wdg. = 480 Wdg. Die Kraft und damit die magnetische Induktion wachsen proportional zur Windungszahl.

$$B \sim N.$$

Versuch 5: Abhängigkeit von der Länge

Die Windungszahl von 160 Wdg. kann man einmal herstellen, indem man 160 Wdg. einer Spule benutzt und einmal, indem man jede Spule mit 80 Wdg. einschaltet. Wenn man die Schaukel in das Innere der Spule, die man mit 160 Wdg. allein benutzt, hängt, ist zwar zu erkennen, daß der Anschlag größer wird, als wenn man beide Spulen mit je 80 Wdg. bei gleicher Stromstärke einschaltet, aber die umgekehrte Proportionalität zur Länge l_{sp} der Spulen ist nicht nachweisbar, weil in den Helmholtzspulen keine langen Spulen vorliegen.

$$B \sim \frac{l}{l_{sp}}.$$

Die Zusammenfassung ergibt:

$$B \sim \frac{I_{err} \cdot N}{l_{sp}}.$$

Die Abhängigkeit vom Stoff in der Spule ist experimentell nicht nachweisbar. Die Permeabilität muß als Proportionalitätsfaktor eingeführt werden.

Bemerkung

Zur magnetischen Induktion in Helmholtzspulen vergleiche V 1.4.6.!

1.4.6. Bestimmung der magnetischen Induktion im homogenen Feld durch Messung der Lorentzkraft mit Hilfe einer Balkenwaage

1. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V —; 12 V —)
2. Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes
3. Gleitwiderstand (11 Ω; 5 A)
4. Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A)
5. 2 Strommesser (5 A)
6. Balkenwaage mit Meßspulen ⑧

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.4.5.!
2. Durch Wägung werden die Feldkräfte in diesem Versuch im Gegensatz zu V 1.4.5. quantitativ bestimmt.

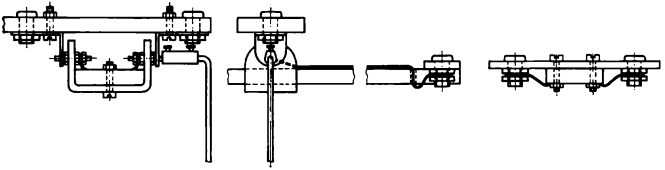


Abb. 1.4.6./1 Einzelheiten zur Anfertigung der Waage

Anfertigung der Waage und der Spulen

Der Waagebalken wird aus Hartpapier (6 mm dick) mit einer Länge von 520 mm und einer Breite von 20 mm geschnitten (Abb. 1.4.6./1).
Die Aufhängung erfolgt in der Mitte durch ein U-förmig gebogenes Stück aus PVC, in dessen Schenkel zwei Schaftschrauben (M 3) mit Muttern verschraubt werden. Die Schraubenköpfe werden abgeschnitten. Als Lager dienen zwei Messing- oder Aluminiumwinkel, die mit einer Schraube (M 3) und mit einer Telefonbuchse auf einen Hartpapierstreifen (200 mm × 6 mm) als Haltestab geschraubt sind.
An dem einen Ende des Waagebalkens wird senkrecht zu ihm ein PVC-Streifen (60 mm × 20 mm × 3 mm) als Spulenträger mit zwei Schrauben (M 3) befestigt. Dieser wird in einem Abstand von 40 mm mit zwei Telefonbuchsen versehen. Die Mittellinie der beiden Buchsen hat einen Abstand von 250 mm zur Aufhängung. Im gleichen Abstand wird am anderen Ende des Waagebalkens ein Haken zur Aufhängung einer Waagschale angebracht. Von den beiden Aufhängeschrauben zu den Telefonbuchsen des Spulenträgers werden zwei Kupferdrähte (1 mm²) entlang des Waagebalkens geführt.
Dazu werden rechteckige Spulen mit den Flächen 250 mm · 100 mm und 250 mm · 150 mm gefertigt. Aus Hartfaserstreifen (20 mm breit, 4 mm dick) und passenden Holzklötzchen werden entsprechende Rahmen geklebt. In die obere Querleiste werden im Abstand von 40 mm zwei Steckerstifte eingesetzt. Um diese Rahmen werden 10 Wicklungen von Kupferdraht (1 mm²) gelegt. Man kann auch Spulen gleicher Fläche bauen, wenn man diese Spulen mit 10 Wdg. und 15 Wdg. wickelt. Auf das herausragende Ende eines Lagerzapfens setzt man einen Metalleinsatz aus einer Lüsterklemme, in dem man als Zeiger einen Aluminiumstab (∅ 2 mm) befestigt, dessen eines Ende man etwa 10 mm rechtwinklig umgebogen hat.

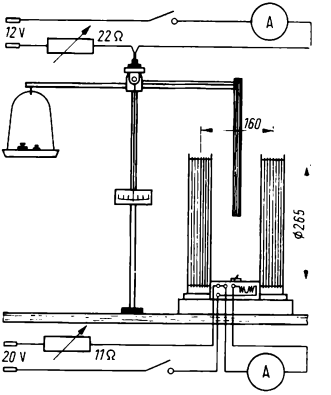


Abb. 1.4.6./2 Aufbau der Waage und Schaltung der Stromkreise

Versuchsaufbau

Der Haltestab des Waagebalkens wird mit einer Kreuzklemme an einem Stativ mit

Tischklemme befestigt (Abb. 1.4.6./2). Waagschale und Spule werden an den Waagebalken gehängt und am Stativ eine Skale für den Zeiger angebracht. Das Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes wird so aufgestellt, daß sich die untere Spulenkante bei waagerecht stehendem Waagebalken etwa in der Mitte der beiden Helmholtzspulen befindet. Die Stromzufuhr zur Spule erfolgt mit einer Spannung von 12 V über einen Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A) und einen Strommesser (5 A) zu den beiden Buchsen an der Aufhängung des Waagebalkens. Die Helmholtzspulen werden mit Strommesser (5 A) und Gleitwiderstand (11 Ω; 5 A) an eine Gleichspannung von 20 V angeschlossen.
Vor dem Einschalten wird der Waagebalken durch Auflegen von Wägestücken auf die Waagschale waagerecht eingestellt und die Zeigerstellung an der Skale genau abgelesen.
Durch Einschalten beider Ströme und gegebenenfalls Betätigung des Umpolschalters der Helmholtzspulen sorgt man dafür, daß die Kraft an der Spule nach unten wirkt.

Versuch

Der Feldstrom wird eingeschaltet. Die Stromstärke wird auf 5 A und die Spulenstromstärke auf 4 A eingestellt. Durch Auflegen von Wägestücken wird der Waagebalken in seine Ausgangsstellung zurückgestellt. Bei einer Spulenbreite von 100 mm und 10 Windungen ist dazu eine Gewichtskraft $G \approx 2{,}8\ \mathrm{p} \approx 0{,}028\ \mathrm{N}$ erforderlich. Die magnetische Induktion B ist zu berechnen.

Gegeben:

$I = 4\ \mathrm{A}$
$l = 10 \cdot 0{,}1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{m}$
$F = 0{,}028\ \mathrm{N}$

Gesucht:

B

Lösung:

$$B = \frac{G}{I \cdot l}$$

$$B = \frac{0{,}028\ \mathrm{N}}{4\ \mathrm{A} \cdot 1\ \mathrm{m}}$$

$$B = 0{,}007\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2}$$

Man kann die magnetische Induktion B auch aus den Daten der Helmholtzspulen berechnen:

Gegeben:

$I_{\mathrm{err}} = 5\ \mathrm{A}$
$N = 480$ Wdg.
$r = 0{,}1325\ \mathrm{m}$ (Radius der Spulen)
$a = 0{,}08\ \mathrm{m}$ (Abstand von den Spulen)
$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$

Gesucht:

B

Lösung:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I_{\mathrm{err}} \cdot N \cdot r^2}{2(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B \approx 0{,}007\ \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2}$$

Die verwendete Gleichung gilt genau für Punkte auf der Achse einer stromdurchflossenen Kreisschleife. Für die vorliegenden Helmholtzspulen gilt sie näherungsweise. So ist die Messung im Versuch hinreichend genau.

Bemerkung

In weiteren Teilversuchen kann die Abhängigkeit der Feldkraft (Lorentzkraft) von der Stromstärke und der Länge der Leiter der Meßspule bei konstanter magnetischer Induktion untersucht werden, indem man Spulen mit verschiedener Breite oder verschiedener Windungszahl bzw. unterschiedliche Stromstärken in die Meßspule einsetzt. Außerdem ist die Abhängigkeit der Feldkraft von der magnetischen Induktion zu untersuchen, indem man die Stromstärke oder die Windungszahl in den Helmholtzspulen ändert.

1.4.7. Untersuchung der Lorentzkraft mit Hilfe des Gerätes zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern
3. Gleitwiderstand (300 Ω)
4. Strommesser (100 mA)
5. 3 Hufeisenmagnete
6. Stromversorgungsgerät (12 V —)
7. U-Kern
8. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
9. Strommesser (1 A)
10. Gleitwiderstand (150 Ω)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.4.5.!
2. Während in den vorangehenden Versuchen mit einem homogenen Magnetfeld gearbeitet wurde, sind hier Versuche zur Untersuchung von inhomogenen Feldern beschrieben.
3. Der Versuch 4 kann im Zusammenhang mit der Erläuterung der Definition der Stromstärkeeinheit Ampere ausgeführt werden.

Versuchsaufbau

Das Grundgerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern wird ausgerüstet mit der Flüssigkeitsdämpfung, dem unteren Spanndraht ∅ 0,25 mm und der Rahmenspule am Objektträger (Abb. 1.4.7./1). Auf den Gerätetisch wird ein Holzklotz gelegt, auf den Hufeisenmagnete oder ein Elektromagnet (2 Spulen 1500 Wdg. auf U-Kern) so gelegt werden können, daß sie sich etwa in der Mitte der lotrecht verlaufenden Seiten der Rahmenspule befinden. Das Gerät wird justiert, so daß sich der Zeiger bei Nullstellung des Skalentopfes auf der Ablesemarke befindet. Die Rahmenspule wird nach Abbildung 1.4.7./2 mit Strom versorgt. Die Stromzuführung erfolgt über die Spanndrähte.

Versuch 1: Abhängigkeit von der Stromstärke

Auf den Holzklotz wird ein Hufeisenmagnet gelegt, so daß die vordere Seite der Rahmenspule sich in der Mitte zwischen den Schenkeln in einem Abstand von etwa 50 mm vor den Schenkelenden befindet. Der Strom wird eingeschaltet und auf 20 mA eingestellt. Der Stromrichtung entsprechend wird die Spule angezogen oder abgestoßen.
Die Auslenkung der Spule wird durch Drehungen am Skalentopf zurückgestellt und die Kraft in Skalenteilen gemessen.
Die Stromstärke wird stufenweise um je 20 mA bis auf 100 mA vergrößert und jedesmal die Kraft gemessen.

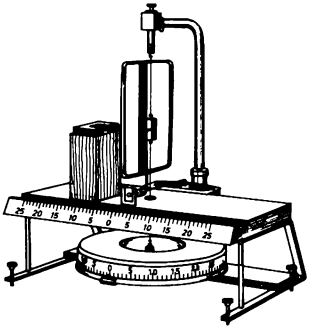


Abb. 1.4.7./1
Versuchsanordnung zu Versuch 1

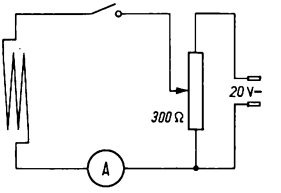


Abb. 1.4.7./2 Schaltung der Rahmenspule. In Versuch 4 ist die zweite Rahmenspule in gleicher Schaltung mit 150 Ω und 12 V zu schalten

Der Quotient aus der Kraft und der Stromstärke ist mit hinreichender Genauigkeit konstant, um die Beziehung $F \sim I$ zu erkennen.

Versuch 2: Abhängigkeit von der Länge

Die Durchführung erfolgt wie in Versuch 1, aber bei konstanter Stromstärke von 50 mA. Die Länge des im Magnetfeld befindlichen Teils der Spule wird verdoppelt, indem man einen zweiten gleichen Hufeisenmagneten auf den ersten legt und schließlich durch einen dritten Hufeisenmagneten verdreifacht. Die Kraft wächst dabei proportional zur Länge des Leiters im Magnetfeld:

$$F \sim l\,.$$

Versuch 3: Abhängigkeit von der magnetischen Induktion

Der Hufeisenmagnet wird ersetzt durch einen Elektromagneten aus zwei Kastenspulen (1500 Wdg.) auf einem U-Kern. Man stellt die Stromstärke in ihm zunächst so ein, daß die magnetische Induktion seines Feldes an der Meßstelle etwa den gleichen Betrag hat wie die magnetische Induktion der vorher verwendeten Hufeisenmagnete. Die Stromstärke in der Rahmenspule stellt man auf etwa 40 mA konstant ein und verdoppelt und verdreifacht die Stromstärke im Elektromagneten. Die Kraft F ist proportional zur Stromstärke im Elektromagneten und damit zur magnetischen Induktion B.

$$F \sim B\,.$$

Die Zusammenfassung ergibt: $F = I \cdot l \cdot B\,.$

Versuch 4: Untersuchung der Kraft zwischen parallelen Leitern

An Stelle der Magnete in den vorangehenden Versuchen wird die zweite Rahmenspule mit dem Kupplungsstück auf einem der beiden Schlitten des Gerätes be-

festigt, so daß ihre Fläche parallel zu der Schlittenbahn steht. Über einen Gleitwiderstand (150 Ω) und einen Strommesser wird sie an eine Spannung von 12 V — gelegt (Abb. 1.4.7./2).
Indem man die Stromstärken in beiden Spulen konstant auf Werte von etwa 0,8 A einstellt und die Spule auf demSchlitten stufenweise um jeweils 10mm von der Meßspule entfernt, findet man die Proportionalität $F \sim \frac{l}{r}$.

Da die Längen und die Stromstärken dabei konstant sind, ist $F \sim B$ und damit $B \sim \frac{l}{r}$.

In einem weiteren Teilversuch läßt man die Stromstärke in der Meßspule konstant mit $I_1 = 0{,}5$ A und verändert die Stromstärke I_2 in der Spule auf dem Schlitten in Stufen von 0,1 A bis auf 0,5 A. Der Abstand der Spulenseiten wird konstant auf 40 mm gehalten. Es zeigt sich:

$$B \sim I_2 .$$

Es gilt also $B \sim \frac{I_2}{r}$ und unter Einsetzen des Proportionalitätsfaktors $B = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi \cdot r}$.
Nach Versuch 1 bis 3 ist $F = l \cdot I_1 \cdot B$. Durch Einsetzen von B ergibt sich

$$F = \mu_0 \frac{l \cdot I_1 \cdot I_1}{2\pi \cdot r} .$$

Bemerkungen

1. Die Versuche 1 bis 3 können mit unterschiedlichem Abstand der Magnete von der Meßspule durchgeführt werden, um zu zeigen, daß F und B im inhomogenen Feld ortsabhängig sind.
2. Die in Versuch 4 aufgestellte Gleichung ist für die Definition der Stromstärkeeinheit von Bedeutung. Mit $l = 1$ m, $r = 1$ m, $I_1 = I_2 = 1$ A ist die Kraft $F = 2 \cdot 10^{-7}$ N.
   Daraus ist μ_0 zu berechnen:

$$\mu_0 = \frac{F \cdot 2\pi \cdot r}{l \cdot I_1 \cdot I_2}$$

$$\mu_0 = \frac{2 \cdot 10^{-7}\,\text{N} \cdot 2\pi \cdot 1\,\text{m}}{1\,\text{m} \cdot 1\,\text{A} \cdot 1\,\text{A}}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

$$\mu_0 = 12{,}56 \cdot 10^{-7} \frac{\text{VA} \cdot \text{s}}{\text{A}^2 \cdot \text{m}}$$

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} .$$

3. Teilt man in einem Vorversuch mit der zum Gerät gehörenden Vorrichtung die Skale des Skalentopfes in Krafteinheiten, so kann man F messen und nach der Gleichung aus Bemerkung 2 die Induktionskonstante μ_0 näherungsweise berechnen.

1.4.8. Abhängigkeit der magnetischen Induktion im Innern einer langen Spule

1. 2 Stromversorgungsgeräte (20 V — und 6 V —)
2. Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern
3. Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A)
4. Drehwiderstand (50 Ω; 25 W)
5. 2 Strommesser (5 A; 1 A)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.4.5.!
2. Diese Versuchsanordnung ist deshalb von Interesse, weil auch die Abhängigkeit der magnetischen Induktion von der Länge einer Spule untersucht werden kann.

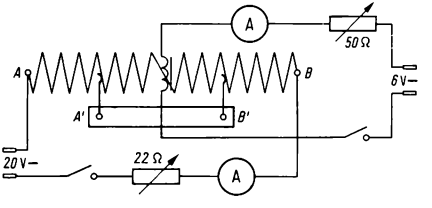


Abb. 1.4.8./1
Schaltbild für Feld- und Meßspulenstromkreis. In Versuch 3 Anschlüsse von A und B auf A' und B' legen.

Versuchsaufbau

Auf das Gerät wird die längenveränderliche Spule montiert. Es wird die Flüssigkeitsdämpfung verwendet und der untere Spanndraht (0,15 mm) eingesetzt. Die im Objektträger eingebaute Meßspule wird durch den Verbindungsbügel an die Stromzufuhr über die Spanndrähte angeschlossen und der Eisenkern in ihre Mittelöffnung eingesetzt. Sie wird über den Drehwiderstand (50 Ω) und einen Strommesser an eine Spannung von etwa 6 V gelegt. Der Stromkreis für die längenveränderliche Feldspule wird mit einer Spannungsquelle (20 V; 5 A), einem Strommesser und einem Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A) aufgebaut. Die Spule kann an ihren Enden oder über die Buchsen am Abgreifschieber angeschlossen werden (Abb. 1.4.8./1). Die Messungen der Kräfte erfolgen wie in V 1.4.7. durch Rückdrehen am Skalentopf.

Versuch 1: Abhängigkeit von der Feldstromstärke

Die Stromstärke in der Meßspule wird in diesem und den folgenden Teilversuchen konstant auf 0,4 A gehalten. Die Enden der Feldspule werden an die Stromversorgung angeschlossen und die Stromstärke stufenweise um 1 A erhöht. Es zeigt sich $F \sim I$ und damit $B \sim I$.

Versuch 2: Abhängigkeit von der Länge

Bei konstanter Stromstärke schiebt man die Feldspule zusammen und verkürzt ihre Länge in Stufen von 50 mm. Die Meßergebnisse liefern mit hinreichender Genauigkeit $F \sim \frac{1}{l}$ und damit $B \sim \frac{1}{l}$.

Versuch 3: Abhängigkeit von der Windungszahl

Die Feldspule wird über den Abgreifschieber angeschlossen. In dieser konstanten Länge wird die Windungszahl durch Auseinanderziehen oder Zusammendrücken der Feldspule verändert. Die Windungszahlen sind auszuzählen. Bei konstanter Stromstärke zeigen die Kraftmessungen $B \sim N$.

Die Zusammenfassung ergibt: $B \sim \frac{I \cdot N}{l}$.

1.4.9. Angenäherte Bestimmung der relativen Permeabilität durch Abreißversuch

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spule (125/250 Wdg.)
3. U-Kern
4. Tafelwaage
5. 2 Wägestücke aus Eisen (1 kg)
6. Schrot oder Glaskugeln zum Tarieren
7. Holzgabel ⑧
8. Schraubzwinge
9. Strommesser (100 mA)
10. Strommesser (10 A)
11. Drehwiderstand (25 Ω; 2 A)

Methodischer Hinweis

In keinem der vorangehenden Versuche konnte die Abhängigkeit der magnetischen Induktion von der Permeabilität gezeigt werden. Darum sollten diese Versuche durch diesen oder durch V 1.4.10. im Unterricht ergänzt werden. Auch die in der Einführung gemachten Untersuchungen über ferromagnetische Stoffe im Magnetfeld werden quantitativ fortgeführt.

Versuchsanordnung

Eine Holzleiste von 15 mm × 70 mm × 240 mm erhält einen gabelförmigen Einschnitt, in den das eine 1-kg-Wägestück fest eingeklemmt wird. Das freie Ende der Leiste wird auf der einen Tafel der Waage durch eine kleine Schraubzwinge festgehalten (Abb. 1.4.9./1). Die Tafelwaage wird auf untergelegten Holzstückchen so aufgestellt, daß man die Spule (125 Wdg.) gerade noch unterschieben kann, ohne daß das Wägestück den Spulenflansch berührt. Dieser soll den U-Kern um 0,5 mm bis 1 mm überragen. Durch Tarieren wird die Waage ins Gleichgewicht gebracht.

Versuch

Man legt die Spule an eine Gleichspannung von etwa 2 V bis 4 V und stellt mit Hilfe des Widerstandes einen Strom von $I_1 = 70$ mA bis 80 mA ein. Dadurch wird bewirkt, daß der U-Kern das Gewichtsstück gerade nach anzieht. Man legt so viel

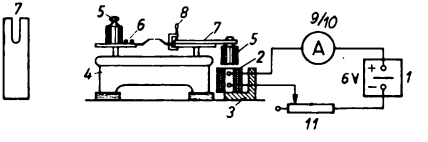


Abb. 1.4.9./1
Ermittlung der Permeabilität durch Abreißen

Tarierkörper auf, bis das Wägestück abgehoben wird. Dann entfernt man den U-Kern und baut die Spule wieder unter dem Wägestück auf. Man muß dabei sehr behutsam verfahren, so daß das Wägestück nicht angestoßen und die Waagschale nicht aus dem Gleichgewichtszustand gebracht wird. Der Strommesser (100 mA) wird gegen den Strommesser (10 A) ausgetauscht, und die Stromstärke wird so weit vergrößert, bis das Gewichtsstück vom Magnetismus der Spule festgehalten wird. Dann verringert man die Stromstärke wieder, bis das Gewichtsstück eben abgehoben wird, und stellt die Stromstärke I_2 fest. Das Verhältnis der Stromstärken ist ein Maß für die relative Permeabilität:

$$\mu^* = \frac{I_2}{I_1}.$$

Beispiel

Bei einer Spule mit 125 Wdg. ergaben sich $I_1 = 65$ mA und $I_2 = 8{,}3$ A. Mithin betrug die relative Permeabilität

$$\mu^* = \frac{8{,}3}{0{,}065} \approx 130.$$

Bemerkungen

1. Das Gewichtsstück und der U-Kern müssen unmagnetisch sein. Je nach der Eisensorte können sich sehr unterschiedliche relative Permeabilitäten ergeben.
2. Beim Messen der Abreißkraft ohne Kern werden die Spule, der Widerstand und das Stromversorgungsgerät nicht überbelastet, wenn man den Strom nur ganz kurze Zeit einschaltet.

1.4.10. Bestimmen der relativen Permeabilität durch Messen von Spannungsstößen

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gleitwiderstand (22 Ω; 4 A)
3. Strommesser (5 A)
4. Spannungsmesser) 100 mV; 10 V; Nullpunktmittellage)
5. 2 Spulen (1500 Wdg.)
6. 2 U-Kerne, geblättert
7. 2 U-Kerne aus Holz ⑧

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.4.9.!

Versuch

Die U-Kerne aus Holz werden in den gleichen Abmessungen wie die aus Weicheisen gefertigt.

Nach Abb. 1.4.10./1 werden beide Spulen zunächst auf die Holzkerne gesetzt. Die untere Spule dient zur Felderzeugung und wird über einen Spannungsteiler (22 Ω), Schalter und Strommesser (5 A) an eine Gleichspannung von 20 V gelegt. Die zweite Spule dient als Induktionsspule. An sie wird das Demonstrationsmeßgerät

mit einem Meßbereich von 100 mV als ballistischer Spannungsmesser angeschlossen. Die Stromstärke wird in Stufen von 0,5 A bis 2 A erhöht, und bei jeder Stromstärke werden die Spannungsstöße beim Ein- und Ausschalten in Skalenteilen abgelesen. Dann werden die Holzkerne gegen Weicheisenkerne ausgetauscht. Am ballistischen Spannungsmesser wird der Meßbereich 10 V eingesetzt. Die Stromstärke wird bis 0,5 A in Stufen von 0,1 A vergrößert, dann wie bei den Holzkernen weiter um je 0,5 A. Die Anzahl der abgelesenen Skalenteile wird wegen des größeren Meßbereiches mit 100 multipliziert.

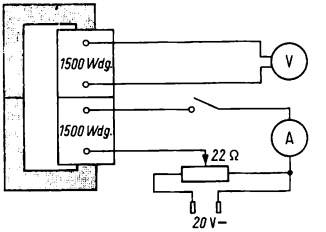


Abb. 1.4.10./1
Schaltung zur Bestimmung der relativen Permeabilität

Es ergibt sich etwa folgende Tabelle, in der die Werte für die Spannungsstöße bei Holzkern für 0,1 A ... 0,4 A durch Extrapolation ergänzt sind, weil zu erkennen ist, daß die Spannungsstöße proportional zur Stromstärke wachsen.

	Holzkerne	Eisenkerne	
I in A	$U_0 \cdot \Delta t$ in Skt.	$U_1 \cdot \Delta t$ in Skt.	$\frac{U_1 \cdot \Delta t}{U_0 \cdot \Delta t}$
0,1	0,4	200	500
0,2	0,8	500	625
0,3	1,2	900	750
0,4	1,6	1100	690
0,5	2,0	1250	625
1,0	4,0	1300	325
1,5	6,0	1350	240
2,0	8,0	1400	175

Die berechneten Quotienten $\frac{U_1 \cdot \Delta t}{U_0 \cdot \Delta t}$ zeigen das Verhalten der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Stromstärke, die hier auch als Maß für die Feldstärke betrachtet werden kann. Sie ändert sich mit der magnetischen Sättigung des Eisens. Allerdings muß beachtet werden, daß bei Benutzung der Holzkerne ein erhebliches Streufeld auftritt und so die berechneten Werte von der wirklichen Permeabilität stark abweichen.

Bemerkungen

1. Um zu zeigen, daß die Verhältnisse sich durch die Holzkerne gegenüber dem von stofflicher Materie freien Raum hier nicht meßbar ändern, kann man die beiden Spulen auch einfach aufeinander stellen.
2. Durch Einsetzen von Volleisenkernen oder Hufeisenmagneten ist zu zeigen, daß verschiedene Eisensorten unterschiedliche relative Permeabilitäten haben.

1.4.11. Schirmwirkung des Eisens

Zu Variante a

1. 2 Stabmagnete
2. Eisenring mit weiter Öffnung, z. B. Unterlegscheibe
3. weißer Karton oder Glasscheibe
4. Eisenfeilspäne

Zu Variante b

5. Stromversorgungsgerät
6. Spule (125/250 Wdg.)
7. Spule (750/1500 Wdg.)
8. I-Kern
9. Eisenblechdose zur Aufnahme einer Spule
10. Glühlampe (1,8 V; 2,0 A)

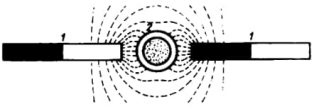


Abb. 1.4.11./1 Feldlinienbild zur magnetischen Schirmwirkung

Methodischer Hinweis

Es soll die Bedeutung der großen Permeabilität ferromagnetischer Stoffe zur Erzeugung feldfreier Räume gezeigt werden.

Variante a: Nachweis der Schirmwirkung eines Eisenringes mit Hilfe magnetischer Feldlinien

Die Stabmagnete und der Eisenring werden so hingelegt, daß die Ringoberkante und die Oberkanten der Stabmagnete in einer Ebene liegen (Abb. 1.4.11./1). Auf das Ganze legt man ein weißes Kartonblatt oder eine Glasscheibe.
Man streut Eisenfeilspäne auf das Kartonblatt und klopft leicht auf dieses. Die Späne ordnen sich in Richtung der Feldlinien. Im Innern des Eisenringes bleiben die Feilspäne ungeordnet.

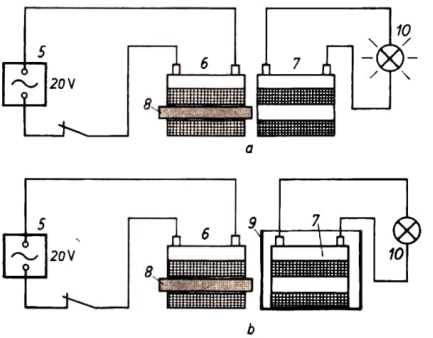


Abb. 1.4.11./2 Abschirmung einer Induktionsspule durch eine Blechdose

Variante b: *Nachweis der Schirmwirkung einer Eisenblechdose mittels einer Induktionsspule*

Als Induktionsspule verwendet man eine Spule mit 750 Wdg. und verbindet sie mit einer Glühlampe für 1,8 V (Abb. 1.4.11./2). Außerdem stellt man eine Blechdose bereit, in die man die Induktionsspule versenken kann und die noch 2 cm höher ist als die Induktionsspule. Als Feldspule dient eine Spule mit 250 Wdg., die man über einen Schalter an eine Wechselspannung von 20 V anschließt. Beide Spulen werden dicht hintereinander in gleicher Richtung auf den Tisch gelegt. Schließt man den Stromkreis, so leuchtet die Glühlampe hell auf. Die Anordnung wirkt wie ein Transformator mit offenem Eisenkern.
Senkt man dagegen die Induktionsspule in die Blechdose und schaltet den Strom wieder ein, so bleibt die Glühlampe trotz gleicher Anordnung der Spulen dunkel. Die Dose schirmt das Magnetfeld ab.

2. Die elektromagnetische Induktion

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.0. Nahezu alle Versuche in diesem Stoffgebiet sind mit den Teilen des Aufbaugerätesatzes oder des Schülerexperimentiergerätes für die Elektrizitätslehre durchzuführen. Zur Herleitung des Induktionsgesetzes ist ein spezielles Gerät entwickelt worden, dessen Einsatzmöglichkeiten in V 2.1.4. und V 1.2.5. beschrieben werden. Dieses Gerät — mit einem festen Grundaufbau aus 2 Helmholtzspulen und einer allseitig beweglichen Spulenhalterung sowie auswechselbaren Spulen — gestattet es, alle Versuche mit kurzen Vorbereitungszeiten sicher auszuführen. Bei der Einführung in die Induktionsvorgänge ist es aber sicher sinnvoll, nicht sofort mit diesem Gerät zu arbeiten, damit für die Schüler der Eindruck vermieden wird, die Induktionsvorgänge könnten an bestimmte Apparaturen gebunden sein. Für den Nachweis von Induktionsspannungen in geraden Leitern oder einfachen Leiterschleifen sind Demonstrationsmeßgeräte mit einem vorgeschalteten Gleichstrommeßverstärker zu empfehlen. An Stelle eines Meßgerätes kann man für Nachweis und Messung von Induktionsspannungen auch sehr gut einen Katodenstrahloszillografen mit Verstärker benutzen, indem man bei ausgeschalteter Kippfrequenz die y-Auslenkung beobachtet.

2.0.1. Die elektromagnetische Induktion ist einer der bedeutungsvollsten Vorgänge aus dem Gebiet der Elektrizitätslehre. Sie ist nicht nur die Grundlage für die Wirkungsweise der elektrischen Maschinen, der Generatoren und der Motoren. Auch die Gesetze des Wechselstromkreises sowie die Erzeugung und Ausbreitung elektrischer Schwingungen und Wellen stehen in enger Beziehung zur elektromagnetischen Induktion. So ist es im Physikunterricht besonders wichtig, mit der Einführung in dieses Stoffgebiet klare Erkenntnisse und sichere Kenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten der elektromagnetischen Induktion zu vermitteln.
Zum Veranschaulichen des *magnetischen Feldes* bedient man sich der Modellvorstellung der magnetischen Feldlinien. In älteren Physikbüchern ist als Ursache für das Auftreten von Induktionsspannungen das Schneiden der Feldlinien durch einen Leiter angegeben. Diese Vorstellung ist aber nur dann brauchbar, wenn man die relative Bewegung zwischen einem Leiter und einem konstanten Magnetfeld betrachtet. Sollen dagegen Induktionsvorgänge in einer Spule im veränderlichen Magnetfeld eines Elektromagneten untersucht werden, so müßte man das Feldlinienmodell durch bewegliche und sich erweiternde Feldlinien ergänzen. Dies ist aber methodisch ungeschickt.
Es ist besser, die elektromagnetische Induktion in jedem Fall auf die Magnetflußänderung zurückzuführen. Da in der zehnklassigen allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule der Begriff des Magnetflusses nicht eingeführt wird, muß man sich behelfen und von Änderung der Stärke des von den Windungen einer Spule umschlossenen Magnetfeldes sprechen.

Die Versuche sind in diesem Abschnitt in einer Reihenfolge geordnet, in der man sie im Unterricht einsetzen kann. Es werden zunächst einige Varianten gegeben, die der Einführung in die Induktionsvorgänge dienen (V 2.1.1.). Nach den Möglichkeiten zur Erzeugung von Induktionsspannungen in Spulen (V 2.1.2. und V 2.1.4.) folgen Versuche, die teils quantitative, teils qualitative Aussagen über die Abhängigkeit der Induktionsspannung liefern (V 2.1.5. bis V 2.1.7.). Dabei genügt es im Schulunterricht, die Spannungsstöße untereinander, gemessen in Skalenteilen, zu vergleichen, weil eine wirkliche Messung die etwas aufwendige Eichung der Meßgeräte für Spannungsstöße in Vs erfordern würde. Die beiden letzten Versuche beschäftigen sich mit der Polarität der Induktionsspannung, die durch das Lenzsche Gesetz gegeben ist.

2.0.2. Der Abschnitt 2.2. handelt vom Transformator. Dieser ist für die Wechselstromtechnik unentbehrlich. Man führt ihn methodisch am günstigsten ein, indem man an V 2.1.3. anknüpft. Man zeigt die Induktionsspannungen in einer Spule in einem magnetischen Wechselfeld mit geringer Frequenz (vgl. V 2.2.1.). Für das Erzeugen von Wechselströmen mit geringer Frequenz werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben. Zur Einführung kann auch V 2.2.2. dienen; der Versuch gibt außerdem Aufschluß über den Einfluß der Art der Annäherung der sekundären an die primäre Spule und über die Abhängigkeit der Induktionswirkung von der gegenseitigen Lage der Spulen zueinander. In den Versuchen V 2.2.3. bis V 2.2.6. werden die Gesetze des Transformators abgeleitet, und zwar erfolgt die Ableitung in V 2.2.3. und 2.2.4. qualitativ, während sie in V 2.2.5. und 2.2.6. quantitativ vorgenommen wird. Es ist dabei zu beachten, daß der Wirkungsgrad der aus Aufbauteilen zusammengesetzten Transformatoren sehr schlecht ist. Am unbelasteten Transformator und am kurzgeschlossenen Transformator erreicht man für das Spannungsverhältnis bzw. das Stromstärkeverhältnis nahezu die Werte des idealen Transformators (V 2.2.5.). Am belasteten Transformator ist die Abhängigkeit dieser Verhältnisse von der Belastung infolge der verschiedenartigen „Verluste" zu untersuchen (V 2.2.6.). Es ist zweckmäßig, die „Energieverluste" am Transformator frühzeitig in die unterrichtliche Behandlung einzubeziehen und die Versuche V 2.2.7. und V 2.2.8. mit den vorangehenden zu verbinden. Dabei ist zu beachten, daß der Wirkungsgrad eines Transformators exakt durch das Verhältnis der Wirkleistungen auszudrücken ist, die mit Leistungsmessern zu messen sind. Die Produkte der Effektivwerte von Spannung und Stromstärke ergeben die Scheinleistungen. Ihr Verhältnis ist nur näherungsweise gleich dem Wirkungsgrad. Auf eine exakte Betrachtung dieser Zusammenhänge kann man im Unterricht erst im Zusammenhang mit der induktiven Phasenverschiebung eingehen. Versuche dazu bringen die Abschnitte 4.2. bis 4.4. Eine besondere Abart des Transformators, der Spartransformator, wird in V 2.2.9. behandelt. Mittels zweier Mehrfachspulen zu 750/1500 Wdg. läßt er sich ohne Schwierigkeiten aufbauen. Interessant ist es, daß der Spartransformator zum Herunterspannen weitgehend einem Spannungsteiler gleicht und im Prinzip ebenso arbeitet wie dieser. Man könnte also geneigt sein, zwischen beiden eine Parallele zu ziehen, doch muß man bedenken, daß das Hinaufspannen am Spartransformator im Spannungsteiler keine Parallele hat, da sich durch einen Spannungsteiler Spannungen nicht heraufsetzen lassen.
In den Versuchen V 2.2.10. bis V 2.2.14. werden verschiedene technische Anwendungen behandelt, die für die polytechnische Bildung wertvoll sind. Eine besondere Bedeutung kommt V 2.2.10. zu, der mit einfachen Mitteln das Modell einer Fernleitung wiedergibt und so das Verständnis für eine der wichtigsten Fragen der

elektrischen Energieübertragung vermittelt. Der Versuch ist ohne jede Schwierigkeit durchführbar, ebenso aber auch V 2.2.11. und V 2.2.12. über das Punktschweißen und den Induktionsofen, wofür die erforderlichen Aufbauteile zur Verfügung stehen. Je ein Versuch über den Meßwandler (V 2.2.13.), über die Zündanlage eines Kraftwagens (V 2.2.14.) und über das elektrische Weidezaungerät (V 2.2.15.) vervollständigen die Reihe der technischen Anwendungen des Transformators.

2.0.3. Der Abschnitt 2.3. ist der Selbstinduktion gewidmet. Der Versuch 2.3.1. kann der Einführung der Erscheinung dienen. Es ergibt sich daraus die Frage, wie es zu einer höheren Spannung kommen kann, als die Spannungsquelle sie liefert. Im einzelnen sind die Vorgänge der Selbstinduktion an den folgenden Versuchen zu untersuchen. Die eindruckvollsten Versuche sind V 2.3.2 und V 2.3.3., bei denen eine Glimmlampe und zwei Kleinspannungsglühlampen zum Feststellen der auftretenden Selbstinduktion benutzt werden. Mit ihrer Hilfe kann man insbesondere die Frage der Polarität der Selbstinduktionsspannung klären und so das Lenzsche Gesetz bestätigen.
V 2.3.4. bis V 2.3.6. wenden sich wieder technischen Vorgängen zu und untersuchen das Abreißen eines Lichtbogens, den Bau eines Funkeninduktors und das Zünden einer Leuchtstoffröhre durch Selbstinduktion.

2.0.4. Die Wirbelströme, die im Abschnitt 2.4. behandelt werden, beruhen ebenfalls auf der elektromagnetischen Induktion. Einerseits sind sie technisch nutzbar, andererseits treten sie störend in Erscheinung, und man bemüht sich, sie möglichst zu unterbinden. Der Versuch mit dem Waltenhofenschen Pendel, V 2.4.1., eignet sich am besten dazu, das Auftreten der Wirbelströme bzw. ihre Unterdrückung zu erläutern. Die folgenden Versuche tragen dieser Tatsache Rechnung und zeigen modellmäßig Beispiele aus der Technik dafür.

2.1. Die Gesetze der elektromagnetischen Induktion

2.1.1. Induktionsspannung in einer beweglichen Leiterschleife

1. Hufeisenmagnet
2. Spannungsmesser (100 mV —) Spiegelgalvanometer, oder Spannungsmesser mit Meßverstärker

Zu Variante a

Geräte 1. und 2., außerdem
3. Klemmenstange
4. schaukelförmiger Leiter
5. Widerstand (1 MΩ)
6. Akkumulatorzelle

Zu Variante b

Geräte 1. bis 3., außerdem
7. rechteckige Leiterschleife aus Cu- oder Al-Draht (⌀ 2 mm ... 3 mm)

Zu Variante c

Geräte 1. und 2., außerdem
8. 2 Fußklemmen
9. 3 Stricknadeln

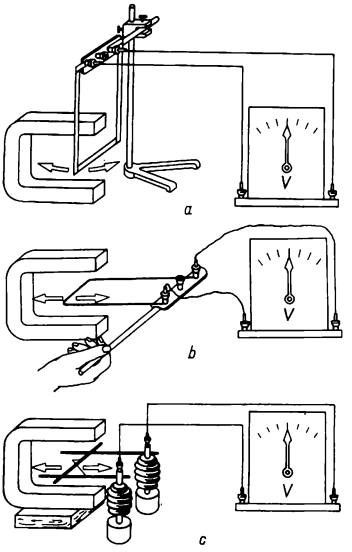


Abb. 2.1.1./1
Erzeugung einer Induktionsspannung in einer bewegten Leiterschleife:
a) Schaukelförmiger Leiter,
b) Drahtschleife,
c) rollende Stricknadel

Methodische Hinweise

1. Mit diesen Versuchen ist das Grundprinzip des Entstehens einer Induktionsspannung zu erklären.
2. Alle Anordnungen nach Abbildung 2.1.1./1 lassen die Erklärung durch die Lorentzkraft auf die mechanisch bewegten Elektronen in einem Leiter zu.
3. Soll die Entstehung der Induktionsspannung einfach aus der Änderung des von einer Leiterschleife umschlossenen Magnetflusses erklärt werden, so sind die Anordnungen b und c zu bevorzugen.
4. Vergleiche MB 2.0.1.!

Versuche

Selbst bei schnellem Ändern des Magnetflusses zeigt ein Drehspulmeßgerät mit einem Meßbereich von 100 mV nur sehr kleine Ausschläge. Besser ist für die Anzeige der Spannungen ein Spiegelgalvanometer oder ein Spannungsmesser mit Meßverstärker geeignet.
Die Polarität des Magneten wird durch eine Kompaßnadel bestimmt. Die Richtung des Induktionsstromes ergibt sich beim Verwenden eines Spiegelgalvanometers durch Vergleich mit einem sehr schwachen Batteriestrom. Dabei ist ein großer Sicherheitswiderstand vorzuschalten (Abb. 2.1.1./2).

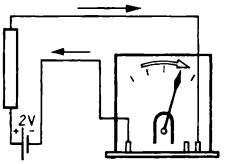


Abb. 2.1.1./2
Identifizierung der Stromrichtung durch Vergleich mit einem Batteriestrom

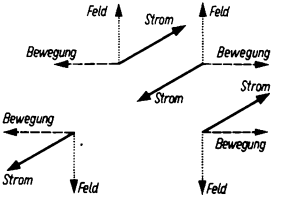


Abb. 2.1.1./3
Schematische Darstellung der möglichen Einzelfälle

Die vier Variationsmöglichkeiten, die durch Umdrehen des Magneten und durch Ändern der Bewegungsrichtung bedingt sind, zeigen die schematischen Darstellungen der Abbildung 2.1.1./3. Daraus ergibt sich als Rechte-Hand-Regel die UVW-Regel für Induktion. Mit den Varianten b und c kann auch das Lenzsche Gesetz entwickelt werden. Aus der Richtung des Induktionsstromes wird durch die Rechte-Faust-Regel die Richtung des Magnetfeldes des Induktionsstromes bestimmt. Bei einer Vergrößerung des umfaßten Magnetflusses ist es dem Feld des Hufeisenmagneten entgegengerichtet, bei einer Verringerung des Magnetflusses ist es gleichgerichtet.

2.1.2. Induktionsspannung in bewegten Spulen

1. Spulen (125/250, 500, 750/1500 Wdg.)
2. Spannungsmesser (1 V; 10 V; Nullpunktmittellage)
3. Stabmagnete
4. Hufeisenmagnet
5. kleiner Wagen

Methodische Hinweise

1. Nachdem mit V 2.1.1. das Prinzip der elektromagnetischen Induktion gezeigt ist, sollen diese Versuche zu den technischen Möglichkeiten der Erzeugung von Induktionsspannungen durch relative Bewegungen zwischen Spule und Magnet hinführen.
2. Durch die Ausführung der Versuche mit Spulen verschiedener Windungszahlen und mit einem, zwei und drei Stabmagneten bei verschiedenen Geschwindigkeiten ist es möglich, erste qualitative Erkenntnisse zum Induktionsgesetz zu vermitteln.

Vorbemerkungen

Die Induktionsspule bzw. der Magnet werden auf Unterlegklötze gelegt. Zur besseren Führung kann der bewegliche Teil, die Spule oder der Magnet, auf einen kleinen Wagen gelegt werden. Es ist auch möglich, die Spule bzw. den Magneten

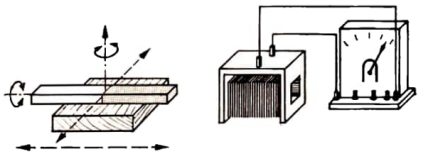


Abb. 2.1.2./1
Bewegung eines Magneten
bei feststehender Spule

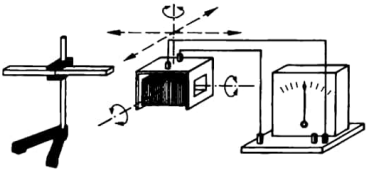


Abb. 2.1.2./2
Bewegung einer Spule
bei feststehendem Magneten

als ruhenden Teil an einem Stativ anzubringen und den beweglichen Teil in der Hand zu halten. Zum Erzeugen von Induktionsspannungen sind folgende Einzelversuche durchzuführen:

1. *Magnet wird bewegt — Spule ruht*
   Verschiebung des Magneten in Richtung der Längsachse der Spule,
   Verschiebung des Magneten senkrecht zur Längsachse der Spule,
   Drehung des Magneten um seine drei Hauptachsen
2. *Spule wird bewegt — Magnet ruht*
   Bewegungen der Spule entsprechen den Bewegungen des Magneten wie bei 1.

Versuche

Bei allen Versuchen sind die Induktionsspannungen in einem Meßbereich von 1 V oder 10 V zu messen (Abb. 2.1.2./1 und 2). Bei der Drehung der Spule bzw. des Magneten um die Längsachse treten durch die Freihandausführung auch kleinere Induktionsspannungen auf, da eine genau zentrierte Bewegung nicht zu realisieren ist. Der Vergleich der Versuche unter 1. und 2. zeigt, daß es zum Erzeugen von Induktionsspannungen nur auf die Relativbewegung zwischen der Spule und dem Magneten ankommt. In jedem Teilversuch wird die Abhängigkeit der Polarität der

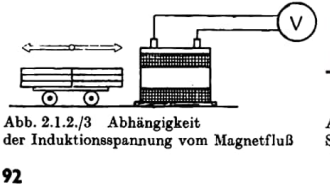


Abb. 2.1.2./3 Abhängigkeit
der Induktionsspannung vom Magnetfluß

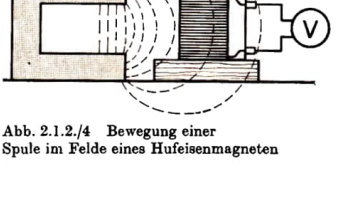


Abb. 2.1.2./4 Bewegung einer
Spule im Felde eines Hufeisenmagneten

Induktionsspannung von der Bewegungsrichtung und von der Polarität des Magnetfeldes untersucht. Es sind auch vorbereitende qualitative Untersuchungen über die Abhängigkeit des Betrages der Induktionsspannungen auszuführen. Der Betrag der Magnetflußänderung wird durch Ändern des Weges der Bewegung oder durch verschiedene Anzahlen von Stabmagneten variiert (Abb. 2.1.2./3). Verschiedene Geschwindigkeiten der Bewegung führen zu verschiedenen Induktionsspannungen. Durch Auswechseln der Spulen wird die Abhängigkeit der Induktionsspannung von der Windungszahl nachgewiesen.

Bemerkungen

1. Die Versuche lassen sich auch im Feld eines Hufeisenmagneten ausführen. Dabei ist es günstig, eine Anordnung nach Abbildung 2.1.2./4 zu wählen, weil dadurch deutlich wird, wie sich der Magnetfluß, der die Spule durchsetzt, während des Versuches ändert.
2. Der Stabmagnet kann auch durch einen Elektromagneten mit einer Spule mit 500 Wdg. auf einem I-Eisenkern ersetzt werden. Die Spule ist an eine Gleichspannung von 5 V ... 10 V anzuschließen. Das Stromversorgungsgerät darf keinen pulsierenden Gleichstrom liefern. Es könnten in der Induktionsspule Wechselstromspannungen induziert werden, die das Meßgerät gefährden. Beim Ein- und Ausschalten des Elektromagneten ist die Induktionsspule vom Magneten entfernt zu halten.
3. Als qualitatives Nachweisinstrument eignet sich auch das Schülermeßgerät Polyzet, Meßbereich < 1 mA, umgeschaltet auf Polbestimmung. Der Zeiger ist durch die Justierschraube nach rechts zu verstellen.

2.1.3. Induktionsspannung im veränderlichen Feld eines Elektromagneten

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Gleitwiderstand (110 Ω)
3. Schalter
4. Spule (750/1500 Wdg.)
5. I-Eisenkern, geblättert
6. Spulen (125/250 Wdg., 500 Wdg., 750/1500 Wdg.)
7. Spannungsmesser (10 V, Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch demonstriert die Induktionsspannung bei mechanisch ruhender Spule und ruhendem Magneten durch die Änderung der Erregerstromstärke eines Elektromagneten. (Grundlagen für die Wirkungsweise des Transformators erklärt).

Versuch

Die Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 2.1.3./1. Mit Hilfe eines als Spannungsteiler geschalteten Gleitwiderstandes ist die Spannung und damit die Strom-

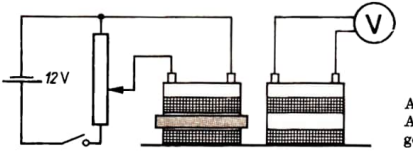


Abb. 2.1.3./1
Auftreten von Induktionsspannungen imFelde eines Elektromagneten

stärke im Elektromagneten zu verändern. Dadurch wird eine Magnetflußänderung hervorgerufen, durch die eine Induktionsspannung in der Induktionsspule entsteht. Folgende Ergebnisse sind festzustellen:

a) Die Induktionsspannung ist abhängig von der Magnetflußänderung (Änderung der Stromstärke) und von der Zeit, in der sie erfolgt.
b) Die Induktionsspannung ist abhängig von der Windungszahl der Spule.
c) Die Polarität der Induktionsspannung ist abhängig von der Polarität des Elektromagneten (Stromrichtung) und davon, ob der Magnetfluß (Stromstärke) vergrößert oder verkleinert wird.

Bemerkungen

1. Falls man nicht gerade die Induktionsspannungen beim Ein- oder Ausschalten zeigen will, muß beim Schalten der Spannungsteiler so eingestellt sein, daß am Elektromagneten keine Spannung liegt.
2. Siehe Bemerkung 3. zu V 2.1.2.!

2.1.4. Untersuchung der Bedingungen für Induktionsspannungen

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes
3. Strommesser (5 A)
4. Spannungsmesser (100 mA; Nullpunktmittellage)
5. Gleitwiderstand (11 Ω; 5 A)

Methodische Hinweise

1. Die folgenden Teilversuche entsprechen den Versuchen V 2.1.2. und V 2.1.3.
2. Es wird empfohlen, die Versuche mit dem Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes nicht zur Einführung, sondern zur Wiederholung und Festigung einzusetzen. Es können nur Bewegungen der Induktionsspule, nicht aber des Magnetfeldes ausgeführt werden.

Versuchsaufbau (Abb. 2.1.4./1)

Das Gerät wird nach dem Schaltplan in Abbildung 2.1.4./2 an das Stromversorgungsgerät angeschlossen. Um möglichst große Induktionsspannungen zu erhalten,

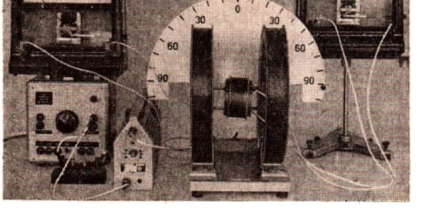


Abb. 2.1.4./1
Versuchsaufbau

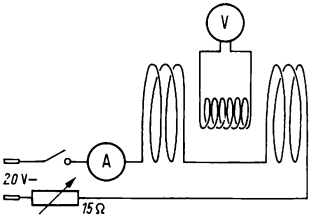


Abb. 2.1.4./2
Schaltplan des Gerätes zum Nachweis des Induktionsgesetzes

wird die Induktionsspule (600 Wdg.; 60 cm²) eingesetzt. Die Anschläge zur Begrenzung der Drehung der Spule werden auf 90° gestellt. Die Erregerspulen sind mit ihrer vollen Windungszahl (240 Wdg.) eingeschaltet. Mit dem Vorwiderstand wird die Stromstärke auf 5 A eingestellt.

Versuch 1: *Induktionsspannung durch Verschiebebewegung*

Die Induktionsspule wird innerhalb des nahezu homogenen Erregerfeldes auf- und abwärts geschwenkt. Es treten nur sehr kleine Induktionsspannungen infolge der geringen Inhomogenität des Feldes auf.
Die Induktionsspule wird aus dem Feld im Inneren der Erregerspule heraus und wieder hinein geschwenkt. Die Änderung des die Spule durchsetzenden Magnetfeldes führt zu größeren Induktionsspannungen.
Man löst die Klemmenschraube des Spulenträgers, so daß man die Spule in Richtung der Feldlinien hin und her schieben kann, es treten wieder nur sehr kleine Induktionsspannungen auf. Sie entstehen nur, weil man an der Spule bei dieser Bewegung doch immer etwas dreht und weil das Feld nicht ganz homogen ist.

Versuch 2: *Induktionsspannungen durch Drehbewegungen*

Die Induktionsspule wird in der Mitte des Feldes durch Drehung des Spulenträgers um ihre horizontale Querachse zwischen 0° und 90° oder von −90° und +90° gedreht. Die Änderungen des die Spule durchsetzenden Teils des Feldes ergeben Induktionsspannungen. Löst man die Spule vom Spulenträger und dreht sie um ihre Längsachse, so treten nur durch Verkantungen bei dieser freihändigen Bewegung sehr kleine Induktionsspannungen auf.

Versuch 3: *Induktionsspannungen durch Änderung der Erregerstromstärke*

Die Änderung der Erregerstromstärke kann erfolgen, indem man den Umschalter am Gerät betätigt, mit dem zusätzlichen Schalter ein- und ausschaltet oder den Vorwiderstand verändert.

2.1.5. Untersuchung der Abhängigkeit der Induktionsspannung mit dem Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes

Geräte wie bei V 2.1.4.

Methodische Hinweise

1. Zur Einführung in den Vorgang der elektromagnetischen Induktion geben die Teilversuche einen Überblick über die Abhängigkeit der Induktionsspannung von den äußeren Feldbedingungen (1, 2 und 4) und von der Spule (3 und 4). Die Feldgrößen werden dabei im Unterricht noch nicht benutzt, z. B. ersetzt man die Größe *Feldstärke* durch den Begriff *Stärke des Magnetfeldes*.
2. Nach der deduktiven Herleitung des Induktionsgesetzes in der Abiturstufe ist dieses durch die Teilversuche teils quantitativ zu bestätigen, teils qualitativ zu demonstrieren.
3. Man kann die Erregerspulen an eine Wechselspannung legen und erhält in den Induktionsspulen Induktionswechselspannungen, die man mit einem Spannungsmesser für Wechselspannungen messen kann. So ist man in den Teilversuchen 1, 2, 3 und 5 nicht auf die kurzzeitigen Zeigerausschläge durch den Spannungsstoß angewiesen und erhält einen Dauerausschlag des Gerätezeigers auf den Effektivwert der induzierten Wechselspannung. Dieses Verfahren kann aber nur bei Wiederholungen in Klasse 10 und in der Abiturstufe angewendet werden.

Versuchsaufbau

Die Schaltung erfolgt wie in V 2.1.4. (Abb. 2.1.4./1 und 2). Es werden in den einzelnen Teilversuchen aber unterschiedliche Windungszahlen der Induktions- und Erregerspulen benutzt.
Zur Erzeugung der Induktionsspannungen kann jede der in V 2.1.2. und V 2.1.3. beschriebenen Möglichkeiten benutzt werden. Es wird aus methodischen Gründen empfohlen, mit der Änderung der Erregerstromstärke durch Ein- und Ausschalten zu arbeiten, obgleich beim Umpolen des Feldes größere Spannungen entstehen.

Versuch 1: Abhängigkeit von der Feldstärke des Erregerfeldes

Es wird die Spule (600 Wdg.; 60 cm²) in der Mitte des Feldes mit Längsachse in Feldlinienrichtung eingesetzt. Die Feldstärke des Erregerfeldes kann durch Einstellen der Stromstärke oder bei gleicher Stromstärke durch Kurzschließen von Teilen der Erregerspulen verändert werden. Die Anzapfung der Erregerspulen teilt die 240 Windungen in 80 und 160 Windungen, so daß man mit diesen drei Windungszahlen arbeiten kann. Die beiden Teilversuche zeigen die Proportionalität zwischen dem Spannungsstoß ($U_i \cdot \Delta t$) und der Feldstärke.
Es ist umgekehrt möglich, mit diesem Versuch die Abhängigkeit der Feldstärke von Windungszahl und Stromstärke in den Erregerspulen nachzuweisen. Benutzt man nur eine Erregerspule mit 160 Wdg. an Stelle beider mit je 80 Wdg., so erhält man etwa den doppelten Induktionsspannungsstoß, weil die Länge der Erregerspule nur halb so groß ist. Durch die Inhomogenität des Feldes wird dieser Wert aber nicht voll erreicht, so daß die umgekehrte Proportionalität der Feldstärke zur Spulenlänge schlecht zu erkennen ist.

Versuch 2: Abhängigkeit von der Permeabilität

Die Induktionsspule (600 Wdg.; 20 cm²) setzt man mit einem Stahlrohr- oder Aluminiumrohrkern oder ohne Kern der gleichen Änderung des Erregerfeldes aus. Es ist die wesentlich vergrößerte Induktionsspannung infolge der hohen Permeabilität des Stahlkerns festzustellen.
Eine quantitative Bestimmung der Permeabilität ist dabei nicht möglich. Es ist aber zu erkennen, daß der Spannungsstoß von der Permeabilität und somit von der magnetischen Induktion $\left(B = \mu \frac{I \cdot N}{l}\right)$ abhängt.

Versuch 3: Abhängigkeit von der Fläche der Induktionsspule

Man läßt gleiche Änderung des Erregerfeldes auf die Spulen mit 600 Windungen und mit den Flächen 60 cm², 40 cm² und 20 cm² einwirken. Die Induktionsspannungsstöße sind den Flächen proportional. Aus der Zusammenfassung mit Versuch 1 und 2 ergibt sich: $U_i \cdot \Delta t \sim B \cdot A$,
$U_i \cdot \Delta t \sim \Delta \Phi$.

Versuch 4: Abhängigkeit von der Zeit

Man verwendet wieder die Spule (600 Wdg.; 60 cm²) und führt die gleiche Änderung des die Spule durchsetzenden Magnetflusses in verschiedenen Zeiten aus, (langsames und noch langsameres Drehen der Spule um den gleichen Winkel oder Heraus- und Hineinschwenken der Spule oder Verändern der Stromstärke am Gleitwiderstand). Da bei dieser Versuchsdurchführung mit geringeren Änderungsgeschwindigkeiten des Feldes gearbeitet wird, zeigt der Spannungsmesser nicht den Spannungsstoß, sondern eine mittlere Induktionsspannung. So kann man qualitativ die Proportionalität $U_i \sim \frac{l}{t}$ demonstrieren.

Versuch 5: Abhängigkeit von der Windungszahl

Die Spule mit der Fläche von 60 cm² kann mit 200 Wdg., 400 Wdg. oder 600 Wdg. auf den Spulenträger gesetzt werden. Bei gleicher Feldänderung stehen die Induktionsspannungsstöße im Verhältnis 1:2:3.

2.1.6. Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetflusses

1. Spule (125/250 Wdg.)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Spannungsmesser (30 mV —) oder Vielfachmeßgerät
4. Tischklemme
5. Stativstab (500 mm)
6. Stativstab (250 mm)
7. Röhrenhalter
8. 3 Kreuzmuffen
9. Stabmagnet
10. 2 Ringe mit Haken
11. in Spitzen gelagerte Rolle
12. 2 leichte Waagschalen
13. 5 Wägestücke (20 g)
14. Ausgleichwägestück
15. Drahthaken
16. dünne, feste Schnur (1500 mm)
17. Holzklötzchen (Höhe 30 mm)

Methodischer Hinweis

Es ist experimentell schwierig, eine Magnetflußänderung in linearer Abhängigkeit von der Zeit ablaufen zu lassen. Mit dieser Versuchsanordnung soll erreicht werden, den Magnetfluß wenigstens mit einer quantitativ erfaßbaren Geschwindigkeit zu ändern und Induktionsspannungen an verschiedenen Spulen bei exakt gleichen Änderungen des Magnetflusses zu untersuchen.

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist aus Abb. 2.1.6./1 zu ersehen. Die Magnetflußänderung wird durch das Absinken eines Stabmagneten hervorgerufen. An diesem ist durch eine Kreuzmuffe eine Schnur befestigt, die über eine leicht bewegliche Rolle führt und eine Waagschale mit einem Ausgleichswägestück trägt. Die Reibungskräfte der Rolle werden durch Drahthäkchen ausgeglichen, die man an die Kreuzmuffe hängt.
Unterhalb des Stabmagneten wird eine Spule mit 125 Wdg. so an dem Stativ befestigt, daß der Magnet ungehindert durch die Spulenöffnung absinken kann. Die Fallstrecke wird durch eine an dem Stativ hängende Halteschnur auf etwa 30 cm begrenzt. Durch das auf der oberen Spulenfläche liegende Holzklötzchen wird die Ausgangslage des Stabmagneten festgelegt. Von der Kreuzmuffe führt eine dritte Schnur nach unten durch die Spulenöffnung; sie trägt an ihrem Ende eine Waagschale. Ein darin liegendes Wägestück erteilt dem Magneten eine Beschleunigung. Die Länge der Schnur ist so bemessen, daß der lichte Zwischenraum zwischen der Spule und der Tischplatte genau so hoch ist wie das oben erwähnte Holzklötzchen, mithin gleich 30 mm.

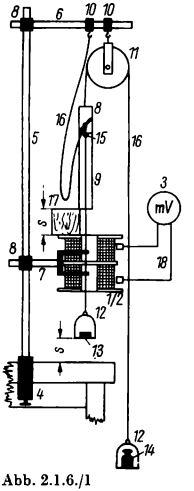


Abb. 2.1.6./1
Magnetstab
in Ausgangsstellung
vor dem Absinken

Versuch 1: Die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Sinkgeschwindigkeit des Stabmagneten

Man erzeugt die Zusatzkräfte durch Körper mit einer Masse von 20 g, 40 g, 60 g, 80 g und stößt den Stabmagneten seitlich an, so daß er beschleunigt zu Boden sinkt. Sobald der Magnet die Stirnfläche der Spule erreicht hat, sitzt die Waagschale auf. Der Magnet bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v weiter. Diese ergibt sich aus der Gleichung

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}\,. \tag{1}$$

Die Beschleunigung a erhält man als Quotienten der Kraft F und der bewegten Masse m:

$$a = \frac{F}{m}\,. \tag{2}$$

Aus (1) und (2) folgt

$$= v \sqrt{2 \cdot \frac{F}{m} \cdot s}\,.$$

Die Masse aller bewegten Körper, bestehend aus dem Stabmagneten, der Kreuzmuffe, den beiden Waagschalen, der Rolle, den Drahthäkchen, beträgt beispielsweise 0,960 kg.
Man mißt die in der Spule induzierte Spannung und trägt die Meßwerte in eine Tabelle nach beigefügtem Muster ein. Dabei ist ein Meßgerät von geringer Schwingungsdauer zu verwenden. Man erkennt mit hinreichender Deutlichkeit, daß die Spannung der Sinkgeschwindigkeit proportional ist:

$$U \sim v .$$

Beispiel für eine Meßreihe über die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Sinkgeschwindigkeit

$s = 30$ mm, Gesamtmasse $m = 960$ g

Zusatzmassen m in g (gemessen)	Kraft F in N (berechnet)	Sinkgeschwindigkeit v in $m \cdot s^{-1}$ (berechnet)	Spannung U in mV (gemessen)	$\frac{U}{v}$ in $\frac{mV}{m \cdot s^{-1}}$
20	0,196	0,11	3,5	31,8
40	0,392	0,16	5,0	31,3
60	0,589	0,19	6,0	31,6
80	0,785	0,22	7,0	31,8

Versuch 2: Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Windungszahl der Spule

Man führt diesen Versuch mit konstanter Zusatzmasse ($m = 20$ g) an Spulen mit 125 Wdg., 250 Wdg., 500 Wdg. durch und mißt jedesmal die Spannung. Trägt man sie in eine Tabelle nach beigefügtem Muster ein, so erkennt man wieder mit genügender Deutlichkeit, daß die induzierte Spannung der Windungszahl proportional ist:

$$U \sim N .$$

Beispiel für eine Meßreihe über die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Windungszahl

$F \approx 0{,}2$ N

Windungszahl N	Spannung U in mV	$\frac{U}{N}$ in mV
125	3,5	0,028
250	7,0	0,028
500	13,0	0,027

Hinführung zum Induktionsgesetz

Die Magnetflußänderung $\Delta\Phi$ wird dadurch verursacht, daß der Stabmagnet mit konstanter Geschwindigkeit durch die Spule gleitet. Die Geschwindigkeit der

Magnetflußänderung $\Delta\Phi/\Delta t$ ist demnach der Geschwindigkeit des Magneten proportional:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \sim v.$$

Da sich die induzierte Spannung ebenfalls der Geschwindigkeit des Magneten als proportional erwiesen hat, kann man folgern, daß sie auch der Geschwindigkeit der Magnetflußänderung proportional sei. Es gilt mithin

$$U \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

und für eine Spule mit der Windungszahl N

$$U \sim N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} .$$

Unter Berücksichtigung des Lenzschen Gesetzes ergibt sich als Induktionsgesetz die Gleichung

$$U = - N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} .$$

2.1.7. Abhängigkeit des induzierten Spannungsstoßes von Feldstärke, Fläche und Windungszahl

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Strommesser (10 A)
4. Spannungsmesser (100 mV ... 200 mV — ballistisch) oder Spiegelgalvanometer
5. Gleitwiderstand (110 Ω)
6. Induktionsspulensatz Ⓢ
7. Morsetaste oder Schalter

Methodische Hinweise

1. Bei der Einführung der elektromagnetischen Induktion sind die Teilversuche nur quantitativ auszuwerten.
2. Der Teilversuch 1 kann auch so aufgefaßt werden, daß er das Ergebnis liefert $U \cdot \Delta t \sim B$.

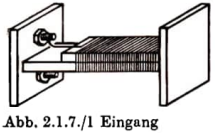


Abb. 2.1.7./1 Eingang

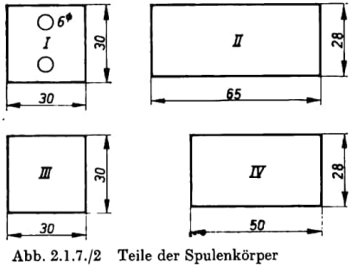


Abb. 2.1.7./2 Teile der Spulenkörper

Anleitung zum Selbstbau von Induktionsspulen

Materialbedarf: Hartfaserplatte (3 mm ... 4 mm dick), Alleskleber, 10 Telefonbuchsen, Kupfer-Lackdraht (∅ 0,2 mm).
Aus Hartfaserplatten sind die Teile der Abbildung 2.1.7./2 in der angegebenen Stückzahl auszusägen. Teil I erhält zwei Bohrungen (∅ 6 mm) für die Telefonbuchsen. Die Spulenkörper werden mit Alleskleber aus den Teilen I, II, III nach Abb. 2.1.7./1 zusammengeklebt. Für die verschiedenen Querschnittsflächen der Spulen wird eine wachsende Anzahl des Teiles IV aufgeklebt. Auf die Spulenkörper wird eine Wicklung von Kupfer-Lackdraht aufgebracht und mit Isolierband befestigt. Die Enden werden an die Telefonbuchsen gelötet. Folgende Spulen sind zu fertigen:

Spulennummer	1.	2.	3.	4.	5.
Plattenanzahl im Spulenkörper	2	4	6	6	6
Windungszahl	200	200	200	100	300

Versuch 1: Abhängigkeit von der Feldstärke

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.7./3. Als Induktionsspule wird die Spule Nr. 5 in die Kastenspule eingeschoben. Beim Schließen und Öffnen des Stromkreises durch die Morsetaste zeigt der Spannungsmesser Spannungsstöße ($U \cdot \Delta t$) an. Sie werden in Skalenteilen (Skt) gemessen und betragen 1 Skt ... 5 Skt. Man beobachtet beim Ein- und Ausschalten die Stromstärkeänderung ΔI.
Durch Änderung des Widerstandes sind verschiedene Stromstärkeänderungen einzustellen. Die Meßwerte sind in eine Tabelle aufzunehmen. Die Feldstärkeänderung ΔH ist proportional der Stromstärkeänderung ΔI. Es zeigt sich, daß der Quotient $\frac{U \cdot \Delta t}{I}$ und somit auch $\frac{U \cdot \Delta t}{H}$ nahezu konstant ist. Folglich ergibt sich

$$U \cdot \Delta t \sim \Delta H .$$

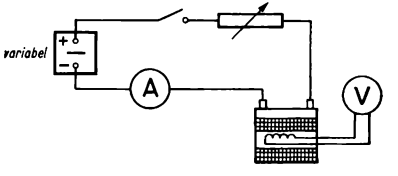


Abb. 2.1.7./3
Untersuchung der Abhängigkeit der induzierten Spannung

Versuch 2: Abhängigkeit von der Querschnittsfläche der Induktionsspule

Es wird eine Versuchsreihe mit gleicher Stromstärkeänderung ΔI unter Verwendung von Spulen mit verschiedenen Querschnitten (Nr. 1, 2 und 3) durchgeführt. Die Spannungsstöße verhalten sich nahezu wie die Querschnitte.

$$U \cdot \Delta t \sim A .$$

Unter Einführung der Permeabilität als Proportionalitätsfaktor ergibt sich:

$$U \cdot \Delta t \sim \mu \cdot \Delta H \cdot A .$$

$$U \cdot \Delta t \sim \Delta B \cdot A .$$

Versuch 3: Abhängigkeit des Spannungsstoßes von der Windungszahl der Induktionsspule

Es wird eine Versuchsreihe mit Spulen gleicher Fläche und unterschiedlicher Windungszahl bei gleicher Stromstärkeänderung durchgeführt. Die Versuchsreihe zeigt, daß sich die Spannungsstöße wie die Windungszahlen verhalten.

$$U \cdot \Delta t \sim N .$$

Unter Berücksichtigung des Lenzschen Gesetzes ergibt sich das Induktionsgesetz für eine Spule

$$U \cdot \Delta t = - N \cdot \Delta B \cdot A .$$

Bemerkung

Die Versuche 1 und 2 kann man auch durchführen, indem man Spulen des Aufbausatzes in Verlängerung der Erregerspule aufstellt.

2.1.8. Nachweis der Lenzschen Regel

1. Leichter Aluminiumring (∅ etwa 50 mm)
2. Stabmagnet
3. Stromversorgungsgerät (8 V —)
4. Spule (500 Wdg.)
5. I-Kern, geblättert

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind zwar experimentell leicht ausführbar, erfordern aber eine gründliche theoretische Auswertung.
2. Der Induktionsstrom wirkt seiner Ursache, der mechanischen Bewegung, entgegen, indem der Ring der Bewegung des Magneten folgt.
3. Der Induktionsstrom wirkt seiner Ursache, der Änderung des von ihm umschlossenen Magnetflusses, entgegen, indem bei Verringerung (Herausziehen) ein gleich gerichtetes und bei Vergrößerung (Hineinschieben) ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld des Induktionsstromes entsteht.
4. Es entspricht dem Satz von der Erhaltung der Energie, daß bei der Bewegung des Magneten Kräfte zur Mitbewegung des Ringes auftreten, indem die mechanische Energie in elektrische umgewandelt wird.

Versuche

Ein leichter Aluminiumring wird bifilar an ein Stativ gehängt. Man stößt einen Stabmagneten waagerecht durch die Öffnung des Ringes und zieht ihn wieder heraus. Der Ring folgt ein wenig den Bewegungen (Abb. 2.1.8./1).
Man bringt den Ring in einem Abstand von etwa 5 cm vor den Kern eines Elektromagneten (Abb. 2.1.8./2). Er wird beim Einschalten des Stromes vom Magneten abgestoßen und beim Ausschalten angezogen. Beide Versuche zeigen, daß der Induktionsstrom bei der Zunahme des Magnetflusses ein Gegenfeld liefert. Bei der Verkleinerung des Kraftfeldes tritt ein dem Erregerfeld gleichgerichtetes Feld des Induktionsstromes auf. Auf Grund der Polarität des Erregermagneten sind die Richtungen der Induktionsströme im Ring mit Hilfe der Rechten-Faust-Regel zu bestimmen. Hält man den Daumen der rechten Hand in die Richtung des Feldes des Induktionsstromes, so zeigen die gekrümmten Finger die Richtung des Induktionsstromes an.

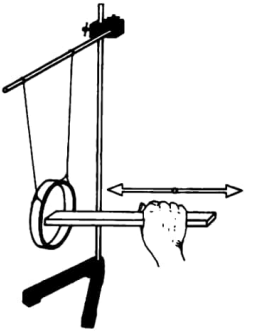


Abb. 2.1.8./1
Hineinstoßen eines Magnetstabes in einen Ring

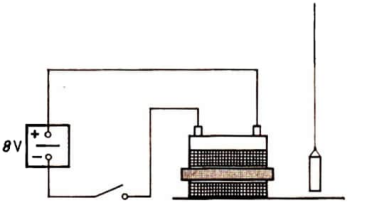


Abb. 2.1.8./2
Vor dem Elektromagneten schwebender Metallring. Das Stativ ist fortgelassen.

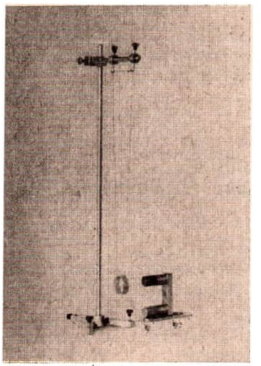


Abb. 2.1.8./3
Aufbau mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre

Bemerkungen

1. Im zweiten Versuch kann der Ring auch durch eine kurzgeschlossene Spule ersetzt werden.
2. Der Versuch kann auch mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre durchgeführt werden (Abb. 2.1.8./3).

2.1.9. Thomsonscher Ringversuch

1. Spule (750/1500 Wdg.)
2. 2 I-Kerne, geblättert
3. Ring aus Aluminiumblech (⌀ 50 mm)
4. Morsetaste
5. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist eine interessante Variante zu V 2.1.7. Man kann ihn sowohl zur Problemstellung vor diesem oder zur Festigung der Kenntnisse anschließend ausführen.

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung wird nach Abb. 2.1.9./1 aufgebaut und an eine Wechselspannung (220 V) angeschlossen. Beim Schließen der Kontakte der Morsetaste tritt in dem Ring ein Induktionsspannungsstoß auf. Der Ring wird durch die Wechselwirkung der Magnetfelder hochgeschleudert, da zwischen dem Induktionsstrom und dem primären Strom eine Phasenverschiebung von 90° auftritt.

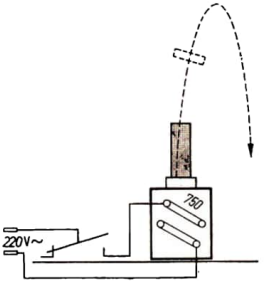


Abb. 2.1.9./1 Fortschleudern eines Ringes von einem Magneten

Bemerkung

Der Versuch läßt sich auch mit Gleichspannung ausführen. Das ist jedoch unzweckmäßig, da beim Verwenden eines Aluminiumringes ein so geringer Impuls eintritt, daß er den Ring nur um 1 mm ... 2 mm zu heben vermag.

2.2. Der Transformator

2.2.1. Wirkungsweise eines Transformators mit Wechselstrom geringer Frequenz

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Spannungsmesser (5 V —; Nullpunktmittellage)
3. U-Kern, geblättert
4. I-Kern, geblättert
5. Grundbrett mit Spannvorrichtung
6. 2 Gleitwiderstände (110 Ω oder 300 Ω)
7. 2 Spulen (500 Wdg.)

Zu Variante b

Geräte 1. bis 6., außerdem

8. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch knüpft an V 2.1.3. an und trägt wesentlich zum Verständnis der Wirkungsweise des Transformators bei.

Variante a

Man schaltet zwei Gleitwiderstände in einer Brückenschaltung zusammen (Abb. 2.2.1./1). Am Widerstand R_1 bleibt der Gleitkontakt in der Mittelstellung. Beim

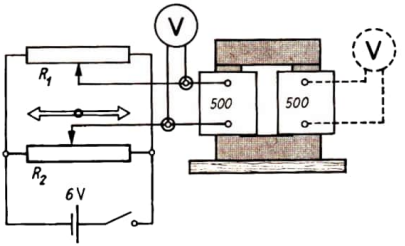


Abb. 2.2.1./1
Zwei Gleitwiderstände in Brückenschaltung

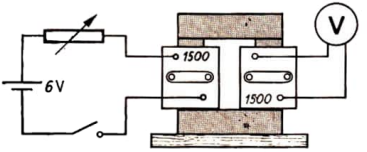


Abb. 2.2.1./2
Erzeugen einer Wechselspannung durch Ändern der Primärstromstärke

Hin- und Herschieben des Gleitkontaktes am Widerstand R_2 tritt am Spannungsmesser in der Brückenleitung eine Wechselspannung mit der Frequenz der Bewegung auf.
Diese Wechselspannung legt man an die Primärspule eines Transformators aus Aufbauteilen. Ein zweiter Spannungsmesser wird an die Sekundärspule angeschlossen. Er zeigt die induzierte Wechselspannung gleicher Frequenz.
Der Versuch veranschaulicht nicht nur im langsamen Ablauf die Wirkungsweise des Transformators, sondern läßt auch die Phasenverschiebung zwischen der Primär- und der Sekundärspannung erkennen.

Variante b

Der Versuch trägt der Tatsache Rechnung, daß auch ein veränderlicher Gleichstrom wie ein Wechselstrom transformierbar ist. Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abb. 2.2.1./2. Dazu verwendet man die Spulen mit 1500 Wdg. Wird durch Verändern des Gleitwiderstandes die Stromstärke im Primärstromkreis vergrößert oder verkleinert, so tritt in der Primärspule eine Magnetflußänderung auf. Der Magnetfluß durchsetzt auch die Sekundärspule. Für die Dauer der primärseitigen Magnetflußänderung wird in der Sekundärspule eine Spannung induziert und der Spannungsmesser zeigt einen entsprechenden Ausschlag. Durch das regelmäßige, periodische Ändern des Widerstandes von Hand im Primärstromkreis kann man im Sekundärstromkreis eine Wechselspannung gleicher Frequenz erzeugen.

Bemerkungen

1. Das Stromversorgungsgerät muß eine geglättete Gleichspannung liefern.
2. Eine andere Möglichkeit zum Erzeugen eines Wechselstromes geringer Frequenz aus Gleichstrom weist V 4.1.1. nach.

2.2.2. Induktionswirkung einer Primärspule auf eine Sekundärspule

1. Stromversorgungsgerät (4 V ~)
2. Gleitwiderstand (18 Ω)
3. Spule (750/1500 Wdg.)
4. Spule (500 Wdg.)
5. U-Kern, geblättert
6. U-Kern, voll
7. I-Kern, geblättert
8. 2 Spannungsmesser (10 V ~ oder 50 V ~)

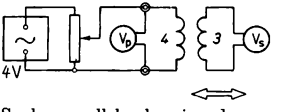
Methodischer Hinweis

In einer Reihe von Versuchen sollen die Schüler erkennen, wie eine systematische Anwendung physikalischer Gesetze zur technischen Entwicklung eines Gerätes führt.

Versuch

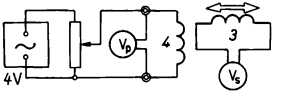
An die Primärspule mit 500 Wdg. legt man eine Wechselspannung. Zum Konstanthalten der Spannung während des Versuches greift man die Spannung mit Hilfe eines Potentiometers am Stromversorgungsgerät ab und stellt die Spannung auf 4 V ein. Parallel zur Primärspule legt man einen Spannungsmesser.

a) Nähert man der stromdurchflossenen Primärspule von der Seite her eine zweite Spule mit 1500 Windungen, an die ein Spannungsmesser zur Bestimmung der induzierten Spannung angeschlossen ist, so zeigt der Spannungsmesser eine Maximalspannung von etwa 0,2 V bei unmittelbarer Berührung der Spulen.



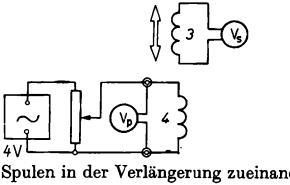
Spulen parallel nebeneinander

b) Stellt man die Sekundärspule so, daß ihre Achse senkrecht zur Primärspule steht, so wird in der Sekundärspule keine Spannung induziert. Der Magnetfluß verläuft parallel zu den Windungsflächen der Sekundärspule.



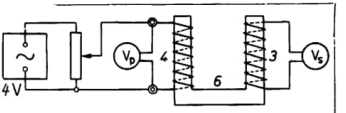
Spulen gekreuzt nebeneinander

c) Bringt man die eine Spule in die Verlängerung der anderen und nähert sie einander, so steigt die Spannung bei unmittelbarer Berührung der beiden Spulen bis auf 0,9 V.



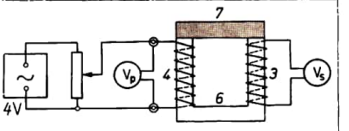
Spulen in der Verlängerung zueinander

d) Setzt man beide Spulen auf die Schenkel eines U-förmigen Vollkerns, so wird die Sekundärspannung wesentlich vergrößert.



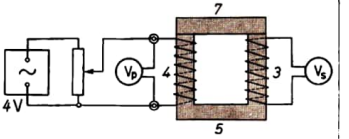
Spulen auf U-Vollkern ohne Joch

e) Legt man auf den U-Kern ein Joch, so steigt die Spannung in der Sekundärspule abermals.



Spulen auf U-Vollkern mit Joch

f) Wird der Vollkern durch einen geblätterten U-Kern ersetzt, so wird die Sekundärspannung wegen der Verringerung der Wirbelstromverluste weiter erhöht.



Spulen auf geblättertem U-Kern mit Joch

Abb. 2.2.2./1 Abhängigkeit
der Induktionsspannung von der Spulenlage, vom Spulenabstand und vom Kern

Vorstehend sind die wichtigsten Fälle der experimentellen Entwicklung eines Transformators in einer Tabelle zusammengefaßt.

Hochspannung

2.2.3. Das Umspannen von Wechselstrom — Hinauftransformieren

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (12 V ~)
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern, geblättert
4. I-Kern, geblättert
5. Spule (125/250 Wdg.)
6. Spule (750/1500 Wdg.)
7. Glimmlampe für 220 Volt
8. Schalter

Zu Variante b

Geräte 2., 3., 4., 6., 8., außerdem

9. Netzadapter
10. Spule (15000 Wdg.)
11. 2 Holtzsche Klemmen
12. 2 Kupferdrähte (150 mm lang, 1 mm dick) ⑧

Zu Variante c

Geräte 3., 6., 9., 10., außerdem
13. zweiter U-Kern, geblättert
14. zweite Spule (15000 Wdg.)
15. Geißlersche Röhre

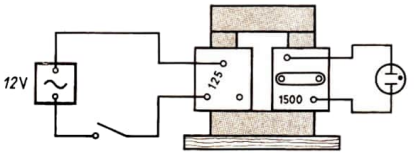


Abb. 2.2.3./1
Zünden einer Glimmlampe

Methodischer Hinweis

Die Versuche sind zum qualitativen Nachweis der Stromstärken- und Spannungsverhältnisse geeignet oder können nach der quantitativen Untersuchung als Anwendungsbeispiele demonstriert werden.

Variante a:
Zündung einer Glimmlampe

Die Versuchsanordnung ist der Abbildung 2.2.3./1 zu entnehmen. Legt man eine Wechselspannung von 10 V ... 12 V an die Primärspule und schließt die Glimmlampe an die Sekundärspule, so leuchtet die Glimmlampe. Bei unmittelbarem Anschluß an die Kleinspannungsquelle leuchtet sie nicht. Erst durch das Zwischenschalten des Transformators wird die Zündung erreicht.

Variante b:
Modell eines Hörnerblitzableiters

Man verwendet als Primärspule eine Spule mit 750 Wdg. und als Sekundärspule eine Spule mit 15000 Wdg. Die Schaltung wird nach Abbildung 2.2.3./2 vorgenommen. Dazu werden zwei Kupferdrähte der Abbildung entsprechend gebogen. Man legt die Spannung von 220 V an und zieht die sich berührenden Drähte langsam auseinander. Es entsteht zwischen ihnen ein Lichtbogen, der sich durch die mit der Erwärmung aufsteigenden Luft nach oben bewegt und dann abreißt. Die Füße der beiden Holtzschen Klemmen sind aus Sicherheitsgründen für den Experimentierenden wegen der hohen Sekundärspannung zu erden, damit gegebenenfalls Unfälle bei Isolierungsfehlern der Holtzschen Klemmen vermieden werden. Der Ver-

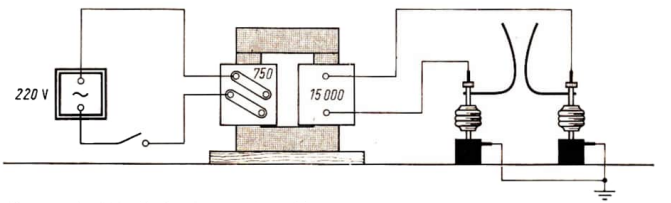


Abb. 2.2.3./2 Modell eines Hörnerblitzableiters

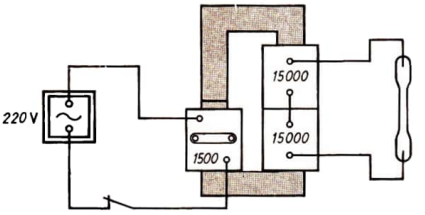


Abb. 2.2.3./3
Aufleuchten
einer Geißlerschen Röhre

such darf nicht zu lange dauern, da die Primärspule etwas überlastet ist, wenn durch die Sekundärspule längere Zeit ein Strom fließt.

Variante c: Leuchten einer Geißlerschen Röhre

Der Versuchsaufbau richtet sich nach Abbildung 2.2.3./3. Die Primärspule hat 1500 Windungen. Die Sekundärspule besteht aus zwei übereinandergelegten Spulenkörpern mit je 15000 Windungen, die zu 30000 Wdg. hintereinandergeschaltet sind. Die beiden U-Kerne werden mit den Schenkeln aufeinandergestellt. Wird an die Primärspule eine Spannung von 220 V gelegt, so wird die Zündspannung der Geißlerischen Röhre von einigen tausend Volt erreicht und die Röhre leuchtet auf.

Netzspannung

2.2.4. Das Umspannen von Wechselstrom — Heruntertransformieren

Zu Variante a

1. Grundbrett mit Spannvorrichtung
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Spule (750/1500 Wdg.)
5. Spule (125/250 Wdg.)
6. Glühlampe (14 V; 1 W)
7. Netzadapter

Zu Variante b

Geräte 1. bis 5., 7., außerdem
8. 2 Kohlestäbe

Zu Variante c

Geräte 1. bis 4., 7., außerdem
9. Spule (10 Wdg.)
10. Nagel (∅ 3 mm)
11. Asbestpappe

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.2.3.!

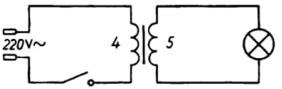


Abb. 2.2.4./1
Glühlampe an einem Transformator

Variante a: Betieb einer Kleinspannungsglühlampe

Der Versuch erfolgt nach Abbildung 2.2.4./1. Durch den Transformator (prim. 1500 Wdg., sek. 125 Wdg.) wird die Netzspannung so weit heruntertransformiert, daß eine 14-V-Glühlampe mit normaler Helligkeit leuchtet. Man darf die Glühlampe nicht unmittelbar an das Netz legen, da sonst die Lampe wegen der zu hohen Spannung sofort zerstört wird.

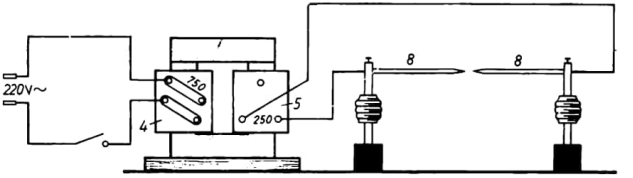


Abb. 2.2.4./2 Modell einer Kohlebogenlampe

Variante b: Betrieb einer Kohlebogenlampe

Der Versuchsaufbau richtet sich nach Abbildung 2.2.4./2. Berührt man während des Versuches die Spitzen der beiden Kohlestäbe miteinander und zieht sie langsam wieder auseinander, so entsteht zwischen den beiden Kohlespitzen ein grell leuchtender Lichtbogen. Den Lichtbogen kann man durch weiteres Auseinanderziehen der Kohlestäbe abreißen lassen oder durch einen kräftigen Luftstoß auspusten.
Damit die Schüler durch das grelle Licht nicht geblendet werden, bildet man den Versuch durch eine Sammellinse auf einem Bildschirm ab oder stellt eine größere Farbglasscheibe oder eine Glaswanne mit gefärbtem Wasser vor die Versuchsanordnung.

Variante c: Durchglühen eines Nagels

Die Sekundärspule mit 10 Wdg. wird durch einen mittelgroßen Nagel kurzgeschlossen, indem der Nagel unter die beiden Muttern der Spule geklemmt wird (Abb. 2.2.4./3). Legt man an die Primärspule mit 750 Wdg. eine Wechselspannung von 220 V, so glüht der Nagel nach kurzer Zeit hell auf.
Bei diesem Versuch ist darauf zu achten, daß der Nagel unter Umständen mit einem Funkenregen durchschmilzt. Aus diesem Grunde ist Vorsicht geboten.
Damit der Spulenkörper vor Schaden durch große Wärmeentwicklung bewahrt wird, stellt man zwischen den Spulenkörper und den Nagel ein Stückchen Asbestpappe.

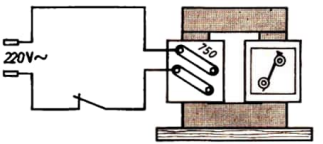


Abb. 2.2.4./3
Glühversuch mit einem Nagel

Bemerkung

Die Variante ist nur mit der älteren Spule 10 Wdg. möglich.

2.2.5. Ändern der Spannung und der Stromstärke durch einen Transformator [SE]

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (12 V ~)
2. Spannungsmesser (10 V oder 50 V ~)
3. Spannungsmesser (5 V ~)
4. Gleitwiderstand (18 Ω)
5. Grundbrett mit Spannvorrichtung
6. U-Kern mit I-Kern, geblättert
7. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
8. Spule (500 Wdg.)
9. Schalter

Zu Versuch 2

Geräte 1., 4. bis 9., außerdem
10. 2 Strommesser

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.2.3.!
2. Es ist zu beachten, daß in Versuch 1 die Messungen am unbelasteten und in Versuch 2 am kurzgeschlossenen Transformator erfolgen.
3. Vergleiche MH V 2.2.13.!

Versuch 1: Änderung der Spannung durch einen Transformator

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.2.5./1. Damit primärseitig für die Dauer des Versuches konstante Spannungswerte eingehalten werden, stellt man die Primärspannung mit Hilfe eines Potentiometers auf die gewünschte Spannung ein. Dazu greift man am Stromversorgungsgerät eine Wechselspannung von etwa 10 V ab. Als Sekundärspulen verwendet man nacheinander 125 Wdg., 250 Wdg. und 500 Wdg. und mißt die dazugehörige Sekundärspannung für die Primärspannungen von 1 V, 2 V, 3 V, 4 V und 5 V. Die gefundenen Werte werden in einer Tabelle zusammengestellt.
Die experimentelle Ableitung der Spannungsänderung ist in zwei Schritten zu vollziehen. Zunächst ist zu zeigen, daß das Übersetzungsverhältnis der Spannungen bei zwei bestimmten Spulen vom Absolutwert der Spannung unabhängig ist. Danach muß gezeigt werden, daß das Übersetzungsverhältnis der Spannungen bei konstanter Primärspannung nur vom Verhältnis der Windungszahlen abhängt.

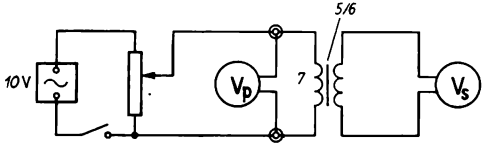


Abb. 2.2.5./1
Bestimmen der Spannungsänderung durch einen Transformator

Beispiele für Messungen der Spannung am Transformator

Windungszahlen der		Windungsverhältnis	Spannung an der		Spannungsverhältnis
Primärspule N_p	Sekundärspule N_s	$N_p : N_s$	Primärspule U_p in V	Sekundärspule U_s in V	$U_p : U_s$ (gerundet)
125	125	1 : 1	1	0,97 ≈ 1	1 : 1
125	125	1 : 1	3	2,8 ≈ 3	1 : 1
125	250	1 : 2	1	1,9 ≈ 2	1 : 2
125	250	1 : 2	5	10,0 ≈ 10	1 : 2
125	500	1 : 4	2	7,9 ≈ 8	1 : 4
125	500	1 : 4	4	16,0 ≈ 16	1 : 4

Aus der Tabelle folgt, daß das Verhältnis der Spannungen ungefähr gleich dem Verhältnis der Windungszahlen ist:

$$U_p : U_s = N_p : N_s .$$

Versuch 2: Änderung der Stromstärken bei einem Transformator

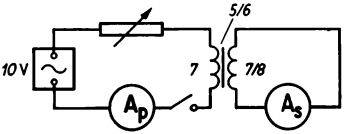


Abb. 2.2.5./2
Ändern der Stromstärke bei einem Transformator

Der Versuchsaufbau wird nach Abb. 2.2.5./2 vorgenommen. Der Primärschenkel und der Sekundärschenkel des U-Kerns tragen zunächst beide eine Spule mit 125 Wdg. Durch Ändern der Spannung am Stromversorgungsgerät und mit Hilfe eines Gleitwiderstandes stellt man die Stärke des Primärstromes auf 1 A, 2 A, 3 A ein und bestimmt die dazugehörigen Sekundärstromstärken. Danach wird die Sekundärspule durch eine Spule mit 250 Wdg., 500 Wdg. ersetzt. Der Versuch wird bei den gleichen Primärstromstärken für jede Spule wiederholt. Die Meßergebnisse werden in einer Tabelle zusammengestellt.

Beispiele für Messungen der Stromstärke am Transformator

Windungszahlen der		Windungsverhältnis	Stromstärke in der		Stromstärkeverhältnis
Primärspule N_p	Sekundärspule N_s	$N_p : N_s$	Primärspule I_p in A	Sekundärspule I_s in A	$I_p : I_s$ (gerundet)
125	125	1 : 1	2,0	1,86 ≈ 2	1 : 1
125	125	1 : 1	3,0	2,82 ≈ 3	1 : 1
125	250	1 : 2	1,0	0,45 ≈ 0,5	2 : 1
125	250	1 : 2	2,0	0,94 ≈ 1,0	2 : 1
125	500	1 : 4	1,0	0,23 ≈ 0,25	4 : 1
125	500	1 : 4	3,0	0,71 ≈ 0,75	4 : 1

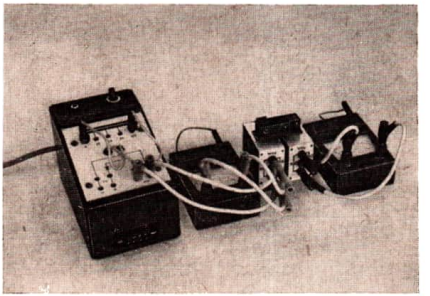


Abb. 2.2.5./3
Versuchsaufbau zu Versuch 1 mit dem SEG

Man ersieht aus der Tabelle, daß sich die Stromstärke mit großer Annäherung umgekehrt wie die Windungszahlen verhalten:

$$I_p : I_s = N_s : N_p .$$

In Abb. 2.2.5./3 wird die Aufbaumöglichkeit mit dem SEG Elektrik gezeigt.

2.2.6. Spannung und Stromstärke am belasteten Transformator [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V ~)
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern mit I-Kern, geblättert
4. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
5. Gleitwiderstand (110 Ω)
6. 2 Spannungsmesser (10 V ~)
7. 2 Strommesser (1 A ~)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch soll die Spannungs- und Stromstärkeverhältnisse am realen Transformator zeigen, die infolge der Widerstandsverluste, der magnetischen Verluste und der Phasenverschiebungen von den Verhältnissen am idealen Transformator mit der Belastung stark abweichen können.
2. Das Produkt aus Spannung und Stromstärke auf jeder Seite des Transformators ist die Scheinleistung. Der Wirkungsgrad ist nach V 2.2.7. zu ermitteln.

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 2.2.6./1. Die Belastung wird durch Einstellung des Gleitwiderstandes verändert. Die zugeordneten Werte der Spannungen und der Stromstärken werden in eine Tabelle eingetragen und die Verhältnisse $\frac{U_p}{U_s}$ und $\frac{I_s}{I_p}$ berechnet. Es ergeben sich mit wachsender Belastung größere Abweichungen für $\frac{U_p}{U_s}$ und kleinere Abweichungen von $\frac{I_s}{I_p}$ gegenüber dem Verhältnis der Windungszahlen $\frac{N_p}{N_s}$.

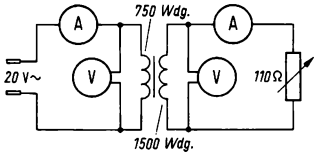


Abb. 2.2.6./1
Schaltplan zur Untersuchung des belasteten Transformator

Muster für den Kopf einer Tabelle

$\frac{N_p}{N_s}$	U_p in V	U_s in V	$\frac{U_p}{U_s}$	I_p in A	I_s in A	$\frac{I_p}{I_s}$

2.2.7. Der Wirkungsgrad eines Transformators

1. Stromversorgungsgerät (20 V ~)
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern mit I-Kern, geblättert
4. Leistungsmesser (20 V; 5 A)
5. Strommesser (2 A ~)
6. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
7. Gleitwiderstand (110 Ω)
8. Schalter

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.2.6.!
2. Der Wirkungsgrad ist eine wichtige Kenngröße für alle kraft- und energieumformenden Einrichtungen. Für die elektrische Energieversorgung ist der große Wirkungsgrad von Transformatoren besonders bedeutungsvoll. Ein Aufbaumodell kann diesen nicht erreichen.

Versuch

Man baut die Versuchsanordnung nach Abbildung 2.2.7./1 auf. Durch den Leistungsmesser wird zunächst die Primärleistung P_p und dann die Sekundärleistung P_s gemessen.

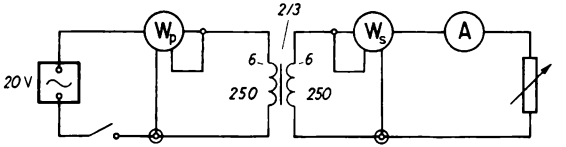


Abb. 2.2.7./1 Bestimmen des Wirkungsgrades bei einem Transformator

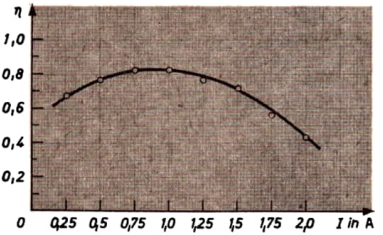


Abb. 2.2.7./2
Grafische Darstellung des Wirkungsgrades

Der Quotient $\frac{P_s}{P_p}$ gibt den Wirkungsgrad wieder. Er wird als Funktion von I_p bestimmt. Dazu wird der Gleitwiderstand immer so eingestellt, daß im Sekundärkreis die Stromstärke von 0,25 A bis 2,00 A in Stufen von 0,25 A verwendet wird. Für jede Stromstärke werden die entsprechenden Leistungen am Leistungsmesser abgelesen und in einer Übersicht zusammengefaßt (vgl. Tabelle). Zweckmäßigerweise wird man den Versuch in zwei Schritten durchführen, indem man beispielsweise die Leistungen zuerst im Primärstromkreis für alle Stromstärken bestimmt, dann den Leistungsmesser in den Sekundärstromkreis schaltet und den entsprechenden Versuch noch einmal wiederholt. Genauer fallen die Messungen aus, wenn man in jeden Stromkreis einen Leistungsmesser schaltet.

Beispiel für die Meßwerte beim Bestimmen des Wirkungsgrades am Transformator

Sekundärstromstärke I_s in A	Primärleistung P_p in W	Sekundärleistung P_s in W	Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_s}{P_p}$
0,25	6,0	4,0	0,67
0,50	10,5	8,0	0,76
0,75	14,0	11,5	0,82
1,00	17,0	14,0	0,82
1,25	19,5	15,0	0,77
1,50	21,0	15,0	0,71
1,75	20,5	11,5	0,56
2,00	17,5	7,5	0,43

Bemerkungen

1. Aus der Meßreihe und der sich daraus ergebenden grafischen Darstellung folgt, daß der Wirkungsgrad bei einer bestimmten Sekundärstromstärke ein Maximum annimmt (Abb. 2.2.7./2). Die Energieabgabe im Sekundärkreis muß dem Tranformator angepaßt sein, wenn ein optimale Wirkungsgrad erreicht werden soll.
2. Der Versuch läßt sich auch mit dem Transformator aus dem SEG-Satz ausführen. Als Leistungsmesser kann man das Schülermeßgerät Polytest verwenden.

2.2.8. Energieumwandlungen an einem unbelasteten Transformator

1. Stromversorgungsgerät (20 V ~)
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern mit I-Kern, geblättert
4. Spule (125/250 Wdg.)
5. Spule (500 Wdg.)
6. Spule (750/1500 Wdg.)
7. Spule mit beliebiger Windungszahl
8. Leistungsmesser (25 V; 5 A)
9. Strommesser (2 A ~)
10. Spannungsmesser (25 V ~)
11. Gleitwiderstand (18 Ω)
12. Schalter

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll zeigen, daß ein Teil der Verluste am Transformator schon im Leerlauf auftreten. Diese können aber bei großer Windungszahl der Primärspule klein gehalten werden.

Versuch

Der Versuchsaufbau wird nach Abbildung 2.2.8./1 durchgeführt. Man benutzt zunächst eine Primärspule mit 125 Wdg. und bestimmt primärseitig Spannung, Stromstärke und Leistung.
Die Sekundärspule kann man bei diesem Versuch beliebig wählen, da sie auf die Meßwerte keinen Einfluß hat.
Man wiederholt den Versuch mit Primärspulen mit 250 Wdg., 500 Wdg., 750 Wdg. und 1500 Wdg. Die Meßergebnisse werden in einer Tabelle nach beigefügtem Muster zusammengefaßt.

Beispiele für die Meßwerte beim Bestimmen der Primärleistung eines Transformators

Windungszahl N_p der Primärspule	Primärstromstärke I_p in A	Primärspannung U_p in V	Primärleistung P_p in W
125	2,54	20,7	28
250	0,42	21,7	4
500	0,087	21,8	1
750	0,047	21,8	nicht mehr ablesbar
1500	0,029	21,8	nicht mehr ablesbar

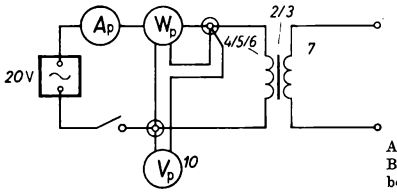


Abb. 2.2.8./1
Bestimmung des Phasenwinkels bei einem unbelasteten Transformator

Bemerkungen

1. Zwischen der Wirkleistung, der Spannung und der Stromstärke besteht die Beziehung $P = I \cdot U \cdot \cos\varphi$, aus der man den Phasenwinkel φ über $\cos\varphi$ ermitteln kann. Es ist

$$\cos\varphi = \frac{P}{I \cdot U} .$$

   Bei einem idealen Transformator ist $\varphi = 90°$, d. h. $\cos\varphi = 0$.
2. Es ist zu beachten, daß das Stromversorgungsgerät bei kleineren Belastungen im allgemeinen eine Überspannung liefert. Will man mit konstanten Spannungen arbeiten, so muß man sie mit Hilfe eines Potentiometers einstellen.

2.2.9. Sparschaltung eines Transformators

1. Stromversorgungsgerät (20 V ~)
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern, geblättert
4. I-Kern, geblättert
5. Spule (750/1500 Wdg.)
6. 2 Spannungsmesser (50 V ~)
7. Schalter

Methodischer Hinweis

Sparschaltungen von Transformatoren sind eine materialsparende Form. Es besteht immer eine galvanische Verbindung zwischen Hoch- und Niederspannungsseite. Darum sind derartige Versuche mit Netzspannung zu vermeiden.

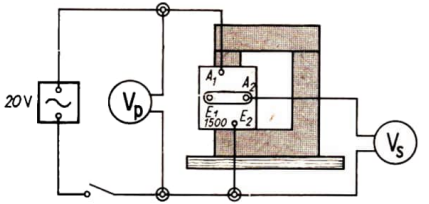


Abb. 2.2.9./1
Transformator zum Herunterspannen in Sparschaltung

Versuch 1: Transformator zum Herunterspannen

Auf den geschlossenen Eisenkern setzt man eine Spule mit 750/1500 Wdg. und schaltet sie nach Abb. 2.2.9./1. Legt man an die Buchsen A_1 und E_2 eine Spannung von 20 V, so kann man zwischen A_1 und E_1 oder zwischen A_2 und E_2 Spannungen von 10 V abgreifen. Die Spule wirkt praktisch wie ein Spannungsteiler.

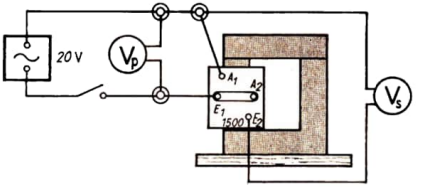


Abb. 2.2.9./2
Transformator
zum Hinaufspannen
in Sparschaltung

Versuch 2: Transformator zum Hinaufspannen

Die Primärspannung von 20 V wird an die Buchsen A_1 und E_1 (750 Wdg.) der Spule gelegt (Abb. 2.2.9./2). An den Buchsen A_1 und E_2 (1500 Wdg.) der Spule kann man dann eine Spannung von etwa 40 V abgreifen.

2.2.10. Modell einer Fernleitung zur Energieübertragung

1. Stromversorgungsgerät (18 V ~)
2. 2 Grundbretter mit Spannvorrichtung
3. 2 U-Kerne, geblättert
4. 2 I-Kerne, geblättert
5. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
6. 2 Spulen (15000 Wdg.)
7. 2 Widerstände (50 kΩ)
8. Glühlampe (18 V; 0,1 A)
9. Glimmlampe (220 V)
10. Schalter

Methodischer Hinweis

Es wirkt auf jeden Fall überraschend, daß bei einem hohen Leitungswiderstand (100 kΩ) die Glühlampe leuchtet. So kann der Versuch gut zur Problemstellung vorgeführt werden.

Versuch

Die nach Abbildung 2.2.10./1 ausgeführte Versuchsanordnung (zunächst ohne die Glimmlampe) dient als Modell einer Fernleitung zur Übertragung elektrischer Energie, wobei die Widerstände in beiden Leitungen die Ohmschen Widerstände der in der Praxis sehr langen Freileitungen ersetzen. Die Spulen 125/250 Wdg. werden mit 125 Wdg. eingesetzt. Legt man an die Primärseite des zum Hinaufspannen dienenden Transformators eine Wechselspannung von 18 V, so leuchtet die Glühlampe an der Sekundärseite des zum Herunterspannen benutzten Transformators mit nahezu normaler Helligkeit. Die geringfügige Helligkeitsabnahme der Glühlampe ist dabei auf die Energieverluste in den beiden Transformatoren

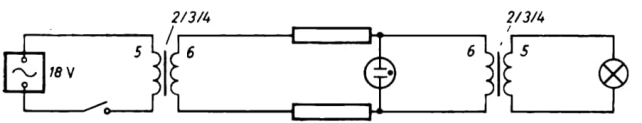


Abb. 2.2.10./1 Fernleitung mit einem Aufwärts- und einem Abwärtstransformator

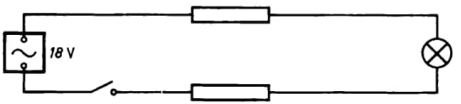


Abb. 2.2.10./2
Fernleitung
ohne Transformatoren

und auf den Spannungsabfall an den Widerständen zurückzuführen. Man veranschaulicht modellartig die zwischen den beiden Drähten der Freileitung bestehende Hochspannung, indem man die beiden Drähte kurzzeitig durch eine Glimmlampe für 220 V überbrückt. Allerdings erlischt die Glühlampe während des Einschaltens der Glimmlampe.
Aus methodischen Gründen sollte man auch den Gegenversuch ohne Transformatoren durchführen. Legt man nämlich die Glühlampe ohne die beiden Transformatoren nach Abbildung 2.2.10./2 an das Stromversorgungsgerät, so kann die Glühlampe wegen des jetzt weit größeren Spannungsabfalles in der Leitung nicht mehr aufleuchten.

Netzspannung

2.2.11. Modellversuch zum Punktschweißen

1. Grundbrett mit Spannvorrichtung
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Spule (750/1500 Wdg.)
5. Spule (10 Wdg.)
6. Schweißzangenmodell
7. 2 Stückchen Blech (Rasierklingen)
8. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll den Schülern die technische Bedeutung von Hochstromtransformatoren zeigen.

Versuch

Der Transformator wird nach Abb. 2.2.11./1 zusammengebaut. Damit die Erwärmung infolge von Übergangswiderständen zwischen der Schweißzange und der Sekundärspule auf ein Mindestmaß herabgedrückt wird, müssen die Kontaktstellen oxidfrei sein und die Muttern an der Sekundärspule fest angezogen werden Die Primärspule des Transformators wird an die Netzspannung (220 V ~) ange-

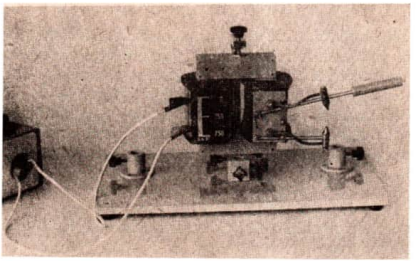


Abb. 2.2.11./1
Transformator
mit Schweißzange

schlossen. Zwischen die Kontaktstellen der Schweißzange bringt man zwei Stückchen Blech oder zwei Rasierklingen, die übereinander gelegt sind. Die Blechstücke werden durch die Schweißzange zunächst nur leicht zusammengedrückt, damit ein recht großer Übergangswiderstand und eine große Erwärmung der Berührungsstelle auftreten. Wenn die Bleche an der Berührungsstelle hell aufglühen, wird die Schweißzange fester zusammengepreßt, damit die Bleche an der Berührungsstelle zusammengeschweißt werden.

Netzspannung

2.2.12. Modellversuch zur Wirkungsweise des Induktionsofens

1. Grundbrett mit Spannvorrichtung
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Spule (750/1500 Wdg.)
5. Schmelzrinne mit Griff
6. Woodsches Metall, Blei oder Lötzinn
7. Gußform aus Gips oder Gefäß mit Wasser
8. Holzunterlage
9. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Es kommt darauf an, daß die Schüler das Wirkungsprinzip des Transformators auch bei einer einzigen kurzgeschlossenen Windung erkennen.

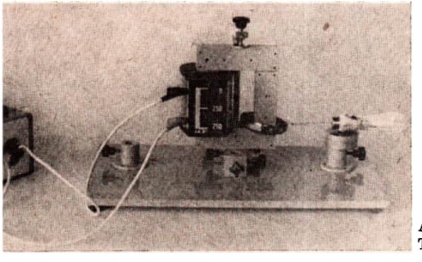


Abb. 2.2.12./1
Transformator mit Schmelzrinne

Versuch

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.2.12./1 vorgenommen. Die Schmelzrinne wird vor dem Versuch mit Stücken von Woodschem Metall, Blei oder Lötzinn gefüllt und über den sekundärseitigen Schenkel des U-Kerns geschoben. Der Transformator wird in die Spanneinrichtung gesetzt und die Primärspule an die Netzspannung (220 V ~) angeschlossen. Nach kurzer Zeit schmilzt das Metall. Die Schmelzrinne wird während des Schmelzvorganges mit der Hand gehalten. Um zu zeigen, daß das Material geschmolzen ist, gießt man es in eine Gießform oder läßt es in Wasser tropfen.

Bemerkung

Eine angenäherte Bestimmung der Stromstärke I_s in der Schmelzrinne ist durch Messen der Primärstromstärke I_p möglich.

Netz-spannung

2.2.13. Modelle von Meßwandlern

Zu Versuch 1

1. Grundbrett mit Spannvorrichtung
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Spule (125/250 Wdg.)
5. Spule (750/1500 Wdg.)
6. 2 Spannungsmesser (250 V ~)
7. Glühlampe (220 V; 25 W)
8. Netzadapter

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 5., 8., außerdem

9. Stromversorgungsgerät (20 V ~)
10. 2 Strommesser (5 A ~)
11. Gleitwiderstand (18 Ω)

Methodischer Hinweis

Mit diesen Versuchen werden direkte technische Anwendungen des unbelasteten und des kurzgeschlossenen Transformators gezeigt (vgl. V 2.2.5.).

Vorbemerkung

Zum Messen von Hochspannungen und zum Messen sehr starker Ströme schaltet man zwischen die Leitung und das Meßgerät einen sogenannten Wandler. Das ist ein Transformator, dessen Primärwicklung in der Hochspannungsleitung liegt und dessen Sekundärwicklung mit dem Meßgerät verbunden wird. Die Sekundärspannung bzw. -stromstärke werden gemessen und daraus die Primärspannung bzw. -stromstärke errechnet.

Versuch 1: Der Spannungswandler

An die Netzspannung (220 V ~) legt man entsprechend der Abbildung 2.2.13./1 einen Transformator.
Aus Sicherheitsgründen sind beim Modell wie in der Praxis der Eisenkern und die Sekundärspule immer zu erden. An der Sekundärspule wird die Spannung U_s gemessen. Nach der Gleichung $U_p = \frac{N_p}{N_s} \cdot U_s$ wird die Primärspannung berechnet.

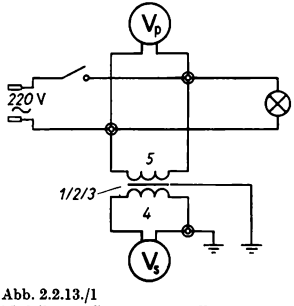


Abb. 2.2.13./1
Modell eines Spannungswandlers

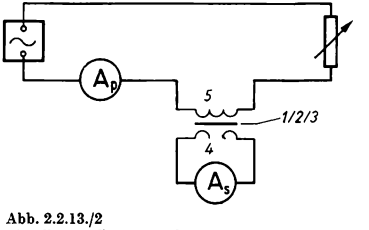


Abb. 2.2.13./2
Modell eines Stromwandlers

Es werden beispielsweise als Primärspule eine solche mit 1500 Wdg., als Sekundärspule eine solche mit 125 Wdg. gewählt. Die Messung der Sekundärspannung ergibt 18 V. Die Primärspannung wird zur Kontrolle ebenfalls gemessen. Sie ist 220 V. Die Rechnung ergibt 216 V.

Versuch 2: Der Stromwandler

Der Stromwandler wird nach Abbildung 2.2.13./2 aufgebaut. Als Spannungsquelle wird ein Stromversorgungsgerät verwendet, die Stelle einer Glühlampe vertritt ein Gleitwiderstand. Die Spannung und der Gleitwiderstand werden so eingestellt, daß in der Leitung ein Strom von etwa 4 A fließt. Die Stärke des sekundären Stromes wird gemessen. Sie beträgt beispielsweise 0,36 A, wenn man als Primärspule die mit 125 Wdg. und als Sekundärspule die mit 1500 Wdg. wählt. Als Stromstärke des Primärstromes ergibt sich:

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_s = \frac{1500}{125} \cdot 0{,}36\ \text{A} \approx 4{,}3\ \text{A}\,.$$

Hochspannung

2.2.14. Modell der Zündanlage eines Kraftwagens

1. Akkumulator
2. Grundbrett mit Spannvorrichtung
3. U-Kern geblättert
4. I-Kern, geblättert
5. Spule (125/250 Wdg.)
6. Spule (15000 Wdg.)
7. Kondensator (4 µF)
8. Morsetaste
9. 2 Steckspitzen
10. Bunsenbrenner

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist dazu geeignet, das besondere Interesse der Schüler zu wecken und ihnen polytechnische Kenntnisse zu vermitteln.

Versuch

Der Aufbau des Modells einer Batteriezündung erfolgt nach Abbildung 2.2.14./1. Als Spannungsquelle verwendet man am besten einen Akkumulator. Als Ersatz für den Akkumulator kann auch ein kleines Stromversorgungsgerät benutzt werden, dem man eine Gleichspannung von etwa 4 V entnimmt. Der Abstand der beiden Steckspitzen beträgt 1 mm ... 2 mm. Die Morsetaste wird immer abwechselnd geschlossen und geöffnet. Beim Öffnen der Morsetaste wird in der Sekundärspule jedesmal eine so hohe Spannung induziert, daß zwischen den Steckspitzen ein Funke überspringt. Dieser Funke bringt das Kraftstoffluftgemisch zur Zündung. Man

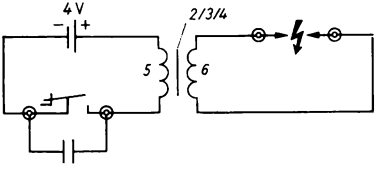


Abb. 2.2.14./1
Schaltplan des Modells der Zündanlage eines Kraftwagens

kann dies dadurch veranschaulichen, daß man einen Bunsenbrenner unter die Steckspitzen stellt. Der Gashahn wird kurz vor dem Überspringen der Funken geöffnet. Das Gas entzündet sich.
Man zeige auch, daß der Zündfunke bei eingeschaltetem Kondensator stärker ist als bei fehlendem Kondensator. Der Öffnungsfunke am Schalter wird durch den Kondensator schneller zum Erlöschen gebracht. Damit wird die Kraftflußänderung größer, und demzufolge steigt die Induktionsspannung.

Bemerkung

Beim Kraftwagen wird zum Erreichen der für die Funkenbildung erforderlichen Spannung eine Zündspule verwendet. Sie ist ein Manteltransformator, der in Zylinderform ausgeführt ist und zwei getrennte Spulen enthält. Diese sind mit ihrem einen Ende — bei der Primärspule über die Unterbrecherkontakte — an das Rahmengestell des Kraftwagens, die sogenannte Masse, angeschlossen, die als Rückleitung dient.



2.2.15. Modell eines elektrischen Weidezaungerätes

1. Akkumulator oder Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Spule (15000 Wdg.)
3. Spule (125/250 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. Blattfeder mit Schaft
6. Klemmenstange
7. Kontaktschraubenträger mit Kontaktschraube
8. Schalter
9. Holtzsche Klemme
10. 2 Stück blanker Leitungsdraht (je 1000 mm lang)
11. Widerstand (500 kΩ)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 2.2.14.!
2. In modernen Geräten wird das Zerhacken der Gleichspannung durch elektronische Schaltungen ausgeführt.

Herstellung des Modells

Man fügt nach Abbildung 2.2.15./1 die obengenannten Geräte zu einem Wagnerschen Hammer zusammen und schließt ihn über einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle von etwa 4 V an. Als Magnet dient ein U-Kern, auf dessen einem Schenkel eine Spule mit 125 Wdg. sitzt. Der andere Schenkel enthält als Sekundärspule eine Spule mit 15000 Wdg., an deren Enden als Modell des Weidezaunes zwei nicht isolierte Drähte angeschlossen sind. Der eine Draht führt zu einer Holtzschen Klemme, der andere ist mit einem auf dem Tisch liegenden Stativstab verbunden.

Inbetriebnahme des Modells

Man schaltet die Spannung ein und setzt dadurch den Wagnerschen Hammer in Tätigkeit. Es entstehen an den freien Enden der Induktionsspule Spannungsimpulse, die sich auf die angeschlossenen Drähte übertragen. Die Impulse sind unge-

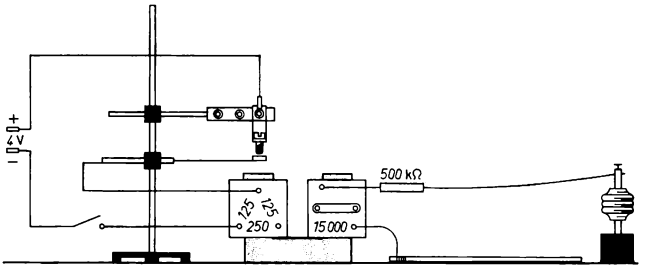


Abb. 2.2.15./1 Wagnerscher Hammer als Impulsgeber

fährlich. Man zwinge aber keinen Schüler zum Angreifen. Völlig schmerzlos wird das Berühren, wenn man am Anfang des Drahtes einen Widerstand von mindest 500 kΩ zwischenschaltet.

2.3. Die Selbstinduktion

2.3.1. Selbstinduktion im Gleichstromkreis beim Zerhacken des Gleichstromes

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Spule (750/1500 Wdg.)
3. I-Kern, geblättert
4. Spannungsmesser (10 V ~)
5. Klemmenstange
6. Blattfeder mit Schaft
7. Kontaktschraubenträger mit Kontaktschraube
8. Schalter

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist geeignet, die Schüler durch die Frage, wodurch ergibt sich die höhere Spannung, an das Problem der Selbstinduktion heranzuführen.

Versuch

Aus Aufbauteilen wird ein Wagnerscher Hammer zusammengestellt und nach Abbildung 2.3.1./1 an eine Gleichspannung von etwa 4 V angeschlossen. Die Stellschraube muß kräftig gegen die Blattfeder drücken, damit eine hohe Frequenz der Federschwingung entsteht. Mit dem Spannungsmesser wird die Spannung an den Klemmen der Spule gemessen. Infolge Selbstinduktionsspannung ist die Spannung mit 6 V ... 8 V höher als die Spannung an der Spannungsquelle.

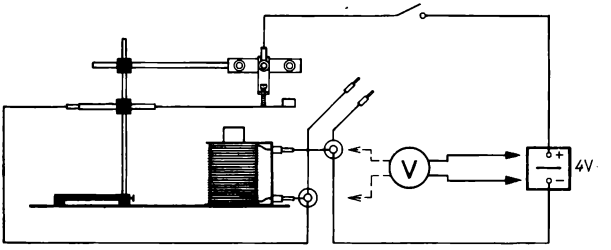


Abb. 2.3.1./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Selbstinduktion am Wagnerschen Hammer

Bemerkungen

1. Man kann die Selbstinduktionsspannung auch ohne Meßgerät feststellen. Man verwendet dazu eine Spule von 250 Wdg. Der Blattfeder gibt man eine geringere Spannung, so daß die Frequenz kleiner wird. An die Spule werden zwei Verbindungsleiter angeschlossen. Faßt man mit jeder Hand die Stifte der Bananenstecker an ihren freien Enden, so verspürt man infolge der Selbstinduktionsspannung ein Kribbeln in den Händen.
2. An Stelle des Wagnerschen Hammers kann man eine elektrische Klingel oder ein Relais einsetzen. Eine parallelgeschaltete Glimmlampe zeigt die hohe Selbstinduktionsspannung an.

2.3.2. Nachweis der Selbstinduktion beim Ausschalten durch eine Glimmlampe

1. Stromversorgungsgerät (200 V —)
2. Stromversorgungsgerät (10 V —)
3. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. Grundbrett mit Spannvorrichtung
7. Signalglimmlampe
   oder Glimmlampenschwenkstab
   oder Polprüfer
8. Schalter

Methodische Hinweise

1. Der überraschend große Betrag der Selbstinduktionsspannung ist aus dem Induktionsgesetz zu erklären.
2. Für die Erklärung der Polarität der Induktionsspannung ist eine weitere Interpretation des Lenzschen Gesetzes zu geben. Bei absinkender Stromstärke als Ursache für die Induktion liefert die Spule eine Induktionsspannung, die den Strom zeitweilig in gleicher Richtung aufrechterhält (vgl. 2.1.7.).
3. Der Versuch steht in unmittelbarem Zusammenhang mit V 2.3.3.

Vorversuche

Für eine Signalglimmlampe wird durch einen Vorversuch an einer Gleichspannung von etwa 200 V festgestellt, wie die Elektroden an die Buchsen des Lampenbrettes

angeschlossen sind. Die Elektrode am Minuspol leuchtet auf. Am Glimmlampenstab und am Polprüfer ist der Anschluß der Elektroden an die Zuleitungen ohne weiteres klar.
Außerdem wird die Zündspannung der Glimmlampe am Hochspannungsteil des Stromversorgungsgerätes ermittelt. Sie liegt etwa bei 100 V.

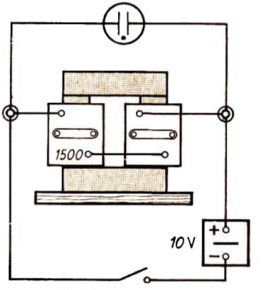


Abb. 2.3.2./1
Nachweis der Selbstinduktion beim Ausschalten

Hauptversuch

Im Stromkreis liegt eine Gleichspannungsquelle mit einer Spannung von 6 V bis 10 V (Abb. 2.3.2./1). Schließt man den Schalter, so leuchtet die Glimmlampe nicht, da die Spannung zu niedrig ist. Öffnet man dagegen den Schalter, so tritt eine hohe Selbstinduktionsspannung auf; die eine Elektrode der Glimmlampe leuchtet kurz auf. Es ist genau zu beobachten, welche Elektrode aufleuchtet.
Daraus kann man die Polarität der Selbstinduktionsspannung erkennen. Sie stimmt mit der Polarität der Spannungsquelle überein.

2.3.3. Nachweis der Selbstinduktion beim Einschalten durch Glühlampen

1. Stromversorgungsgerät (6 V — oder 18 V —)
2. 2 Glühlampen (6 V oder 18 V)
3. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. Grundbrett mit Spannvorrichtung
7. Gleitwiderstand (110 Ω)
8. Schalter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.3.2.!

Versuch

Die Schaltung wird nach Abbildung 2.3.3./1 ausgeführt. Die Spannung richtet sich nach der Betriebsspannung der Glühlampen. Durch den Gleitwiderstand ist die Stromstärke so einzustellen, daß beide Lampen gleich hell leuchten.
Beim Einschalten des Stromes ist deutlich zu beobachten, daß die Glühlampe im Zweig mit der Induktionsspule (2 × 1500 Wdg.) später aufleuchtet als die andere

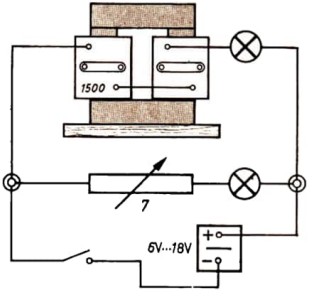


Abb. 2.3.3./1 Nachweis der Selbstinduktion beim Einschalten durch zwei Glühlampen

Glühlampe. Die Verzögerung läßt erkennen, daß die Polung der Selbstinduktionsspannung beim Einschalten der Polung der Spannungsquelle entgegengerichtet ist. Beim Ausschalten ist kein Unterschied zwischen den Lampen zu beobachten.

2.3.4. Abreißen eines Lichtbogens infolge von Selbstinduktion

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. 2 Steckspitzen
3. Drehwiderstand (25 Ω)
4. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
5. U-Kern, geblättert
6. I-Kern, geblättert
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Schalter
9. Kondensator (4 μF)

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann als Nachweis dafür benutzt werden, daß in der Funkenentladung eine elektrische Schwingung auftritt, die durch den induktiven Widerstand der Spulen verringert wird.

Versuch

In den Stromkreis nach Abbildung 2.3.4./1 wird zunächst der Drehwiderstand mit 25 Ω als Ohmscher Widerstand gelegt. Die Spitzen werden zur Berührung gebracht. Trennt man sie voneinander, so tritt ein kleiner Lichtbogen auf.
Ersetzt man den Ohmschen Widerstand durch eine Induktionsspule, so reißt der beim Trennen der Spitzen entstehende Lichtbogen schon nach kurzer Zeit ab.

Bemerkungen

1. Bei einer Spannung von etwa 100 V erreicht man einen größeren, länger dauernden Lichtbogen. Es empfiehlt sich, vorher die Steckspitzen durch Nägel zu ersetzen, da die Spitzen leicht wegschmelzen.
2. Schaltet man parallel zum Lichtbogen Kondensatoren von 4 μF ... 20 μF, so kann man deutlich die Verkleinerung des Lichtbogens infolge der Aufhebung der Induktivität beobachten. Es ist auch ein Verändern der Frequenz der Funkenentladung festzustellen. Die Funken schlagen kurz und knallend über.

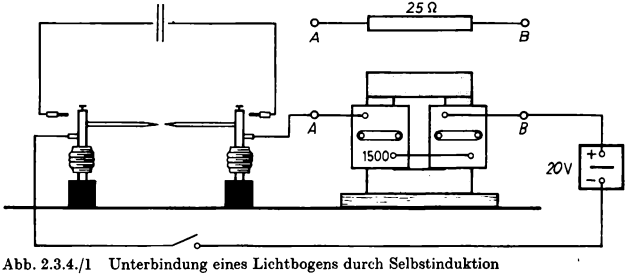


Abb. 2.3.4./1 Unterbindung eines Lichtbogens durch Selbstinduktion

2.3.5. Modell eines Funkeninduktors aus Aufbauteilen

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Spule (500 Wdg.)
3. Spule (15000 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. Grundbrett mit Spannvorrichtung
7. 2 Stecknadeln
8. Klemmenstange
9. Blattfeder mit Schaft
10. Kontaktschraubenträger mit Schraube
11. Leidener Flasche
12. 4 Krokodilklemmen

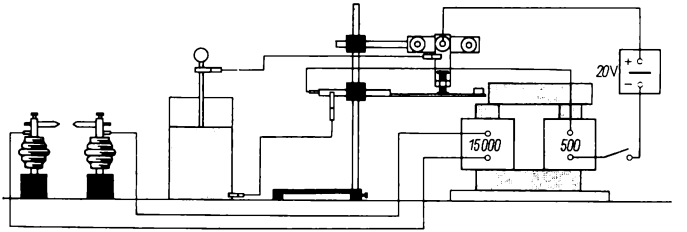


Abb. 2.3.5./1 Funkeninduktormodell aus Aufbauteilen

Versuch

Die Abbildung 2.3.5./1 zeigt den Versuchsaufbau. Die beiden Spitzen werden auf etwa 2 mm genähert. Die Leidener Flasche wird zunächst nicht angeschlossen. Es bildet sich zwischen den Spitzen eine Funkenstrecke aus. Die Spitzen können bis auf 6 mm ... 7 mm voneinander entfernt werden. Durch Anschließen der Leidener Flasche parallel zur Unterbrechungsstelle zwischen der Blattfeder und der Kontaktschraube werden die einzelnen Funkenüberschläge kräftiger.

2.3.6. Zündung einer Leuchtstoffröhre

1. Leuchtstoffröhre
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Grundbrett mit Spannvorrichtung
5. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
6. Morsetaste
7. Netzadapter
8. 4 Krokodilklemmen

Methodischer Hinweis

Da die Leuchtstofflampen in Leuchten immer mehr verwendet werden, sollte man nicht versäumen, die Schüler mit der Zündeinrichtung vertraut zu machen, deren Funktion sich unmittelbar aus V 2.3.2. ergibt.

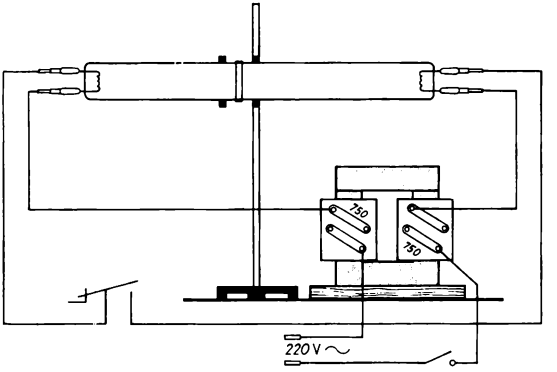


Abb. 2.3.6./1 Versuchsaufbau einer Leuchtstoffröhre

Versuch

Eine Leuchtstoffröhre wird durch einen Glasröhrenhalter waagerecht an einem Stativ befestigt. Die Schaltung wird nach Abbildung 2.3.6./1 vorgenommen. Als Drosselspulen werden zwei Spulen mit 750 Wdg. auf einen geschlossenen Eisenkern gesetzt. Die Verbindungsleitungen werden mit Hilfe von Krokodilklemmen an der Leuchtstoffröhre festgeklemmt. An Stelle des in der Technik üblichen Glimmzünders wird eine Morsetaste eingesetzt. Man schließt zunächst den Schalter und dann mit der Morsetaste den Stromkreis für die Dauer von etwa 20 s bis 30 s, bis die Elektroden sich hinreichend erwärmt haben. Beim Öffnen der Morsetaste erfolgt durch den Selbstinduktionsstoß die Zündung der Röhre. Beim Niederdrücken der Taste erlischt die Röhre. Vor der Wiederholung des Versuches wartet man etwa 1 min, bis sich die Elektroden wieder abgekühlt haben.
Man kann auch den häufigsten Defekt an Leuchtstoffröhren demonstrieren. Wenn sich die Kontakte des Glimmzünders nicht ordnungsgemäß öffnen, flackert die Leuchtstoffröhre. Das kann man durch eine Betätigung der Morsetaste nachahmen. Beim Schließen der Kontakte der Morsetaste verlischt die Röhre wieder.

Bemerkungen

1. An Stelle der Morsetaste kann auch ein Originalglimmzünder eingesetzt werden.
2. Im Lehrmittelangebot gibt es eine Schaltplatte, auf der dieser Versuch mit der zur Leuchtstoffröhre gehörenden Drossel aufgebaut ist.

2.4. Wirbelströme

2.4.1. Waltenhofensches Pendel

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. U-Kern, geblättert
3. Polschuhpaar
4. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
5. Pendelkörper, massiv
6. Pendelkörper, geschlitzt
7. Gleitwiderstand (110 Ω)
8. Schalter
9. Strommesser
10. Stoppuhr
11. Federkraftmesser (N)

Methodische Hinweise

1. Im Unterricht ist es zweckmäßig, den Versuch 1 zur Problemstellung und den Versuch 2 nach Klärung der Entstehung von Wirbelströmen einzusetzen.
2. Eine Anwendung erfolgt bei der Wirbelstromdämpfung am Gerät zur Messung in elektrischen und magnetischen Feldern.

Versuchsanordnung

Der Aufbau des Gerätes erfolgt nach Abbildung 2.4.1./1. Es werden zwei Spulen mit 1500 Wdg. verwendet. In den Stromkreis legt man einen Hebelschalter und einen Vorwiderstand. Die Pendelstange ist so anzubringen, daß der Pendelkörper ungehindert zwischen den Polschuhen hindurchschwingen kann.

Versuch 1: Verwenden eines massiven Pendelkörpers

Bei geöffnetem Stromkreis hebt man die Pendelstange seitwärts in die waagerechte Lage. Man läßt das Pendel schwingen und ermittelt die Zeit, die bis zum Stillstand des Pendels vergeht. Den gleichen Versuch wiederholt man bei geschlossenem Stromkreis, wobei der Vorwiderstand zunächst nicht zugeschaltet ist. Bewegt man

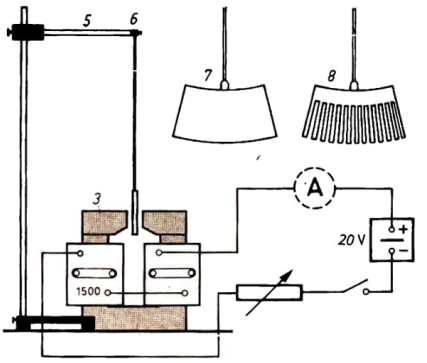


Abb. 2.4.1./1
Aufbau des Waltenhofenschen Pendels

das Pendel von Hand um seine Ruhelage, so verspürt man einen starken Widerstand, solange sich der Pendelkörper zwischen den Polschuhen befindet. Dies läßt sich auch mit einem Federkraftmesser nachweisen. Zum Nachweis der Abhängigkeit der hemmenden Wirkung von der Stromstärke führt man den Versuch mit verschiedenen Stromstärken durch.

Versuch 2: Verwenden eines geschlitzten Pendelkörpers

Wiederholt man den Versuch und verwendet dabei den geschlitzten Pendelkörper, so ergibt sich bei geöffnetem und bei geschlossenem Stromkreis keine wesentliche Abweichung. Das Pendel erfährt im Magnetfeld kaum eine Hemmung und kommt infolge der Reibung erst allmählich zur Ruhe.

2.4.2. Modell einer Wirbelstrombremse

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Wirbelstromscheibe
3. U-Kern, geblättert
4. Polschuhpaar
5. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
6. Stiel zur Klingelglocke
7. Gleitwiderstand (110 Ω)
8. Schalter
9. Hakenkörper

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist eine unmittelbare Anwendung der Vorgänge aus V 2.4.1. und zeigt im Modell die Möglichkeit ihrer technischen Nutzung.

Versuchsanordnung

Der Aufbau ist im wesentlichen derselbe wie beim V 2.4.1. (Abb. 2.4.2./1). Man schraubt an die Wirbelstromscheibe eine Schnurlaufrolle und setzt die Scheibe an Stelle des Pendelkörpers zwischen die Polschuhe. Auf die Schnurlaufrolle wickelt man 1 m bis 2 m Schnur, führt sie über eine Umlenkrolle und hängt an das Ende einen Hakenkörper.

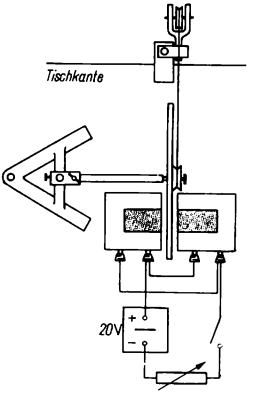


Abb. 2.4.2./1
Modell einer Wirbelstrombremse von oben betrachtet

Versuch

Durch den absinkenden Hakenkörper wird die Scheibe in Umdrehung versetzt. Schließt man den Stromkreis bei ausgeschaltetem Widerstand, so wird die Scheibe stark gebremst.
Verändert man mit Hilfe des Vorwiderstandes die Stromstärke, so erreicht man eine unterschiedliche Bremswirkung. Dies läßt sich am besten am Hakenkörper beobachten, dessen Bewegung beschleunigt, gleichförmig oder verzögert erfolgt.

2.4.3. Versuche mit der Aragoscheibe

1. Aragoscheibe
2. Hufeisenmagnet
3. Lasche für Eisenkerne
4. Magnetnadelträger
5. Kugellagerachse mit Kurbel
6. Schwungmaschine oder Experimentiermotor mit Bohrfutter

Methodische Hinweise

1. Gegenüber V 2.4.2. sind in dieser Anordnung Magnetfeld und Scheibe beweglich. Auf die Analogie zu V 2.1.7. ist hinzuweisen.
2. Der Versuch ist als Vorversuch zu V 3.2.7. zu betrachten.

Versuch 1: Drehen des Hufeisenmagneten

Man bohrt von der Oberseite her zentrisch eine Vertiefung in den Zapfen der Aragoscheibe, so daß sie sich auf einen Magnetnadelträger aufsetzen läßt. Einen Hufeisenmagneten hängt man in eine Lasche und befestigt sie mittels einer Stabhülse und einer kurzen Stativstange an einer Kugellagerachse (Abb. 2.4.3./1a). Versetzt man den Hufeisenmagneten durch Drehen der Kurbel an der Kugellagerachse in Umdrehung, so beginnt sich auch die Aluminiumscheibe in gleicher Richtung zu drehen. Die Drehzahl der Scheibe ist bei jeder Geschwindigkeit geringer als die des Hufeisenmagneten. Ändert man die Drehrichtung des Hufeisenmagneten, so ändert auch die Scheibe ihre Drehrichtung.

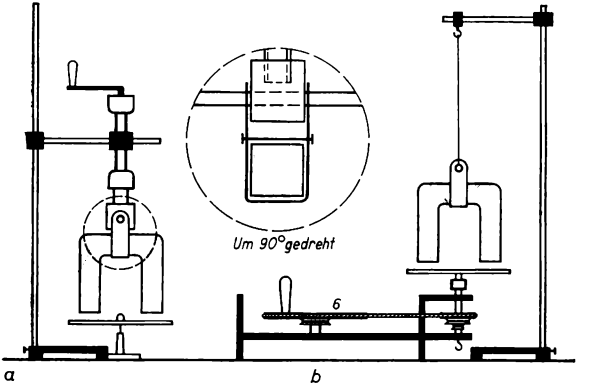


Abb. 2.4.3./1 Versuchsaufbau
a) Drehen des Hufeisenmagneten, b) Drehen der Aragoscheibe

Versuch 2; Drehen der Aragoscheibe

Will man den vorstehend beschriebenen Effekt umkehren, so hängt man den Magneten mit Hilfe eines Fadens am Stativ auf (Abb. 2.4.3./1b). Die Aragoscheibe spannt man mit ihrem Zapfen in der Schwungmaschine fest. Es ist darauf zu achten, daß der Magnet genau senkrecht hängt. Bei Beginn des Versuches muß der Hufeisenmagnet völlig in Ruhe sein. Versetzt man mit Hilfe der Schwungmaschine die Aragoscheibe in Umdrehung, so beginnt sich auch der darüberhängende Magnet in gleicher Richtung, jedoch mit geringerer Geschwindigkeit zu drehen. Ändert man bei beiden Versuchen die Drehrichtung des von Hand gedrehten Teiles plötzlich, so drehen sich die Scheibe bzw. der Magnet noch kurze Zeit in der alten Richtung weiter und kommen erst allmählich zum Stillstand. Erst dann setzt die Drehung in der umgekehrten Richtung ein.

2.4.4. Modell eines Tachometers

1. Aragoscheibe
2. Hufeisenmagnet
3. Lasche für Eisenkerne
4. Magnetnadelträger
5. Kugellagerachse mit Kurbel
6. 2 schmale Streifen aus Zeichenkarton
7. Skale auf Zeichenkarton

Methodischer Hinweis

Die Aragoscheibe (V 2.4.3.) wird hier in einer technischen Anwendung gezeigt.

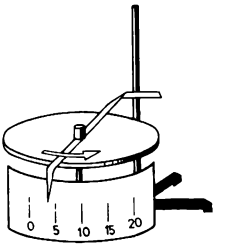


Abb. 2.4.4./1
Tachometermodell
Der obereTeil ist fortgelassen.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt nach V 2.4.3. Man klebt einen Streifen Zeichenkarton als Zeiger und einen zweiten, der in seinem überstehenden Teil rechtwinklig verdreht wird, als Rückholvorrichtung auf die Wirbelstromscheibe. Vor der Scheibe stellt man eine auf Zeichenkarton gefertigte Skale auf. Den vorstehenden Teil des Zeigers biegt man winklig nach unten um (Abb. 2.4.4./1).

Versuch

Man dreht den Hufeisenmagneten mit mäßiger Geschwindigkeit. Die Aluminiumscheibe wird ein Stück mitgenommen, dann aber durch den Rückholer gebremst. Je schneller der Magnet gedreht wird, desto größer ist der Zeigerausschlag.

Netzspannung

2.4.5. Einfluß der Blätterung eines Eisenkerns

1. U-Kern, voll
2. I-Kern, geblättert
3. U-Kern, geblättert
4. Spule (750/1 500 Wdg.)
5. Gleitwiderstand (110 Ω)
6. Grundbrett mit Spannvorrichtung
7. Schalter
8. Thermometer
9. Netzadapter

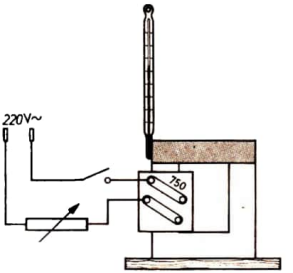


Abb. 2.4.5./1
Schaltplan zum Versuchsaufbau nach Variante a

Methodischer Hinweis

Es soll die Notwendigkeit der Blätterung der Eisenkerne in Transformatoren und elektrischen Maschinen gezeigt werden. Dabei geht man von V 2.4.1. aus.

Variante a

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.4.5./1. Die Spule wird auf einem Schenkel des U-Vollkerns direkt an die Netzspannung (220 V ~) angeschlossen. Damit das Joch zugänglich ist, setzt man den U-Kern quer auf das Grundbrett.

Versuch

Man legt als Joch einen I-Kern auf und schließt den Stromkreis. Schon nach kurzer Zeit läßt sich subjektiv durch Befühlen oder objektiv mit Hilfe eines Thermometers eine zunehmende Erwärmung feststellen. Dies wird beim Befühlen besonders deutlich, wenn man zum Vergleich den nicht benutzten geblätterten U-Kern betastet.
Ersetzt man den U-Vollkern durch einen geblätterten U-Kern, so ist selbst nach längerer Zeit kaum eine Erwärmung festzustellen.

Variante b

Versuchsaufbau

Man stellt den I-Kern mit der Bohrung nach oben in die Spule, füllt sie etwa zur Hälfte mit Öl und steckt ein Thermometer hinein (Abb. 2.4.5./2).

Versuch

Man schließt den Stromkreis für etwa 20 Sekunden. Im massiven Eisenkern erwärmt sichdas Öl auf etwa 80 °C. Im geblätterten Eisenkern ist die Erwärmung weit geringer.

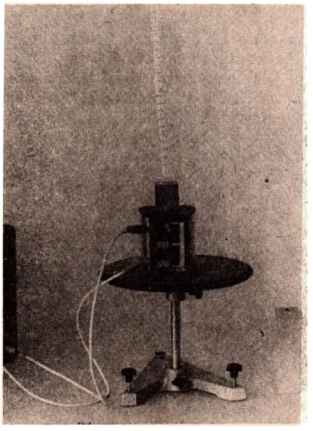


Abb. 2.4.5./2
Schaltplan zum Versuchsaufbau nach Variante b

Netzspannung

2.4.6. Modell eines Wechselstromzählers

1. U-Kern, geblättert
2. I-Kern, geblättert
3. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
4. Spule (750/1 500 Wdg.)
5. 3 Glühlampen (220 V; 100 W)
6. Stiel zur Klingelglocke
7. Wirbelstromscheibe
8. Schnurlaufrolle
9. Strommesser (5 A ~)
10. Spannungsmesser (250 V ~)
11. Zählwerk mit Stufenrolle
12. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch hat einerseits einen polytechnischen Bildungswert, andererseits eignet er sich zu einer komplexen Wiederholung des Leistungsmesserprinzips (V 1.3.10.) und der Wirbelströme.

Versuchsanordnung

Der Aufbau des Modells erfolgt nach Abbildung 2.4.6./1. Die beiden Spulen mit 250 Wdg. werden als Stromspulen geschaltet. Die Spannungsspule mit 1500 Wdg. liegt parallel zum Stromkreis. Dies muß durch übersichtliche Leitungsführung gut zu erkennen sein. Der Anschluß erfolgt an das Netz.
Die Wirbelstromscheibe wird fest mit einer Schnurlaufrolle verbunden. Die beiden Stativstäbe, an denen ein Stiel für die Klingelglocke und das Zählwerk befestigt werden, werden durch Tischklemmen gehalten. Den Antriebsriemen legt man über die Schnurlaufrolle an der Wirbelstromscheibe und über die große Rolle am Zählwerk.

Versuch

Man schließt den Stromkreis, indem man die erste Glühlampe einschaltet; die Wirbelstromscheibe beginnt sich zu drehen. Gleichzeitig wird das Zählwerk angetrieben. Durch Parallelschalten einer zweiten Glühlampe wird die Stromstärke größer, wobei auch die Drehzahl der Wirbelstromscheibe zunimmt. Ein schneller erfolgender Ziffernwechsel bestätigt dies. Eine weitere Steigerung der Drehzahl wird durch Parallelschalten einer dritten Glühlampe veranlaßt.
Man kann die Zählerangabe zum Bestimmen der Leistung benutzen, wenn man die Spannung, die Stromstärke und die Zeit mißt.

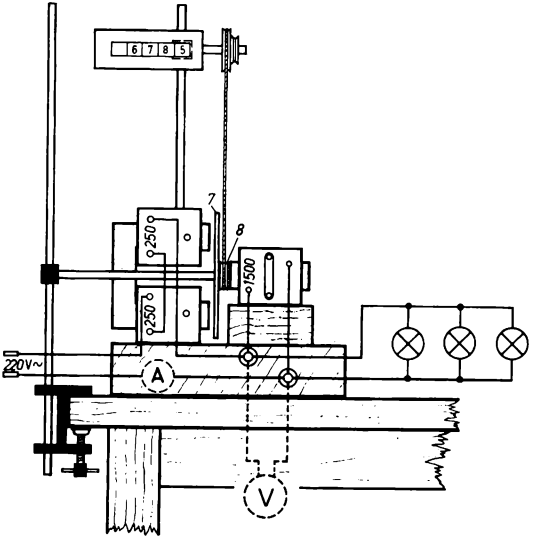


Abb. 2.4.6./1 Aufbau und Schaltung des Modells

3. Elektrische Maschinen

3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. Der größte Teil der Versuche dieses Kapitels ist mit dem speziell entwickelten Generator-Motor-Modell und seiner Zusatzausrüstung für Drehstrom durchführbar. Dieses Gerät ist groß genug, um direkt von den Schülern beobachtet zu werden. Außerdem ist es so gebaut, daß es durch eine einfache Schattenprojektion stark vergrößert abgebildet werden kann. Die zum Gerät gehörige Schaltplatte mit ihren genormten Anschlußbezeichnungen ist für den polytechnischen Unterricht zu Schaltübungen gut geeignet, sollte aber bei Demonstrationsversuchen fortgelassen werden, um die Leitungsführung deutlicher werden zu lassen. Das Drehzahlverhalten dieser Modelle kommt dem der technischen Maschinen zwar näher, aber befriedigt nicht in jedem Fall vollständig.
Um das physikalische Grundprinzip der Vorgänge in elektrischen Maschinen zu verdeutlichen, sind eine Reihe von Versuchen ausgewählt, die nicht an spezielle Generator-Motor-Modelle gebunden sind, sondern ohne diese mit Teilen des Aufbausatzes ausgeführt werden. Ein wichtiges Hilfsmittel dafür ist ein Polwendeschalter, der mit einem Spulenhalter kombiniert wird (Abb. 3.1.1./5).
Zur Durchführung der Versuche aus diesem Stoffgebiet stehen den meisten Schulen auch noch die Teile des Aufbaugerätesatzes zur Elektrizitätslehre für Motor- und Generatormodelle einschließlich der Zusatzausstattung für Dreiphasenwechselstrom zur Verfügung. Dieser Gerätesatz ermöglicht durch die zahlreichen Kombinationen der aufeinander abgestimmten Zubehörteile die modellartige Darstellung fast aller elektrischen Maschinen. Der Aufbau ist einfach und läßt sich in kürzester Zeit im Verlaufe des Unterrichts durchführen.
Hier soll aber doch auf einige Mängel hingewiesen werden:

1. Die Modelle liegen in ihren Abmessungen an der unteren Grenze für Demonstrationsgeräte.
2. Die Drehzahl des Ankers ist so groß, daß die elektrischen Vorgänge von den Schülern im einzelnen nicht erkannt werden können.
3. Das Verhalten der Motorenmodelle bei Brems- oder bei Belastungsversuchen entspricht nicht immer dem Verhalten von technischen Motoren.
4. Die äußere Form entspricht nicht technischen Maschinen.

Trotz dieser Mängel können die Modelle aus diesen Teilen noch im Unterricht verwendet werden.
Bei einigen Versuchen ist das Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes sehr gut einzusetzen.
Für Versuche zum Drehstrom wird der Selbstbau eines Aufbaugerätes unter 3.0.3. beschrieben. Weitere Selbstbauanleitungen einzelner Geräte und Teile sind den einzelnen Versuchsbeschreibungen zugeordnet.

3.0.1. Dieser Abschnitt beginnt mit den Versuchen zu den verschiedenen Typen von Generatoren. Anknüpfend an die Versuche zur Erzeugung von Induktionsspannungen durch Drehbewegungen im Abschnitt 2.1. führen die Versuche systematisch unter Ausnutzung der Kenntnisse über Stoffe im Magnetfeld und das Induktionsgesetz zu den Modellen technischer Generatoren. Die verschiedenen Typen von Motorenmodellen werden hier anschließend behandelt (V 3.1.6.). Als Vorversuch kann dazu V 1.3.9. herangezogen werden. Die Umkehrbarkeit von Generator- und Motorprinzip, die prinzipiell schon mit einer Leiterschaukel (V 2.1.1. und V 1.4.5.) nachgewiesen ist, wird in V 3.1.7. am Generator-Motor-Modell gezeigt. Um die Wirkungsweise des Kommutators, der an allen Modellen so klein ist, daß er von den Schülern schlecht zu erkennen ist, deutlicher zu demonstrieren, erscheint das Modell nach V 3.1.9. als empfehlenswert, obgleich sein Selbstbau einigen Aufwand erfordert. Im Unterricht können die Versuche zu den Motoren unmittelbar nach den Versuchen aus den Abschnitten 1.2. und 1.3. folgen, während die Generatoren natürlich etst nach Behandlung der elektromagnetischen Induktion untersucht werden können. Eine Erklärung der Drehzahlverhältnisse der Motoren ist allerdings ohne Kenntnis des Generatorprinzips nicht möglich, weil dazu das Entstehen der Gegenspannung erklärt werden muß.

3.0.2. Da die Dreiphasenwechselspannung nach den gleichen physikalischen Gesetzen wie die einfache Wechselspannung erzeugt wird und die Verknüpfung von drei Wechselspannungen ein rein technisches Problem ist, wird der Dreiphasenwechselstrom heute nicht im Physikunterricht, sondern im polytechnischen Unterricht behandelt. Der Abschnitt 3.2. ist in seiner Versuchsfolge dem unterrichtsmethodischen Gang folgend aufgebaut. V 3.2.1. und V 3.2.3. zeigen modellmäßig die Erzeugung und die technische Konstruktion von Dreiphasengeneratoren. Mit V 3.2.2. ist an einem Selbstbaugerät die Beziehung zwischen Phasenspannungen zu untersuchen. Diese Untersuchung ist auch möglich, wenn man einen Gleichstromgenerator, der einen möglichst vielteiligen Kollektor hat, mit einem langsam drehbaren Bürstenhalterring ausrüstet, der drei um 120° versetzte Kohlebürsten trägt. Hier erhält man eine Dreiphasenwechselspannung mit einer Frequenz, die gleich der Drehzahl des Bürstenhalterringes ist. Es folgt dann im V 3.2.4. und V 3.2.5. die Untersuchung der Spannungs- und Stromstärkenverhältnisse in Dreiphasenleitersystemen. Der Abschnitt wird abgeschlossen durch Versuche zum Drehfeld und zu verschiedenen Motormodellen.

3.0.3. Auch wenn an einer Spule schon ein Generator-Motor-Modell mit einem Zusatz für Dreiphasenwechselstrom vorhanden ist, so ist trotzdem der Selbstbau eines zweiten Modells zu empfehlen, zu dem weitgehend die Teile des Aufbaugerätesatzes verwendet werden, weil es für die Vorführung des Drehfeldes günstig ist, Generator und Motor nebeneinander vorführen zu können. Dazu wird nachfolgend eine Bauleitung gegeben.

Material für den Bau des Grundgerätes

1. 3 Spulen (500 Wdg.)
2. 3 I-Kerne, geblättert
3. Haltevorrichtung ⑧, (Werkstoff: Trolitul oder Hartpapier), dazu erforderliches Material:
   a) Werkstoffscheibe (∅ 120 mm; Dicke 20 mm)
   b) Werkstoffring (∅ 120 mm außen; ∅ 60 mm innen; Dicke 20 mm)
   c) Werkstoffring (∅ 120 mm außen; ∅ 80 mm innen; Dicke 6 mm)

d) 2 Bolzen (∅ 6 mm; Länge 120 mm)
e) Bolzen (∅ 6 mm; Länge 90 mm)
f) Bolzen für Lager (∅ 14 mm; Länge 30 mm)
4. 2 Stromzuführungsbürsten in Bürstenhalter
5. Doppel-T-Anker
6. drehbarer Magnetläufer Ⓢ, dazu erforderliches Material:
a) Welle (∅ genau 10 mm; Länge 100 mm)
b) Manipermmagnete
c) Weicheisenklötzchen, zu den Manipermmagneten passend (Gesamtlänge 55 mm)
d) Unterlegscheibe
7. Handkurbel mit Gewinde M 6
8. Handantriebsvorrichtung
9. starre Schaltverbindungen Ⓢ, dazu erforderliches Material:
a) dicker Draht
b) Bananenstecker
10. Weicheisenring aus aufeinandergesetzten Weicheisenblechstreifen (Länge etwa 820 mm; Breite 30 mm) Ⓢ
11. Stativstab mit Gewinde M 8 (180 mm)
12. V-förmiger Stativfuß

Anfertigung der Haltevorrichtung

Die Haltevorrichtung dient zum Festklemmen der I-Kerne, zur Aufnahme der Induktionsspulen, zur Lagerung des Läufers und zur Befestigung der Bürsten. Abb. 3.0.3./1a gibt die Einzelteile der Haltevorrichtung wieder. Diese besteht aus zwei verkitteten Werkstoffscheiben; die Rückwand a bildet eine 20 mm dicke Scheibe mit einem Durchmesser von 120 mm. Sie besitzt in der Mitte eine Bohrung zur Aufnahme des Lagers f. Unter großer Druckkraft (200 N ... 400 N) wird mit Alleskleber auf gut gerauhten Klebeflächen ein gleich dicker Ring b mit einem Innendurchmesser von 60 mm aufgeklebt. An der Vorderseite besitzt der Ring drei um 120° versetzte 30 mm breite und 3 mm tiefe radiale Nuten zur Aufnahme der I-Kerne. Zwischen diesen Nuten liegen auf einem Kreis mit einem Durchmesser von 100 mm drei durch beide Scheiben führende M 6-Gewindebohrungen. Ein

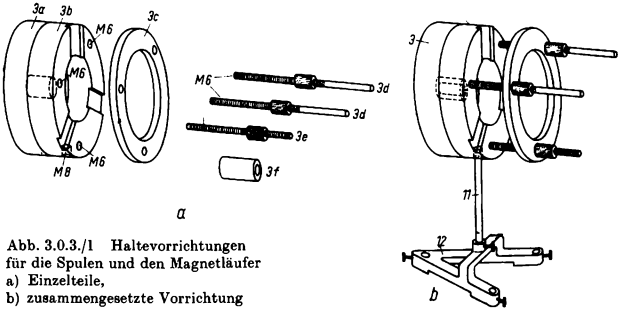


Abb. 3.0.3./1 Haltevorrichtungen für die Spulen und den Magnetläufer
a) Einzelteile,
b) zusammengesetzte Vorrichtung

6 mm dicker Werkstoffring c mit drei 6-mm-Bohrungen ergänzt die Haltevorrichtung. Zum Aufspannen der I-Kerne werden noch zwei 120 mm lange Bolzen und ein 90 mm langer Bolzen e benötigt. Davon sind der letzte vollständig, die beiden ersten nur bis $\frac{2}{3}$ ihrer Länge mit M 6-Gewinde versehen. Die Bolzen tragen Rändelmuttern. Besondere Sorgfalt verlangt die Anfertigung des etwa 30 mm langen Messinglagers f mit einem Durchmesser von etwa 14 mm und einer Bohrung von genau 10 mm, das man von einem Fachmann anfertigen läßt. Der Zusammenbau der Einzelteile ist aus Abbildung 3.0.3./1b zu ersehen. Zur Aufstellung mit Hilfe von Stativmaterial ist die Haltevorrichtung auf der Zylinderfläche noch mit einer M8-Gewindebohrung versehen.

Anfertigung des drehbaren Magneten

Eine 100 mm lange Welle (∅ genau 10 mm) wird an einem Ende auf einer Länge von 20 mm, am anderen Ende auf einer Länge von 50 mm mit M 6-Gewinde versehen (Abb. 3.0.3./2a). Auf ein Weicheisenklötzchen mit einer 6-mm-Bohrung werden zwei kräftige quaderförmige Manipermmagnete geklebt, so daß ein Magnet entsteht. Die Abmessungen des Klötzchens richten sich nach der Größe der Manipermstücke, die Gesamtabmessungen des Magneten sind aus der Abb. 3.0.3./2b

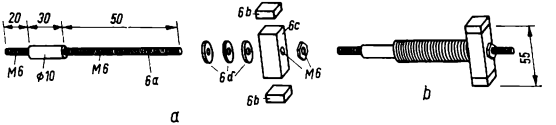


Abb. 3.0.3./2 Drehbarer Magnet a) Einzelteile, b) zusammengesetzter Läufer

ersichtlich. Die Welle dreht sich im Lager der Haltevorrichtung; unter Zwischenlegen von Unterlegscheiben mit einem Außendurchmesser von 12 mm wird der Magnet in der Ebene der I-Kerne festgeschraubt. Die Magnetpole können farbig gekennzeichnet werden.

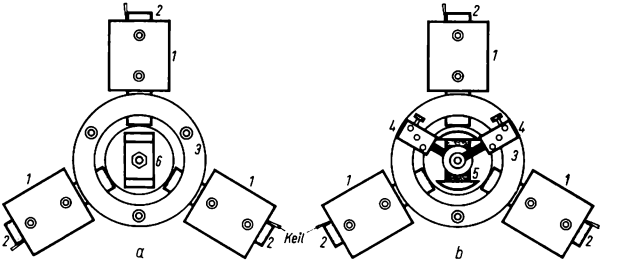


Abb. 3.0.3./3 Zusammenbau des Modells
a) Drehbarer Magnet als Läufer, b) Doppel-T-Anker als Läufer

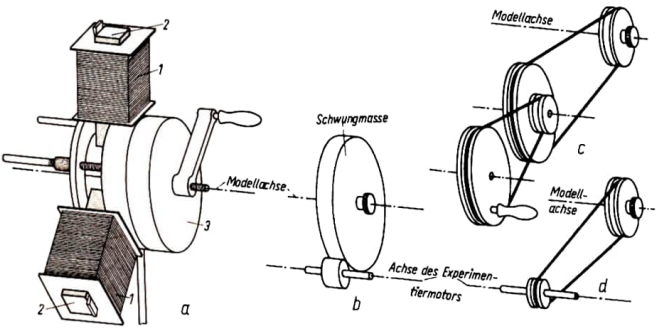


Abb. 3.0.3./4 Antriebsmöglichkeiten des Generatormodells
a) Handkurbel, b) Friktionsantrieb,
c) Handantriebsvorrichtung, d) Antrieb durch Experimentiermotor

Aufbau des Modells

Der Zusammenbau des Gerätes erfolgt nach Abbildung 3.0.3./3. Die Spulen werden auf die festgeklammerten I-Kerne geschoben und mit einem kleinen Holzkeil leicht verklemmt. Als Anker kann entweder der drehbare Magnet in das Lager eingesetzt werden (Abb. 3.0.3./3a), oder man verwendet einen Doppel-T-Anker. Dann muß man allerdings zur Stromzuführung über die Schleifringe noch zwei Bürsten an den herausragenden Enden der Haltebolzen befestigen (Abb. 3.0.3./3b).

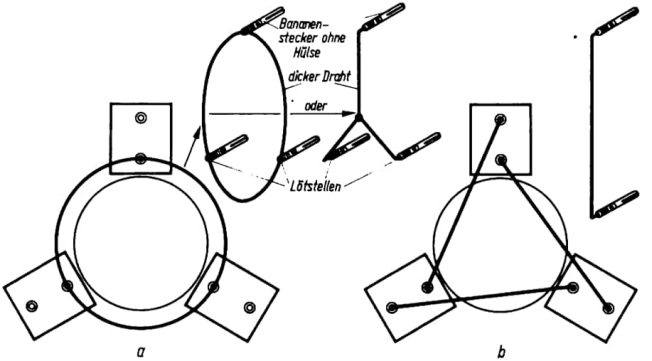


Abb. 3.0.3./5 Schaltungsmöglichkeiten durch starre Verbindungen
a) Sternschaltung, b) Dreieckschaltung

Die Drehung des Ankers zum Erzeugen von Drehstrom niedriger Frequenz kann durch eine einfache Handkurbel (Abb. 3.0.3./4a) oder durch Friktionsantrieb (Abb. 3.0.3./4b) mit Hilfe eines Experimentiermotors vorgenommen werden.
Zum Erzeugen von Wechselströmen größerer Frequenz kann man die Handantriebsvorrichtung (Abb. 3.0.3./4c) oder einen Experimentiermotor mit Riemenantrieb (Abb. 3.0.3./4d) verwenden.
Das Modell des Drehstromgenerators kann in Stern- oder in Dreieckschaltung arbeiten. Starre Schaltverbindungen erhöhen die Übersichtlichkeit der Versuchsanordnung (Abb. 3.0.3./5).
Der Wirkungsgrad des Modells ist wegen des nicht abgeschlossenen Eisenweges nur gering. Er läßt sich dadurch verbessern, daß man außen einen Weicheisenring herumlegt. Diesen fertigt man mit einem Innendurchmesser von etwa 260 mm aus einigen ungefähr 820 mm langen und etwa 30 mm breiten Weicheisenblechstreifen, die man zusammennietet. Durch Herumlegen des Eisenringes um die äußeren Pole der I-Kerne schließt man den Eisenweg (Abb. 3.0.3./6).

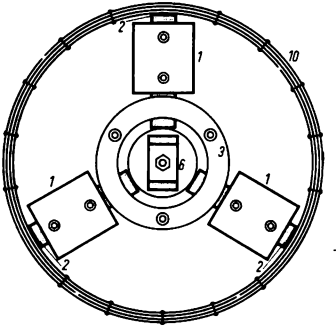


Abb. 3.0.3./6
Modell mit geschlossenem Eisenring

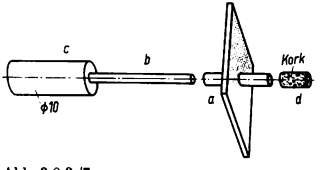


Abb. 3.0.3./7
Leichtbewegliche Magnetnadel mit Achse

Material für leicht drehbare Magnetnadel

a) Messingröhrchen
b) Messingachse
c) Metallrundstab (∅ 10 mm) als Achse für Magnetnadel
d) kleiner Kork

Anfertigung der leicht drehbaren Magnetnadel

Eine kleine Magnetnadel wird nach Entfernen des Hütchens auf ein kleines Messingröhrchen gekittet oder gelötet (Abb. 3.0.3./7). Das Messingröhrchen paßt auf eine Messingachse, die an einem 10 mm dicken Metallrundstab befestigt ist. Der

Rundstab dient zum Einsetzen der leicht drehbaren Magnetnadel in das Lager der Haltevorrichtung. Ein kleines Korkstück, das auf die Achse gedrückt wird, verhindert das Herabfallen der Magnetnadel. Die Magnetnadel muß gut ausgewuchtet sein. Das geschieht in Ost-West-Richtung durch Auftragen von etwas Lötzinn auf die leichtere Nadelseite. Vor dem Versuch wird die Magnetnadel in einem starken Magnetfeld kräftig magnetisiert.

Material für Induktionsläufer

a) Aluminium- oder Messingscheibe (∅ 60 mm, Dicke 5 mm)
b) 2 Messingröhrchen
c) 2 Messingachsen
e) 2 Hartpapierscheiben (∅ 60 mm)
f) Kupfer- oder Messingdraht (∅ 4 mm, Länge etwa 1000 mm)
g) Weicheisenblech
h) Welle für drehbaren Magneten

Anfertigung der Induktionsläufer

Auf die Achse der leicht drehbaren Magnetnadel wird eine 5 mm dicke Aluminium- oder Messingscheibe mit einem Durchmesser von 60 mm und einem eingekitteten oder eingelöteten Röhrchen geschoben und durch einen Kork in der Mittelebene der I-Kerne fixiert (Abb. 3.0.3./8a). Der Läufer muß gut ausgewuchtet sein.

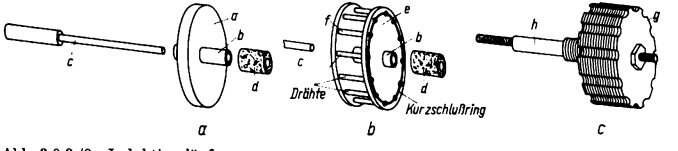


Abb. 3.0.3./8 Induktionsläufer.
a) Wirbelstromläufer,
b) Läufer ohne Eisenkern,
c) Läufer mit Eisenkern.
(Der Käfig ist bei c) fortgelassen.)

Einen einfachen Käfigläufer stellt man nach Abbildung 3.0.3./8b aus 4 mm dicken Kupfer- oder Messingdrähten her, die in die Bohrungen zweier Hartpapierscheiben eingeschoben und an der Vorder- und Hinterseite mit je einem Drahtring verlötet werden. Die beiden Hartpapierscheiben sind mit einem Messingröhrchen verkittet, das auf die Achse der leicht beweglichen Magnetnadel paßt.
Man kann auch einen Induktionskäfigläufer mit Eisenkern herstellen. Der Kern besteht aus Weicheisenblechen, die auf der Welle des drehbaren Magneten befestigt werden können. Der Käfig wird ebenfalls aus Kupfer- oder Messingdrähten gefertigt (Abb. 3.0.3./8c).

3.1. Generatoren und Motoren für Gleichstrom und für Wechselstrom

3.1.1. Modell eines Generators mit Permanentmagnet

Zu Versuch 1

1. 2 Spulen (500 Wdg. und 125/250 Wdg.)
2. Spulenklammer
3. I-Kern
4. 4 Stabmagnete
5. Spannungsmesser (100 mV — ; Nullpunktmittellage)
6. 2 Wägestücke (1 kg)

Zu Versuch 2 und 3

7. Hufeisenmagnet
8. Polschuhpaar mit Lager, Bürstenhalter und Bürsten
9. Grundbrett mit Spannvorrichtung
10. Leiterschleife
11. eisenloser Anker
12. Doppel-T-Anker
13. Handantriebsvorrichtung
14. Spannungsmesser (10 V ~)
15. Glühlampe (4 V; 0,3 A) oder anstelle von 7. bis 12.
16. Generator-Motor-Modell (permanentmagnetische Polschuhe)

Methodische Hinweise

1. Diese Versuche knüpfen an V 2.1.2. und V 2.1.4. an und führen schrittweise von dem dort untersuchten Prinzip der Erzeugung von Induktionsspannungen durch Drehbewegungen zur technischen Erzeugung von Wechsel- und Gleichspannungen.
2. Der Versuch 1 sollte einführend zur Problemstellung gezeigt werden. Er ist eine Umkehrung von V 1.3.9. und macht von Anfang an die Umkehrbarkeit von Generator und Motor deutlich.
3. Zum in Versuch 3 verwendeten Kommutator siehe Erläuterungen in V 3.1.9.

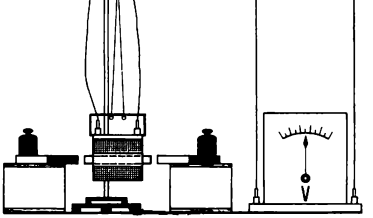


Abb. 3.1.1./1 Versuchsaufbau zum Drehen einer Spule zwischen zwei Stabmagneten

Versuch 1: Vorversuch mit einer sich drehenden Spule

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.1.1./1. Man dreht die Spule etwa zehnmal zwischen den Stabmagneten um sich selbst, wobei der Faden und die Verbindungsleiter verdrillt werden. Beim Loslassen dreht sich die Spule in umgekehrter Richtung. Am Meßgerät ist abwechselnd ein Ausschlag des Zeigers nach beiden Seiten zu beobachten. Man verwendet nacheinander Spulen mit 125 Wdg., 250 Wdg. und 500 Wdg. Der Ausschlag des Zeigers wird mit zunehmender Windungszahl größer. Erhöht man die Feldstärke, indem man je zwei Stabmagnete mit gleichen Polen aufeinanderlegt, so nimmt der Ausschlag des Zeigers zu.
Man setzt in die Spulenöffnung einen Eisenkern ein und beschwert die beiden Stabmagnete durch je ein Wägestück, damit sie festliegen. Beim Drehen der Spule sind wesentlich größere Zeigerausschläge zu beobachten.
Der Versuch kann gut mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre durchgeführt werden (Abb. 3.1.1./2).

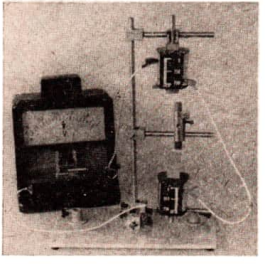


Abb. 3.1.1./2
Modell eines Wechselstromgenerators mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre

Versuch 2: Modell eines Wechselstromgenerators

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.1.1./3 oder 3.1.1./4. Man verwendet den Doppel-T-Anker und entnimmt die Spannung über die beiden Schleifringe. Dreht man den Anker langsam, so ist am Spannungsmesser (100 mV —) ein deutlich sichtbarer Ausschlag des Zeigers zu beobachten, der nach beiden Seiten hin- und herpendelt. Es wird eine Wechselspannung induziert.
Mit Hilfe der Handantriebsvorrichtung setzt man den Anker in schnelle Umdrehung. Der Spannungsmesser muß durch ein Gerät für Wechselspannungen (10 V ~)

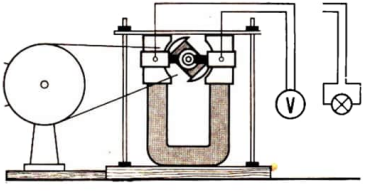


Abb. 3.1.1./3
Modell eines magnetelektrischen Generators

ersetzt werden. Wählt man als Anzeigegerät eine Kleinspannungsglühlampe, so leuchtet sie je nach der Drehzahl mehr oder weniger hell.
Verwendet man den eisenlosen Anker, so erhält man nur einen geringfügigen Zeigerausschlag; die Glühlampe leuchtet nicht.

Versuch 3: Modell eines Gleichstromgenerators

Der Versuchsaufbau wird nach Abbildung 3.1.1./3 oder 3.1.1./4 vorgenommen. Es werden die beiden Bürsten an den Kommutator gelegt. Nacheinander werden die Leiterschleife, der eisenlose Anker und der Doppel-T-Anker verwendet, wobei jedesmal eine größere Induktionsspannung erreicht wird (Spannungsmesser 100 mV ... 10 V —).

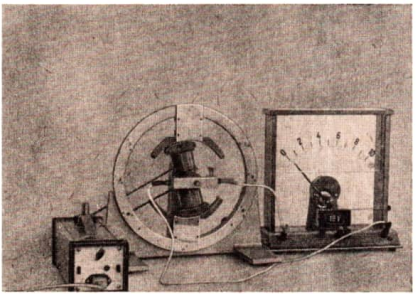


Abb. 3.1.1./4
Versuchsaufbau mit Generator-Motor-Modell

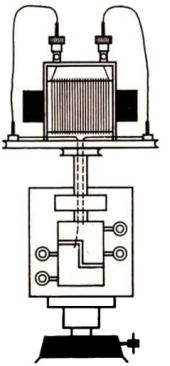


Abb. 3.1.1./5
Polwendeschalter mit Spulenhalter und Spule

Man dreht den Doppel-T-Anker mit der Hand und erreicht dadurch ein Pendeln des Zeigers zwischen der Nullage und dem Höchstwert auf einer Seite. Beim Ändern der Drehrichtung wechselt auch die Richtung des Zeigerausschlages. Es fließt ein stark pulsierender Gleichstrom.
Treibt man das Modell mit Hilfe der Handantriebsvorrichtung an, so erzielt man auch mit der Leiterschleife und der eisenlosen Spule deutlich sichtbare Zeigerausschläge. Beim Verwenden des Doppel-T-Ankers leuchtet eine angeschlossene Kleinspannungsglühlampe hell auf.

Bemerkungen

1. Die Versuche sind auch übersichtlich unter Verwendung der Kombination eines Polwendeschalters und eines Spulenhalters durchzuführen (Abb. 3.1.1./5).
2. In den Versuchen 2 und 3 kann man einen Katodenstrahloszillografen anschließen, um die Wechselspannung und ihre Gleichrichtung durch den Kommutator zu zeigen. Dann ist es zu empfehlen, die Generatormodelle mit einem Experimentiermotor anzutreiben, damit man bei konstanter Drehzahl leichter ein stehendes Bild einstellen kann. Die Kurven werden annähernd sinusförmig, wenn das Modell mit einer Glühlampe belastet wird.

3.1.2. Untersuchung der Wechselspannungskurve mit dem Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes

1. Stromversorgungsgerät (18 V —)
2. Gerät zum Nachweis des Induktionsgesetzes
3. Spannungsmesser (100 mV — ; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Nach der Einführung des Generatorprinzips mit V 3.1.1. ist durch diesen Versuch der Zusammenhang zwischen Magnetflußänderung und Induktionsspannung genauer zu untersuchen. Versuch 1 ermöglicht, die qualitativen Betrachtungen zu vertiefen. Versuch 2 gibt in der Abiturstufe die Möglichkeit einer quantitativen Auswertung, erfordert aber ein höheres Abstraktionsvermögen.

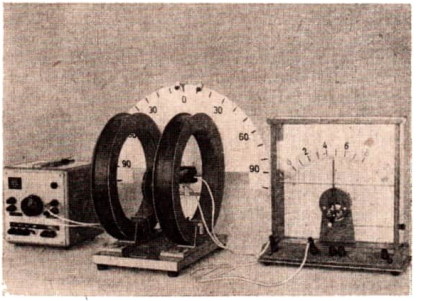


Abb. 3.1.2./1
Versuchsaufbau zur Aufnahme der Sinuskurve

Versuch 1: Qualitative Untersuchung

Die Feldspulen des Gerätes werden an eine Gleichspannung von 18 V gelegt. Als drehbare Induktionsspule wird die Spule mit 600 Wdg. und 60 cm^2 eingesetzt und mit dem Spannungsmesser verbunden (Abb. 3.1.2./1). Die Anschläge zur Begrenzung des Drehwinkels werden zunächst auf 0° und 10° festgeklemmt. Die Spule wird um diesen Winkel aus der Nullstellung schnell gedreht, der Anschlag abgelesen und in eine Tabelle eingetragen. Der Anschlag wird von 10° auf 20° und später jeweils um 10° weitergerückt. Jedesmal wird die Spulendrehung von der Nullstellung bis zu diesem Anschlag mit möglichst gleicher Geschwindigkeit ausgeführt. In der Tabelle erhält man annähernd die Spannungen, die bei einer fortlaufenden Drehbewegung bis zu dem jeweiligen Drehwinkel induziert werden. Die aufgenommene Kurve zeigt zwar prinzipiell den Verlauf der Wechselspannung während der Vierteldrehung, weicht aber von der Sinuskurve ab. Zur Ergänzung dieser Kurve auf eine volle Periode kann man den Versuch fortführen, indem man die Winkelskale entfernt und die Spule um 360° dreht. Der Ausschlag des Meßgerätes durchläuft eine volle Schwingungsperiode.

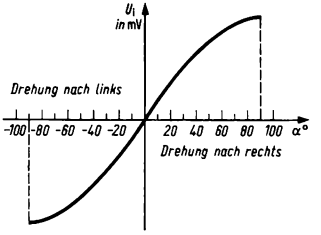


Abb. 3.1.2./2
Kurve der Wechselspannung

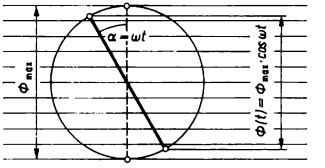


Abb. 3.1.2./3
Magnetflußänderung beim Umpolen des Magnetfeldes an einer ruhenden Spule

Versuch 2: Quantitative Untersuchung

Der Aufbau entspricht Versuch 1, aber der Zeiger wird bei einer Stellung der Windungsebene der Spule parallel zum Erregerfeld auf 0° festgelegt, so daß Windungsebene und Zeiger senkrecht zueinander stehen. Man erzeugt Induktionsspannungsstöße ($U \cdot \Delta t$), indem man das Magnetfeld bei verschiedenen Drehwinkeln α der Spule gegenüber dem Magnetfeld durch den Umschalter am Gerät umpolt. Dabei beträgt die Magnetflußänderung jedesmal:
$\Delta\Phi = 2\Phi_{max} \cdot \sin\alpha$ (Abb. 3.1.2./3). Nach dem Induktionsgesetz ergibt sich mit einer mittleren Induktionsspannung U_i ein Betrag des Induktionsspannungsstoßes: $|U_i \cdot \Delta t| = |N \cdot \Delta\Phi|$.
Bei 600 Wdg. ist dieser gleich: $|U_i \cdot \Delta t| = |1200 \cdot \Phi_{max} \cdot \sin\alpha|$.
Die Dauer des Umpolvorganges Δt ist bei allen Teilversuchen konstant. Bei $\alpha = 90°$ wird der maximale Spannungsstoß erreicht: $|(U_i \cdot \Delta t|)_{max} = |1200\,\Phi_{max}|$.
Der Quotient aus den Meßwerten der Spannungsstöße und dem Maximalwert ergibt mit guter Genauigkeit die Werte von $\sin\alpha$ (s. Tabelle).

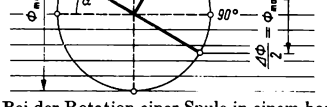


Abb. 3.1.2./4
Magnetfluß-Zeit-Diagramm an einer rotierenden Spule

Bei der Rotation einer Spule in einem homogenen Magnetfeld ist der von der Spule umschlossene Magnetfluß eine Funktion der Zeit (Abb. 3.1.2./4):

$$\Phi(t) = \hat{\Phi} \cdot \cos\omega t\,.$$

Nach dem Induktionsgesetz gilt für den Betrag der Funktionswerte der Induktionsspannung:

$$|u(t)| = \left|N \frac{d\Phi(t)}{dt}\right|$$

$$|u(t)| = |600 \cdot \Phi_{max} \cdot \omega \cdot \sin\omega t|$$

$|U_i \cdot \Delta t|$ ist proportional zu $|u(t)|$, wenn die Winkelgeschwindigkeit ω konstant ist und $\omega t = \alpha$, denn der Quotient aus beiden ist konstant.

$$\frac{|U_1 \cdot \Delta t|}{|u(t)|} = \frac{1200 \cdot \Phi_{max} \cdot \sin\alpha}{600 \cdot \Phi_{max}\omega \sin\omega t}$$

$$\frac{|U_1 \cdot \Delta t|}{|u(t)|} = \frac{2}{\omega}$$

$$|u(t)| = \frac{\omega}{2} \cdot |U_1 \Delta t|.$$

Damit sind die im Versuch bestimmten Spannungsstöße mit $\frac{\omega}{2}$ zu multiplizieren, um den Betrag des Augenblickswertes der Induktionsspannung $u(t)$ zu erhalten, wenn diese mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit $|\omega|$ gedreht wird und um den Winkel $\alpha = \omega t$ aus der Stellung senkrecht zum Magnetfeld entfernt ist.

Tabelle der Meßwerte, der errechneten und der Tafelwerte von sin α

α	$\lvert U_1 \cdot \Delta t\rvert$ in Skt.	$\frac{\lvert U_1 \cdot \Delta t\rvert_{max}}{\lvert U \cdot \Delta t\rvert}$	sin α
0°	0	0	0
10°	4,0	0,17	0,1736
20°	8,0	0,35	0,3420
30°	11,5	0,50	0,5000
40°	14,7	0,64	0,6428
50°	17,0	0,74	0,7660
60°	20,0	0,87	0,8660
70°	21,5	0,94	0,9397
80°	22,3	0,97	0,9848
90°	23,0	1,00	1,0000

3.1.3. Modell eines Generators mit fremderregtem Feldmagneten

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. U-Kern, geblättert
3. Polschuhpaar mit Lager, Bürstenhalter und Bürsten
4. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
5. Doppel-T-Anker
6. Trommelanker
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Handantriebsvorrichtung
9. Spannungsmesser (10 V)
10. Glühlampe (4 V; 0,3 A) oder an Stelle von 2. bis 7.
11. Generator-Motor-Modell (2 × 1200 Wdg.)

Methodischer Hinweis

Diese Versuche sind im Anschluß an V 3.1.1. einzusetzen und sollen die größeren Induktionsspannungen zeigen, die in stärkeren Feldern entstehen.

Versuch 1: Der Gleichstromgenerator

Der Aufbau des Modells wird nach Abbildung 3.1.3./1 oder 3.1.3./2 vorgenommen. Die beiden Feldspulen werden hintereinandergeschaltet und an eine Gleichspannung von 4 V ... 10 V gelegt. Die beiden Bürsten schließt man an den Kommutator an. Man setzt den Anker durch die Handantriebsvorrichtung in Umdrehung. Der Zeiger des Meßgerätes schlägt nach einer Seite aus. Die induzierte Spannung ist umso höher,

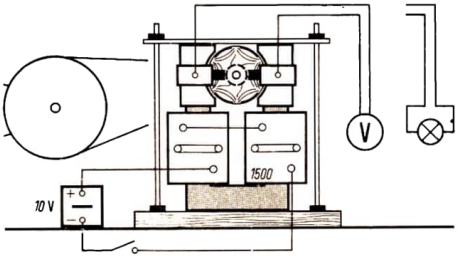


Abb. 3.1.3./1
Aufbau des Gleichstromgenerators mit fremderregter Feldspule

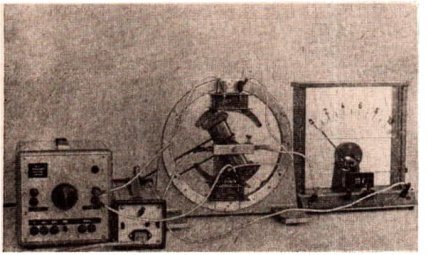


Abb. 3.1.3./2
Versuchsaufbau mit Generator-Motor-Modell

a) je schneller die Umdrehung des Ankers erfolgt und
b) je höher die Erregerstromstärke ist.
Beim Verwenden des Doppel-T-Ankers schwankt der Zeiger des Meßgerätes bei mäßiger Drehzahl zwischen der Nullage und dem Höchstwert. Eine angeschlossene Kleinspannungsglühlampe flackert stark. Bei größerer Drehzahl wird das Schwanken des Zeigers bzw. das Flackern der Lampe geringer.
In einem Trommelanker entsteht eine weniger stark pulsierende Gleichspannung, weil sich hier die phasenverschobenen Spannungen der Wicklungen addieren. Das Meßgerät zeigt bei mäßiger Drehzahl fast einen konstanten Ausschlag. Eine angeschlossene Glühlampe leuchtet gleichmäßig hell.

Versuch 2: Der Wechselstromgenerator

Man behält den unter 1 beschriebenen Versuchsaufbau bei und legt die Bürsten an die Schleifringe. Es läßt sich nur der Doppel-T-Anker verwenden. An einem Spannungsmesser (10 V ~) oder an dem Helligkeitsgrad einer angeschlossenen Kleinspannungsglühlampe läßt sich die Steigerung der Induktionsspannung nachweisen. Mit zunehmender Drehzahl leuchtet die Lampe heller und gleichmäßiger. Vergleicht man die Beträge der Induktionsspannungen, die man bei gleichen Drehzahlen erreicht, mit den Spannungen des in V 3.1.1. beschriebenen Generatormodells, so ist eine wesentliche Vergrößerung der Spannung zu erkennen. Dies

wird durch das erheblich stärkere Feld des Feldmagneten erreicht. Die Erregung kann nicht beliebig vergrößert werden, da sich der Anker dann nicht drehen läßt.

Bemerkung

Vergleiche V 3.1.1., Bemerkung 2!

Hochspannung

3.1.4. Modell eines Wechselstromgenerators als Innenpolmaschine

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. U-Kern, geblättert
3. Polschuhpaar mit Lager, Bürstenhalter und Bürsten
4. 1 oder 2 Spulen (15000 Wdg.)
5. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
6. Doppel-T-Anker
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Handantriebsvorrichtung
9. 2 Holtzsche Klemmen
10. Steckspitzen zur Funkenstrecke
11. Geißler- bzw. Spektralröhre
12. Glimmlampe oder an Stelle von 2. bis 7.
13. Generator-Motor-Modell (2 × 1200 Wdg.)

Methodischer Hinweis

Für die Wechselstromgeneratoren wird die Entwicklungsreihe mit diesem Versuch abgeschlossen. Es werden bewußt hohe Spannungen erzeugt, um den Grund für die Innenpolkonstruktion technischer Großgeneratoren deutlich werden zu lassen.

Versuchsanordnung

Unter Verwendung der angegebenen Geräte erfolgt der Aufbau nach Abbildung 3.1.4./1 oder mit dem Generator-Motor-Modell in entsprechender Weise. Man schaltet die Spulen hintereinander und führt von den freibleibenden Klemmen eine Verbindung zu je einer Holtzschen Klemme. An die Schleifringe des Ankers wird eine Gleichspannung von 6 V ... 10 V gelegt.

Versuch

Es muß überzeugend nachgewiesen werden, daß mit dieser Maschine eine Hochspannung erzeugt wird. Beim Verwenden zweier Spulen mit je 15000 Wdg. springen an den in die Holtzschen Klemmen gesteckten Spitzen, deren Abstand nur 1 mm .. 2 mm betragen darf, Funken über, die man in einem verdunkelten Raum gut beobachten kann. In einem halbverdunkelten Raum genügt es, die Fußklem-

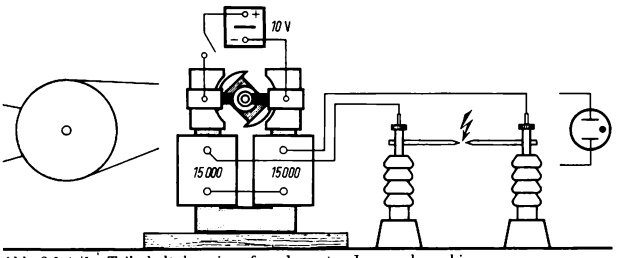


Abb. 3.1.4./1 Teilschaltplan einer fremderregten Innenpolmaschine

men in eine innen geschwärzte Kiste ohne Vorderwand zu stellen.
Steht nur eine Spule mit 15000 Wdg. zur Verfügung, so hängt man zwischen die beiden Holtzschen Klemmen eine Spektral- oder eine Geißlerröhre. Beim Drehen der Antriebsvorrichtung leuchtet die Röhre auf.
Sind nur Spulen mit 1500 Wdg. vorhanden oder wird das Generator-Motor-Modell mit den Spulen 1200 Wdg. verwendet, so läßt sich eine an Stelle der Funkenstrecke geschaltete Glimmlampe zum Leuchten bringen. Die Induktionsspannung beträgt dabei etwa 100 V.
Es ist darauf zu achten, daß der Anker in der Ruhestellung senkrecht steht. Beim Verwenden von pulsierendem Gleichstrom wirkt der Versuchsaufbau als Transformator, die Glimmlampe leuchtet auch bei Stillstand des Ankers.

Bemerkung

Als Vorversuch kann man das Prinzip der Innenpolmaschine zeigen, indem man zwischen zwei in Reihe geschalteten mit 1500 Wdg. in einem Tonnenfuß auf einem kurzen Stativstab mit Endklemme einen Stabmagneten drehbar lagert. An die Spulen schließt man einen Spannungsmesser (10 V — ; Nullpunktmittellage) an.

3.1.5. Modell eines Nebenschluß- und Reihenschlußgenerators für Gleichstrom

1. Stromversorgungsgerät
2. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
3. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. Polschuhpaar mit Lager, Bürstenhalter und Bürsten
6. Doppel-T-Anker
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Handantreibsvorrichtung
9. Strommesser (50 mA — und 5 A —) oder Vielfachmeßgerät
10. Glühlampe (4 V; 0,3 A)
11. 2 Spulen (15000 Wdg.) oder an Stelle von 2. bis 7.
12. Generator-Motor-Modell

Methodischer Hinweis

Obwohl die Modelle selbsterregter Generatoren sehr schlechte Wirkungsgrade haben und nur kleine elektrische Leistungen abgeben, ist die Vorführung dieser Versuche im Unterricht wichtig, weil sie das Prinzip einer der bedeutsamsten technischen Erfindung zeigen, durch die die Gewinnung von Elektroenergie in großem Maßstab möglich wurde.

Vorbemerkungen

Nach dem dynamoelektrischen Prinzip wird das Feld durch den erzeugten Strom selbst erregt. Zu Beginn der Rotation des Ankers wird durch den Restmagnetismus eine kleine Spannung induziert. Dieser Restmagnetismus ist beim Aufbaumodell meist nicht vorhanden. Man läßt das Modell deshalb vor dem Unterricht kurze Zeit als Motor laufen. Beim Verwenden als Generator muß die Drehrichtung beibehalten werden, die der Anker beim Motor ausführte, damit der Restmagnetismus nicht vernichtet wird. Den Restmagnetismus weist man durch Eisenfeilspäne nach, die am Eisenkern der Spule haften bleiben.

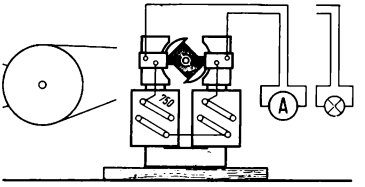


Abb. 3.1.5./1
Aufbau eines Gleichstrom-Nebenschlußgenerators

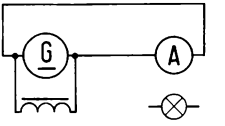


Abb. 3.1.5./2
Schaltplan eines
Nebenschlußgenerators

Versuch 1: Gleichstrom-Nebenschlußgenerator

Der Aufbau erfogt nach Abb. 3.1.5./1. Die beiden Spulen werden mit 750 Wdg. eingesetzt. Sie werden mit dem einen Buchsenpaar der Bürstenhalter verbunden. Abb. 3.1.5./2 zeigt den Gleichstrom-Nebenschlußgenerator im Schaltplan.
Zu Beginn des Versuchs dreht man die Handantriebsvorrichtung gleichmäßig und recht langsam. Der Zeiger eines angeschlossenen Strommessers kriecht langsam von der Nullage bis zu einem Höchstwert. Auf diesem bleibt der Zeiger dann bei gleichbleibender Drehzahl stehen. Erst beim Vergrößern der Drehzahl steigt der Wert weiter an. An Stelle des Meßgerätes kann man auch eine Kleinspannungsglühlampe verwenden.
Zum Nachweis, daß nur ein Bruchteil des Gesamtstromes durch die Feldspulen fließt, muß die Maschine der technischen Ausführung angepaßt werden. Als Feldspulen sind solche mit 1500 Wdg. zu verwenden. Der Belastungswiderstand darf nicht mehr als 3 Ω betragen. Es eignet sich dafür die Punktlichtlampe 6 V; 5 A. Mit einem Strommesser von 5 A im Hauptstromkreis und mit einem Strommesser von 50 mA im Nebenstromkreis werden die Stromstärken gemessen.
Schaltet man zwei oder drei Widerstände von je 1 Ω ... 3 Ω parallel in den Hauptstromkreis, so sinkt durch die wachsende Stromstärke die Klemmenspannung ab.

Versuch 2: Gleichstrom-Reihenschlußgenerator

Die Spulen werden gegen solche mit 125 Wdg. ausgetauscht. Anker und Feldwicklung werden in Reihe geschaltet (Abb. 3.1.5./3). Der gesamte Induktionsstrom durchfließt die Feldspulen.
Das charakteristische Verhalten dieser Maschine, bei der die Klemmenspannung mit wachsender Belastung ansteigt, läßt sich an dem Modell nicht zeigen. Die

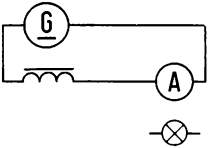


Abb. 3.1.5./3 Schaltplan eines
Reihenschlußgenerators

Leistung des Modells ist so gering, daß sie gerade ausreicht, eine Kleinspannungsglühlampe zum Leuchten zu bringen. Schaltet man mehrere Lampen parallel, so bricht die Spannung zusammen.

Bemerkungen

1. Beim Aufbau mit dem Generator-Motor-Modell sind für den Reihenschlußmotor die Spulen mit 300 Wdg. und für den Nebenschlußmotor die Spulen mit 1200 Wdg. zu verwenden.
2. Vergleiche V 3.1.1., Bemerkung 2!

3.1.6. Modelle verschiedener Gleichstrommotoren

Zum Vorversuch

1. Stromversorgungsgerät (10 V ... 20 V —)
2. Grundbrett
3. Polwendeschalter
4. Spule (250/750 Wdg.)
5. I-Kern, hohl
6. 2 Permanentmagnete

Zu Versuch 1

7. Doppel-T-Anker
8. U-Kern, geblättert
9. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
10. Strommesser (5 A)
11. 2 Gleitwiderstände (110 Ω)
12. Holzleiste (400 mm × 20 mm × 10 mm) zum Selbstbau der Bremsvorrichtung Ⓢ
13. Sperrholzrädchen zum Selbstbau der Bremsvorrichtung Ⓢ
14. Wägestücke (0,5 kg, 1 kg, 2 kg)

Zu Versuch 2 und 3

Geräte 1., 3. bis 12., außerdem

15. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
16. Gleitwiderstand (18 Ω)

Methodische Hinweise

1. Es ist zweckmäßig, das Motorprinzip ausgehend von V 1.3.9. zunächst durch den Vorversuch mit permanenten Magneten zu erläutern. Dabei kann man zur Erklärung der Bedeutng des Kommutators für die fortlaufende Drehbewegung das Modell nach V 3.1.9. heranziehen.
2. Durch die anschließenden Teilversuche sind die Konstruktion, die Schaltung und das Verhalten der verschiedenen Gleichstrommotoren zu untersuchen und zu vergleichen. Die Modelle zeigen dabei nur annähernd das Verhalten technischer Motoren. Das Generator-Motor-Modell ist besser geeignet als das Modell aus Teilen des Aufbausatzes.

Vorversuch: Modell eines Motors mit permanentem Feldmagneten

Der Aufbau des Modells erfolgt nach Abb. 3.1.6./1 oder mit dem Generator-Motor-Modell (Abb. 3.1.1./4). Man verwendet einen Doppel-T-Anker. An die Bürsten wird eine Gleichspannung von 10 V angeschlossen. Man stellt den Anker vertikal, wodurch das Modell besser anläuft.
Schließt man den Stromkreis, so setzt sich der Anker in Bewegung.

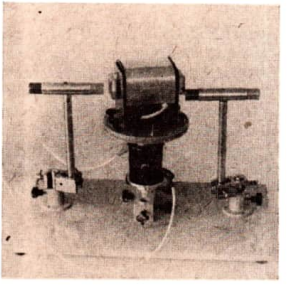


Abb. 3.1.6./1
Aufbau des Modells eines Gleichstrommotors mit permanentem Feldmagneten aus dem Aufbausatz Elektrizitätslehre

Versuch 1: Modell eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors

Zum Versuchsaufbau siehe Abbildung 3.1.6./2. In das Generator-Motor-Modell sind die Spulen mit 1200 Wdg. einzusetzen. Die Anfänge der Spulen verbindet man durch je eine Leitung mit einem Buchsenpaar der Bürstenhalter. In den Ankerstromkreis legt man einen Gleitwiderstand von etwa 110 Ω.
Die Belastungsvorrichtung (Abb. 3.1.6./4) besteht aus einer am Ende durchbohrten Leiste, die mit Hilfe eines Lagerzapfens und einer Kreuzmuffe am Stativ befestigt wird. Etwa in der Mitte schraubt man ein Holzrädchen an, das auf die Schnurlaufrolle drückt. Am anderen Ende befestigt man einen Haken zum Anhängen der Wägestücke.

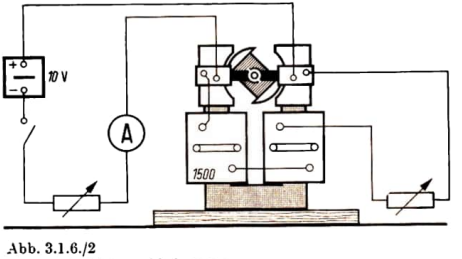


Abb. 3.1.6./2
Aufbau des Nebenschlußmotors

Anlassen des Motors

Der Vorwiderstand des Ankerstromkreises, der sogenannte Anlasser, wird zu Beginn des Versuches voll eingeschaltet. Dadurch wird der Ankerstrom, der sonst sehr stark anwachsen würde, begrenzt. Mit zunehmender Drehzahl wächst die Gegenspannung im Anker. Man kann den Anlasser allmählich ausschalten.

Leerlauf und Belastung des Motors — Drehzahlregelung

Läßt man den Motor unbelastet laufen, so stellt sich die Drehzahl auf einen bestimmten Wert ein, der sich als nahezu konstant erweist. Belastet man den Motor durch Anhängen von Wägestücken an die Bremsvorrichtung, so sinkt die Drehzahl nur wenig. Man kann sie dadurch verändern, daß man in den Feldstromkreis in Reihe mit dem Feldmagneten einen Gleitwiderstand, den sogenannten Feldregler, legt. Ist die Drehzahl abgesunken, so kann man sie in beschränktem Maße wieder steigern, indem man den Widerstand des Feldreglers vergrößert und dadurch die Feldstromstärke verkleinert. Die Drehzahl erhöht sich dadurch wieder (Abb. 3.1.6./5), bis im Anker die der Belastung entsprechende Gegenspannung induziert wird.

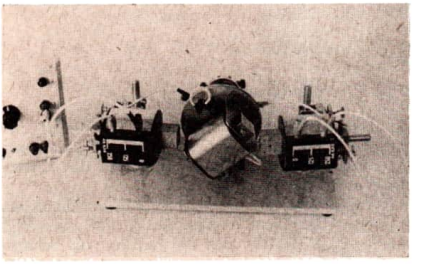


Abb. 3.1.6./3
Aufbau des Modells eines Gleichstrommotors mit elektrischer Felderregung aus dem Aufbausatz Elektrizitätslehre

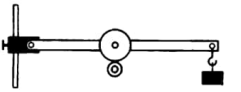


Abb. 3.1.6./4
Belastungsvorrichtung

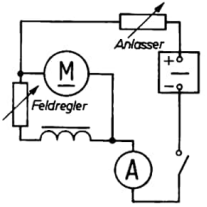


Abb. 3.1.6./5
Gleichstrom-Nebenschlußmotor

Ändern der Drehrichtung

Zum Verändern der Drehrichtung vertauscht man entweder die beiden Anschlüsse an den Bürsten oder an den Spulen. Es ist darauf zu achten, daß nur in einem Stromkreis die Richtung des Stromes geändert werden darf. Das Vertauschen der beiden gemeinsamen Hauptanschlüsse ändert die Drehrichtung nicht, weil dabei die Richtung des Stromes in beiden Stromkreisen gleichzeitig geändert wird. Dasselbe ist der Fall, wenn man den Motor an eine Wechselspannung anschließt. Anker- und Feldpole unterliegen dabei gleichzeitig der periodischen Änderung des Wechselstromes.

Versuch 2: Gleichstrom-Hauptschlußmotor

Der Aufbau erfolgt wie beim Nebenschlußmotor. Die Spulen werden gegen soche mit 250 Wdg. oder 300 Wdg. ausgetauscht. Sie werden mit dem Anker in Reihe geschaltet. In den Stromkreis legt man als Anlasser einen Gleitwiderstand von 18 Ω und einen Strommesser (Abb. 3.1.6./6).

Anlassen des Motors

Es fließt im Augenblick des Anlaufens ein Strom mit großer Stromstärke. Damit man sie in den zulässigen Grenzen hält, verwendet man einen Anlaßwiderstand, der mit steigender Drehzahl allmählich abgeschaltet wird. Der Motor läuft selbst bei stärkerer Belastung an. Man weist dies nach, indem man das Hebelende durch Körper mit einer Gewichtskraft von 5 N bis 20 N belastet.

Leerlauf und Belastung des Motors — Drehzahlregelung

Verringert man die Gewichtskraft am Hebelende, so wird sofort die Drehzahl größer; die Stromstärke wird kleiner. Bei völliger Entlastung vergrößert sich die Drehzahl sehr stark. Will man die Drehzahl unabhängig davon in bestimmten Grenzen verändern, so schaltet man einen Gleitwiderstand zur Feldspule parallel. Verkleinert man diesen Widerstand, so wird die Stromstärke im Feldmagneten kleiner, wodurch sich die Drehzahl vergrößert. Beim Vergrößern des Widerstandes tritt das Umgekehrte ein.
Über das Ändern der Drehrichtung gilt das gleiche wie beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

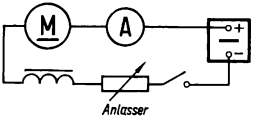


Abb. 3.1.6./6
Gleichstrom-Hauptschlußmotor

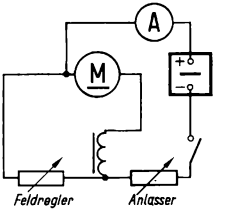


Abb. 3.1.6./7
Gleichstrom-Verbundmotor

Versuch 3: Modell eines Gleichstrom-Verbundmotors

Nach Abb. 3.1.6./7 schaltet man das Modell eines Verbundmotors zusammen. Für den einen Magnetpol schaltet man eine Feldspule mit 250 Wdg. in Reihe mit dem Anker, für den anderen eine Feldspule mit 750 Wdg., aber parallel zum Anker. Es ist darauf zu achten, daß die Magnetfelder der beiden Spulen den gleichen Richtungssinn haben. Zur ersten Spule schaltet man einen Gleitwiderstand von 110 Ω als Feldregler.
Man führt diesselben Untersuchungen durch wie bei den Versuchen 1 und 2. Es ergibt sich, daß die Drehzahl des Motors sich bei zunehmender Belastung nur wenig ändert.

Bemerkungen

1. Die Modelle können entsprechend Abbildung 3.1.1./5 auch mit Hilfe eines Polwendeschalters mit Spulenhalter aufgebaut werden, sind aber nicht belastbar.
2. Der Anlasser und der Feldregler werden in der Technik häufig zu einem Gerät vereinigt, so daß im ersten Teil des Widerstandes die Anlasserstufen, im zweiten Teil die Reglerstufen liegen. Diese können erst dann bedient werden, wenn die Anlasserstufen vollständig durchlaufen sind. Als Widerstände werden durchweg Drehwiderstände verwendet.
3. Untersuchungen des Wirkungsgrades von Motoren sind durchzuführen, indem man um die Schnurlaufrolle ein Bremsband (Gardinenschnur) legt, dessen Enden mit zwei Federkraftmessern (30 N) gespannt werden. Die vom Motor entwickelte Kraft ist gleich der Differenz der während des Laufens des Motors von den Kraftmessern angezeigten Kräfte ΔF. Die Geschwindigkeit ist zu berechnen als Produkt aus dem Umfang der Schnurlaufrolle $\pi \cdot d$ und der Drehzahl n, die man mit einem angekoppelten Drehzahlmesser bestimmt. Die abgegebene Leistung ist gleich dem Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit. Die aufgenommene Leistung ist gleich dem Produkt aus Spannung und Stromstärke. Der Wirkungsgrad η ergibt sich danach:

$$\eta = \frac{\Delta F \cdot \pi d n}{U \cdot I} .$$

Da die Wirkungsgrade von Modellen sehr schlecht sind, ist es günstiger, die Untersuchungen an einem technischen Motor auszuführen.

3.1.7. Der Gleichstrommotor als Generator

1. Stromversorgungsgerät
2. Hufeisenmagnet
3. Doppel-T-Anker
4. Polschuhpaar mit Bürstenhalter und Bürsten
5. Grundbrett mit Spannvorrichtung
6. Schwungscheibe
7. Hebelumschalter
8. 2 Glühlampen (4 V; 0,3 A)
9. Stoppuhr

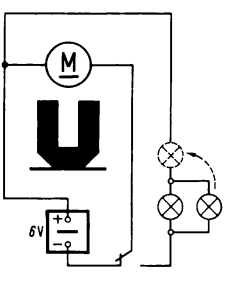


Abb. 3.1.7./1
Wechselweise Schaltung als Motor oder Generator

Methodischer Hinweis

Mit diesem Versuch wird die Umkehrbarkeit der Energieumwandlung im Motor und im Generator noch einmal besonders deutlich, die schon durch Vergleich von V 3.1.1. mit V 1.3.9. erklärt wurde.

Vorbemerkungen

Der Aufbau eines Motormodells erfolgt nach Abbildung 3.1.7./1. An Stelle der Schnurscheibe wird auf den Motor die Schwungscheibe aufgesetzt. Mit Hilfe eines Hebelumschalters läßt sich der Motor schnell zum Generator umschalten.

Versuch

Man legt den Hebelschalter so, daß der Stromkreis zwischen dem Stromversorgungsgerät und dem Motor geschlossen wird. Ist der Motor in vollem Lauf, so legt man den Schalter nach der entgegengesetzten Seite um. Es sind dann die Kleinspannungsglühlampen mit den Bürsten verbunden. Der Anker rotiert infolge der Trägheit weiter, es wird eine Spannung induziert; die angeschlossenen Lampen leuchten auf.
Nach kurzer Zeit erlöschen die Lampen, da der Anker zum Stillstand kommt. Er wird um so schneller abgebremst, je geringer der Widerstand der angeschlossenen Lampen und je größer somit die dem Anker entnommene Stromstärke ist. Man weist dies nach, indem man zuerst eine einzelne Lampe in den Stromkreis legt, dann zwei Lampen hintereinander- und schließlich zwei Lampen parallelschaltet. Zuletzt schließt man die beiden Anschlüsse kurz. In jedem Falle wird die Zeit vom Umschalten bis zum Stillstand der Schwungscheibe mit der Stoppuhr gemessen.

Technische Anwendungen

Man verwendet die soeben beschriebene Erzeugung eines Induktionsstromes und die damit verbundene Bremswirkung auf den Anker bei Straßenbahnen. Bei plötzlich auftauchenden Verkehrshindernissen schaltet man den Anker vom Netz ab und schließt ihn kurz. Auch zur Heizung der Straßenbahnen nutzt man die freiwerdende Bremsenergie aus.

3.1.8. Modell eines Wechselstrom-Synchronmotors

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (6 V — ; 20 V ~)
2. 2 Holtzsche Klemmen
3. große Kompaßnadel auf Nadelträger
4. Polwender
5. Gleitwiderstand (110 Ω)

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 2., außerdem

6. 2 I-Kerne, geblättert
7. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
8. kleine Kompaßnadel auf Nadelträger
9. 4 Rasierklingen zum Selbstbau eines Ankers Ⓢ
10. Kartonscheibe (⌀ 80 mm) Ⓢ

Methodischer Hinweis

Es soll demonstriert werden, daß die Polwendung mit Hilfe des Kommutators durch die Polwendung infolge der Wechselspannung ersetzt werden kann, wenn die Drehzahl des Motors dieser entspricht. Der Versuch ist auch als Vorversuch zum Drehfeld zu nutzen.

Versuch 1: Vorversuch zum Wechselstrom-Synchronmotor

Man kann den bekannten Oerstedschen Versuch zu einem Vorversuch zum Wechselstrom-Synchronmotor ausgestalten. Man stellt unter den Leiter den Nadelträger mit der großen Kompaßnadel (Abb. 3.1.8./1). Zwischen das Stromversorgungsgerät und den Versuchsaufbau legt man einen Polwender. Schließt man den Stromkreis, so schlägt die Kompaßnadel nach einer Seite aus. Die Stromstärke ist so einzustellen, daß die Ablenkung beinahe 90° beträgt. Infolge der Trägheit bewegt sich die Kompaßnadel beim Einschalten aber weiter. Schaltet man den Polwendeschalter im günstigen Augenblick um, so dreht sich die Nadel weiter nach der entgegengesetzten Seite des Leiters. Sie wird in ihrer Drehrichtung abgelenkt. Im geeigneten Augenblick muß man den Polwendeschalter erneut betätigen.
Indem man immer dann umschaltet, wenn sich die Nadel infolge der Trägheit ein wenig über die senkrechte Lage hinausgedeht hat, führt sie eine fortlaufende Drehbewegung aus.
Die Drehbewegung ist vom Schüler besser zu erkennen, wenn man an beide Nadelspitzen ein Papierfähnchen ansteckt oder auf einem Tageslichtschreibprojektor arbeitet.

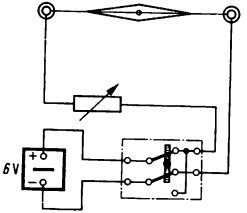


Abb. 3.1.8./1
Versuchsaufbau zur Drehung einer Magnetnadel durch ein Wechselfeld

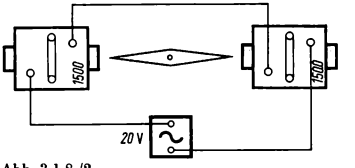


Abb. 3.1.8./2
Modell
eines Wechselstrom-Synchronmotors

Versuch 2: Modellversuch zum Wechselstrom-Synchronmotor

Zwei Spulen mit je 1500 Wdg. werden mit geblätterten I-Kernen versehen und so gegenübergestellt, daß sich eine dazwischen gestellte kleine Kompaßnadel frei drehen kann (Abb. 3.1.8./2). Die Spulen werden hintereinandergeschaltet und an eine Wechselspannung von 20 V mit einer Frequenz von 50 Hz angeschlossen. Durch einen Anstoß mit der Hand versetzt man die Nadel in schnelle Umdrehung und schaltet gleichzeitig die Wechselspannung ein. Dabei muß die Drehzahl der Nadel sehr hoch sein, wenn sie sich synchron mit dem Wechselfeld weiterdrehen soll. Damit man dies erreicht, bedarf es einiger Übung.

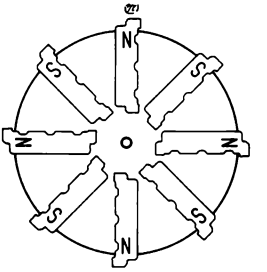


Abb. 1.3.8./3
Mehrpoliger Anker zum Wechselstromsynchronmotor

Leichter gelingt der Versuch mit einem mehrpoligen Anker (Abb. 3.1.8./3). Man halbiert vier magnetisierte Rasierklingen der Länge nach und klebt sie auf eine Scheibe aus Karton mit einem Durchmesser von 80 mm. Dabei muß immer ein Nordpol neben einem Südpol liegen. Im Mittelpunkt der Scheibe setzt man einen Druckknopf ein. Diese Scheibe läßt sich an Stelle der Kompaßnadel auf den Magnetnadelträger aufsetzen; die Drehzahl beträgt 12,5 s^{-1} bei der Frequenz von 50 Hz des Wechselstromes.

Bemerkungen

1. Ein Fahrraddynamo kann mit einer Wechselspannung von etwa 10 V nach diesem Prinzip als Synchronmotor betrieben werden.
2. Ein Synchronläufer kann auch auf folgende Weise gefertigt werden: Man durchbohrt den Boden und den Deckel einer flachen runden Eisenblechdose (Hautcremedose) im Mittelpunkt (Bohrung ∅ 4 mm). Auf die Mantelfläche der geschlossenen Dose klebt man mit einem Epoxidharzkleber mit wechselnder Polarität in gleichen Abständen 8 Manipermplättchen. Die Magnetpole kann man rot und blau kennzeichnen. Dieser Synchronläufer wird auf einem Achszapfen (∅ 4 mm) drehbar gelagert.

3.1.9. Modellversuch zum Kommutator

1. Kommutatormodell Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Brett — Ankerleiste (300 mm × 80 mm × 5 mm)
   b) Brett — Bürstenleiste (120 mm × 30 mm × 5 mm)
   c) 2 Bretter — Ankerpole (75 mm × 100 mm × 5 mm)
   d) 2 Bretter — Feldmagnetpole (60 mm × 120 mm × 10 mm)
   e) runde Holzscheibe — Kommutator (∅ 100 mm, Dicke 10 mm)
   f) 2 Kartonscheiben (∅ 110 mm)
   g) 2 Halbkreisscheiben aus Messingblech (∅ 110 mm)
   h) 2 Messingblechstreifen — Kommutatorbelag (170 mm × 20 mm)
   i) 4 Haltewinkel aus Messingblech (10 mm × 20 mm)
   j) 2 Muttern M 8
   k) Farradachsmutter
   l) 2 Farradspeichen (Bürsten)
   m) 2 Telefonbuchsen
   n) 2 Glimmlampen (Zylinderform)
   o) Widerstand (50 kΩ)
   p) dicker, isolierter Draht
2. Stromversorgungsgerät (200 V —)

Methodischer Hinweis

Obgleich der Selbstbau des Modells etwas schwierig ist, hat dieses doch einen großen Wert für die Erklärung der Wirkungsweise des Kommutators.

Herstellen des Modells (Abb. 3.1.9./1)

Aus der Holzscheibe e sägt man an den Enden einer Mittellinie je ein 10 mm breites Stück 15 mm tief heraus, das nach dem Aufziehen des Messingblechstreifens h

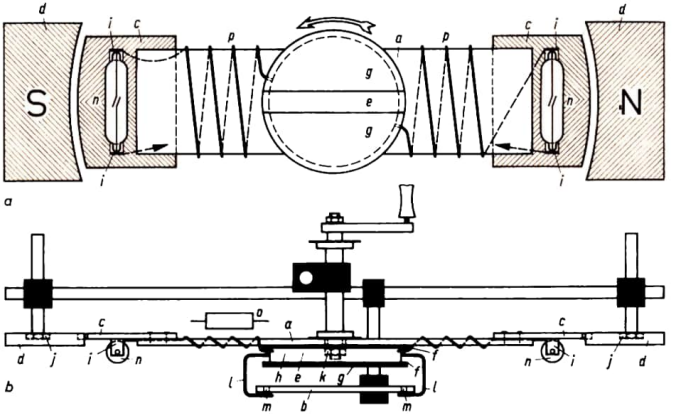


Abb. 3.1.9./1 Modell eines Kommutators mit Glimmlampen. a) Vorderansicht, b) Draufsicht

wieder eingeleimt wird (Abb. 3.1.9./2). Damit die Bürsten nicht abrutschen, setzt man auf beiden Seiten die etwas größeren Kartonscheiben f auf. Auf der Stirnseite

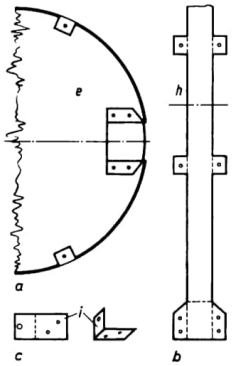


Abb. 3.1.9./2 Messingblechstreifen für Kommutator und Haltewinkel.
a) Messingstreifen um die Kommutatorscheibe,
b) entfalteter Messingstreifen,
c) ein Haltewinkel

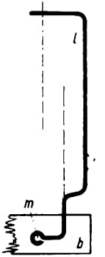


Abb. 3.1.9./3
Biegeform der Bürsten. Der rechts von den gestrichelten Linien befindliche Drahtteil ist um 90° nach vorn gebogen

befestigt man zwei Halbkreisscheiben aus Messingblech g. Man bohrt in die Rückseite der Holzscheibe eine Vertiefung, in die eine Fahrradachsmutter straff eingesetzt wird. Je ein Ende der Halbringe verbindet man mit einem dicken, isolierten Draht, der in einigen Windungen um die Ankerleiste a gewickelt und an je einen Haltewinkel i der Glimmlampe geführt wird. Den Kommutator schraubt man auf die im Mittelpunkt durchbohrte Ankerleiste. Die Ankerpole c leimt und nagelt man unter die Ankerleiste und schraubt die Haltewinkel i für die Glimmlampen n auf. Man färbt die Ankerpole halb rot, halb blau, so daß die Grenzlinie zwischen den Farben die Glimmlampen quer durchschneidet. Man verbindet die beiden freien Haltewinkel mit einer Leitung, in der ein Hochohmwiderstand o liegt.
In die Rückseite der beiden Feldmagnetpole d bohrt man eine Vertiefung, in die eine Mutter M 8 j eingeschlagen wird. Dadurch lassen sich diese Teile auf kurze Stativstangen schrauben. Die Bürsten l werden am oberen Ende winklig so umgebogen, daß die Glimmlampen hinter ihnen hindurchgleiten können (Abb. 3.1.9./3). Der Anker wird auf eine Kugellagerachse mit Kurbel geschraubt und an einem Stativ befestigt. An einen Querstab klemmt man die Feldmagnetpole. Die Bürstenleiste b wird mittels einer Kreuzmuffe von einer Stabmuffe getragen.

Versuch

An die Bürsten wird eine Gleichspannung von 220 V gelegt. Durch Drehen der Kurbel im Uhrzeigersinn — von vorn betrachtet entgegengesetzt zum Uhrzeiger — setzt man den Anker in Umdrehung. Dabei leuchtet entsprechend der Stellung des Ankers je eine Elektrode jeder Glimmlampe. Die Farbe der Fläche, in der die leuchtende Elektrode liegt, veranschaulicht die Polarität des Ankers. Jedesmal, wenn der Anker die horizontale Lage durchläuft, leuchten die anderen Elektroden auf und kennzeichnen dadurch den Polwechsel des Ankers.

3.1.10. Leistungslose Drehzahlmessung am Generator-Motor-Modell

1. Generator-Motor-Modell
2. Zählgerät (z. 2. Polydigit)
3. Zentraluhr
4. Lichtempfänger mit Fotodiode
5. Physikleuchte
6. Transformator
7. Stromversorgungsgerät (20 V —)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Drehzahlmessungen sind zur Berechnung des Wirkungsgrades von Generatoren und Motoren erforderlich. Sie erfolgen hier mit Hilfe einer Lichtschrankenschaltung. Dadurch werden Leistungsverluste vermieden. Beim Generator-Motor-Modell wird das Lichtbündel durch den Anker unterbrochen, bei anderen Motoren kann man die Unterbrechung durch eine Lochscheibe auf der Antriebswelle bewirken.

Versuch

Der Versuch wird nach Abbildung 3.1.10./1 aufgebaut. Die Physikleuchte muß genau auf die Fotodiode justiert werden. Die Schaltung des Lichtempfängers entnimmt man der Abbildung 3.1.10./2. Die bei der Unterbrechung des Lichtstrahls durch den rotierenden Anker entstehenden Impulse werden mit dem Zählgerät ge-

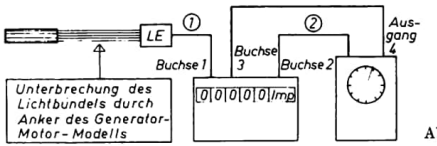


Abb. 3.1.10.1/1a

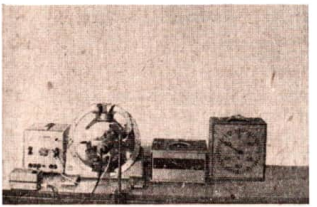


Abb. 3.1.10.1/1b

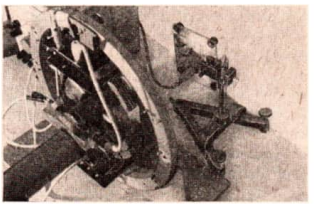


Abb. 3.1.10.1/1c

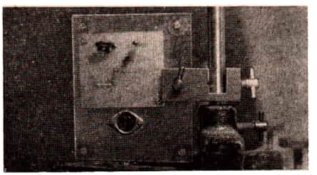


Abb. 3.1.10.1/1d

Abb. 3.1.10./1
Versuchsaufbau
a) Aufbauskizze
b) Gesamtansicht,
c) Generator-Motor-Modell und Lichtempfänger
d) Lichtempfänger

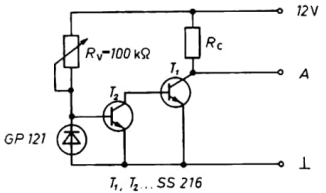


Abb. 3.1.10./2
Schaltung des Lichtempfängers

zählt. Das Ein- und Ausschalten erfolgt mit Hilfe der Zentraluhr. Dazu wird außer den Verbindungen 1 und 2 mit Hilfe der Steckerleitung für die Torzeitschaltung die Ausgangsbuchse 3 des Zählgerätes mit dem Buchsenpaar 4 der Zentraluhr verbunden, da sonst die Anzeige des Zählgeräts nach dem Ausschalten sofort auf Null zurückgeht. Stellt man an der Zentraluhr eine Zählzeit von $t = 30$ s ein, dann wird die Drehzahl n in min^{-1} angezeigt, da das Lichtbündel bei jeder Umdrehung zweimal unterbrochen wird.

3.1.11. Ermittlung des Wirkungsgrades eines Generators

1. Generator (z. B. Permanentmagnetmotor für elektromechanisches Spielzeug)
2. Experimentiermotor
3. 2 Federkraftmesser (3 N)
4. dünne, feste Schnur
5. Stoppuhr
6. Lineal
7. Drehwiderstand (oder Glühlampe 6 V; 0,4 A)
8. Spannungsmesser (5 V)
9. Strommesser (500 mA)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Das Experiment dient zur Demonstration der Tatsache, daß zum Antrieb eines belasteten Generators eine größere Kraft benötigt wird als für einen unbelasteten Generator. Es gestattet darüber hinaus die Messung dieser Kraft und damit die Berechnung des Wirkungsgrades des Generators.
3. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades eines Fahrraddynamos und anderer Wechselstromgeneratoren ist zu beachten, daß die Wirkleistung bestimmt werden muß.

Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 3.1.11./1. Die beiden Federkraftmesser werden so befestigt, daß sie die Schnur mit einer Kraft von etwa 1 N vorspannen. Nach Einschalten des Motors wird durch Ein- und Ausschalten des Generatorstromkreises die unterschiedliche Gegenkraft des Generators demonstriert. Die Gegenkraft desGenerators ist an der Differenz der von den beiden Kraftmessern angezeigten Kräfte erkennbar. Bei belastetem Generator wird die Differenz der von beiden Kraftmessern angezeigten Kräfte ermittelt.
Die Hälfte dieser Differenz ist die an der Peripherie der Riemenscheibe in Seilrichtung angreifende Kraft F.

Es gilt demnach $F = \frac{F_1 - F_2}{2}$.

Die Reibung an den beiden Rollen wird dabei vernachlässigt. Die aufgenommene mechanische Leistung wird aus dieser Kraft F und der Bahngeschwindigkeit v des Seiles nach der Gleichung $P = F \cdot v$ berechnet.
Die Bahngeschwindigkeit v wird aus der Seillänge l und der Umlaufzeit t des Knotens ermittelt. Es gilt: $v = \frac{l}{t}$.

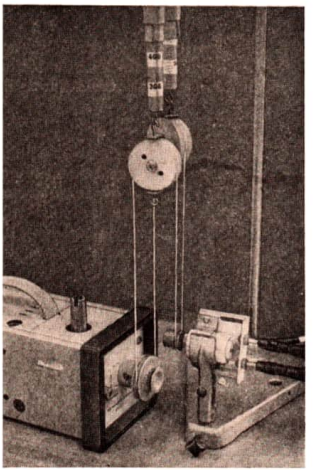


Abb. 3.1.11./1 Versuchsaufbau

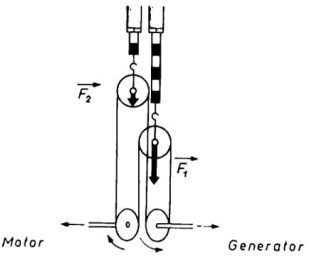


Abb. 3.1.11./2
Schematische Darstellung der Kraftmessung bei der Energieübertragung durch Treibriemen

Die mechanische Leistung kann außer über die Translationsbewegung des Seils auch über die Kenngrößen für die Rotationsbewegung der Riemenscheibe des Generators ermittelt werden. Die von ihm aufgenommene mechanische Leistung berechnet sich dann nach der Gleichung $P = M \cdot \omega$.
Die elektrische Leistung wird aus den Meßwerten für Stromstärke und Spannung berechnet oder mit einem Leistungsmesser gemessen. Der Wirkungsgrad wird dann aus der aufgenommenen und der abgegebenen Leistung berechnet. Wird als Gleichstromgenerator ein Permanentmagnetmotor (6 V; 1,5 W) benutzt, erhält man einen Wirkungsgrad von etwa 10 %. Ähnliche Werte erhält man für einen Fahrraddynamo als Wechselstromgenerator.

Bemerkungen

1. Wird der Wirkungsgrad über die Rotationsbewegung der Riemenscheibe des Generators berechnet, so ist eine Drehzahlmessung notwendig. Soll diese mit einem Tachometer erfolgen, muß sie an der Riemenscheibe des Motors vorgenommen werden und entsprechend auf den Generator umgerechnet werden, wenn sich die Durchmesser der Riemenscheiben unterscheiden. Für die Drehzahlmessung am Generator ist auf eine leistungslose Messung zurückzugreifen.
2. Die Versuchsanordnung gestattet die Bestimmung der Energie, die am Genera-

tor durch Reibung in Wärme umgewandelt wird (Generatorstromkreis offen). Dadurch läßt sich auch der bei der Induktion in Wärme umgewandelte Anteil ermitteln und eine Schlußfolgerung für die konstruktive Verbesserung des Generators ziehen.

3.2. Drehstromgeneratoren und -motoren

3.2.1. Erzeugen von drei phasensymmetrischen Wechselströmen

1. 3 Spulen (750/1 500 Wdg.)
2. 3 I-Kerne
3. Stabmagnet
4. 3 Strommesser (2 mA; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Vor dem Einsatz von Generatormodellen erscheint es sinnvoll, durch eine übersichtliche Anordnung den physikalischen Sachverhalt der Erzeugung von drei zeitlich verschobenen Wechselspannungen zu erklären. Dabei wird an V 2.1.2. angeknüpft.

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 3.2.1./1 ersichtlich. Man klemmt den Stabmagneten in die auf die Kugellagerachse geschraubte Drehklemme. Die Kugel-

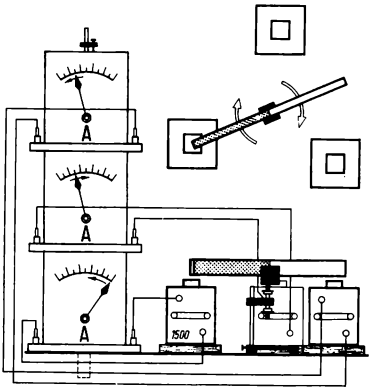


Abb. 3.2.1./1
Versuchsanordnung zum Erzeugen dreier phasenverschobener Ströme. Darüber der Grundriß der Spulen

lagerachse wird in senkrechter Lage an einem Stativ befestigt. Kreisförmig um die Achse stellt man auf Unterlegebrettchen die Spulen mit I-Kernen um je 120° versetzt. Man richtet den Radius und die Höhe so ein, daß sich die Magnetpole dicht über den I-Kernen drehen lassen.
Die drei Meßgeräte werden übereinandergestellt und durch eine Schnellklemme gegen Umstürzen gesichert. Man verbindet je ein Meßgerät mit einer Spule.

Versuch

Man dreht den Stabmagneten langsam und gleichmäßig um seine Achse. Für jede Spule zeigt ein Meßgerät die induzierte Spannung an. Bei den übereinandergestellten Geräten ist ein Phasenunterschied von je einer drittel Periode gut zu beobachten.

Bemerkung

Zur Beobachtung der Drehung des Magneten über den Spulen kann man einen geneigten Spiegel anbringen.

3.2.2. Untersuchung der Dreiphasenwechselspannung mit Hilfe eines Flüssigkeitswiderstandsgerätes

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. 3 Spannungsmesser (10 V — ; Nullpunktmittellage)
3. Flüssigkeitswiderstandsgeräte ®, dazu erforderliches Material:
   a) Kreisscheibe aus Hartpapier (5 mm dick)
   b) 3 Stifte aus Plast (∅ 4 mm; 10 mm lang)
   c) zylinderisches Glasgefäß
   d) Streifen aus Plast (80 mm × 15 mm × 3 mm)
   e) 2 kreisförmige Scheiben aus Messingblech (∅ 30 mm; 1 mm dick)
   f) Schraube (M 3; 50 mm lang) mit 4 Muttern
   g) Schnurlaufrolle
   h) Trinkröhrchen aus Plast
   i) 2 Isolierscheiben (Innendurchmesser 3 mm)
   j) 5 Kohlestifte aus Monozellen
   k) 2 Relaiskontaktfedern
   l) 2 Streifen aus Messingblech
   m) 6 Telefonbuchsen
   n) verdünnte Natronlauge

Methodischer Hinweis

Im Gerät werden durch Drehung Flüssigkeitswiderstände verändert, so daß aus einer Gleichspannung Dreiphasenwechselspannung erzeugt werden kann. Da hier die drei Wechselspannungen nicht durch elektromagnetische Induktion entstehen, muß man methodisch so vorgehen, daß man zunächst mit V 3.2.1. die Spannungen an einem Generatormodell zeigt. Danach dreht man mäßig schnell an diesem Gerät und weist nach, daß es genauso drei phasenverschobene Spannungen liefert. Dann kann man durch schrittweises Weiterdrehen die Spannungskurven aufnehmen.

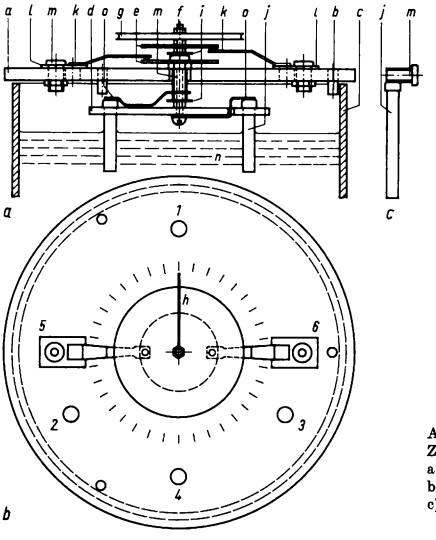


Abb. 3.2.2./1
Zeichnungen zum Selbstbau.
a) Schnitt durch das Gerät,
b) Draufsicht auf den Einsatz,
c) Kohlestift mit aufgelöteter Telefonbuchse

Selbstbau des Gerätes

Eine Kreisscheibe aus Hartpapier wird mit einer Mittelbohrung und den Bohrungen 1 bis 6 mit ∅ 6 mm und einer Winkelteilung versehen (Abb. 3.2.2./1). Außerdem werden Bohrungen für drei Plaststifte um 120° versetzt am Rand gebohrt, die das Verrutschen des Einsatzes in einem passenden Glasgefäß verhindern sollen. Aus dem Plaststreifen, der Schraube f, einer Telefonbuchse, 2 kreisförmigen Scheiben aus Messingblech e, der Schnurlaufrolle g wird der drehbare Einsatz gefertigt. Die Schraube und die Telefonbuchse werden durch ein Stück vom Trinkröhrchen h und zwei Isolierscheiben i gegeneinander isoliert. In den Plaststreifen werden zwei gekürzte Kohlestifte aus Monozellen eingesetzt und durch angelötete Drähte über Schraube und Telefonbuchse mit je einer der Messingblechscheiben e

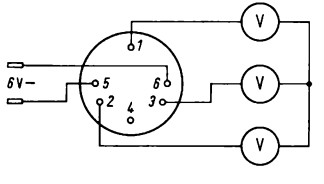


Abb. 3.2.2./2
Schaltplan zum Versuchsaufbau

verbunden. An diesen schleifen zwei Relaiskontakte, die auf zwei Messingbleche 1 unter den Buchsen (5 und 6) gelötet sind.
In die Bohrungen 1, 2 und 3 werden Kohlestifte aus Monozellen gesetzt, auf die vorher Telefonbuchsen gelötet werden.
Der Einsatz wird auf ein Glasgefäß gesetzt, das mit Natronlauge geringer Konzentration bis dicht unter den Plaststreifen gefüllt ist.

Versuch

An die Buchsen 5 und 6 wird eine Gleichspannung von etwa 6 V gelegt (Abb. 3.2.2./2). Die drei Kohlestifte werden mit der linken Klemme der drei in Nullpunktmittellage stehenden Spannungmesser (10 V —) verbunden. Die drei rechten Klemmen werden untereinander verbunden. Dreht man langsam an der Schnurlaufrolle, so pendeln die Zeiger der Meßgeräte in gleicher Weise wie in V 3.2.1.
Man dreht die Rolle schrittweise um jeweils 10° weiter und liest jeweils die Spannungen an den drei Meßgeräten ab. Sie werden in eine Tabelle eingetragen, und danach werden die Kurven gezeichnet. Die Summe der Spannungen ist in jeder Stellung 0.
Es ist auch möglich, über die Schnurlaufrolle das Gerät durch einen Experimentiermotor mit konstanter Drehzahl anzutreiben, einen Dreiphasentransformator aus Aufbauteilen (Primärseite: Spulen mit 125 Wdg., Sekundärseite: Spulen mit 15000 Wdg.) anzuschließen und über den Glimmlichtoszillografen nach V 4.1.3., Variante c, die Kurven sichtbar zu machen.

Bemerkungen

1. Durch die Natronlauge geringer Konzentration wird die Wasserstoffentwicklung und damit eine Knallgasbildung verhindert. Schwefelsäure ist wegen der Knallgasbildung ungeeignet.
2. Man sollte wegen der einsetzenden Wasserstoffentwicklung die Konzentration der Lauge auch nicht vergrößern, um mit größeren Stromstärken Glühlampen zum Leuchten zu bringen.
3. Setzt man nur zwei Kohlestifte in die Bohrungen 1 und 4, so kann man einen Einphasenwechselstrom erzeugen und damit auch die Wirkungsweise des Gerätes einführend erklären.

3.2.3. Modell eines fremderregten Drehstromgenerators

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. U-Kern, geblättert
3. Polschuhpaar
4. 2 Bürstenhalter mit je 3 Bürsten
5. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
6. Drehstromanker
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Antriebsvorrichtung
9. Brettchen mit 3 Fassungen (E 10) und 6 Telefonbuchsen ⑥
10. 3 Glühlampen (4 V; 0,1 A)
11. Drehspiegel

Zu Versuch 2

An Stelle von 2. bis 7.
12. Generator-Motor-Modell mit Drehstromzusatz oder Selbstbau nach MB 3.0.3.

Methodischer Hinweis

Die mit den vorangehenden Versuchen erklärten Sachverhalte werden hier in den Modellen technischer Dreiphasengeneratoren näher untersucht. Dabei kommt Versuch 2 die größere Bedeutung zu, weil Großgeneratoren Innenpolmaschinen sind.

Versuch 1: Außenpolmaschine

Das Modell wird nach Abbildung 3.2.3./1 zusammengestellt. Der Anschluß jedes Stromkreises, in dem je eine Glühlampe liegt, erfolgt an zwei zusammengehörigen Bürsten. Zur besseren Übersicht spannt man die Verbindungsleiter straff zwischen zwei Klemmenstangen (Abb. 3.2.3./2). Die drei gespannten Leitungen werden mit R, S, T bezeichnet. Man verwendet ein Lampenbrett, dessen Fassungen möglichst nahe beieinanderliegen und stellt es vertikal auf.

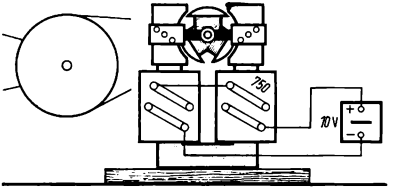


Abb. 3.2.3./1
Drehstromgeneratormodell

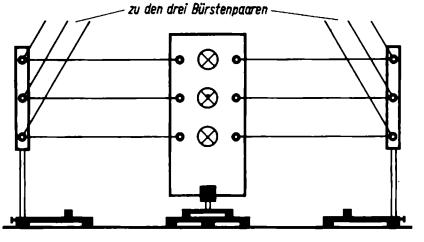


Abb. 3.2.3./2
Leitungsführung
der drei Stromkreise

Dreht man die Handantriebsvorrichtung mit mäßiger Geschwindigkeit, so ist ein ungleichmäßiges, schwaches Aufleuchten der Glühlampen zu beobachten. Diese Erscheinung läßt sich im Drehspiegel besonders gut beobachten.
Dreht man den Generator schneller, so erkennt man, daß die drei Lichtbänder nacheinander aufleuchten und in ihrer Helligkeit rhythmisch wechseln.

Versuch 2: Innenpolmaschine (Abb. 3.2.3./3)

Das Generator-Motor-Modell wird mit 3 um 120° versetzten Polschuhen und 3 Spulen (120 Wdg.) aufgebaut. Der Doppel-T-Anker wird eingesetzt und über die Schleifringe an eine Gleichspannung von etwa 6 V gelegt. Vor der unterrichtlichen Behandlung der Stern- und Dreieckschaltung führt man von jeder Spule zwei Leitungen zu den Lampen wie in Versuch 1.

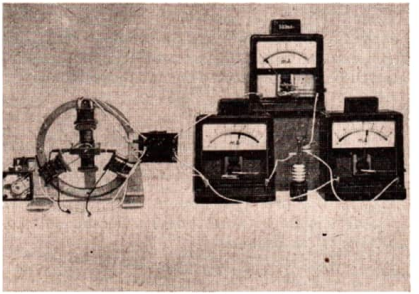


Abb. 3.2.3./3
Generator-Motor-Modell als fremderregter Dreiphasengenerator

Bemerkungen

1. Zur Beobachtung mit dem Glimmlichtoszillografen vergleiche V 3.2.2.!
2. Die grafische Darstellung der Phasenlage des Drehstromes wird durch eine einfache Zeichenhilfe, eine Zickzacklinie längs der Abszissenachse, wesentlich erleichtert (Abb. 3.2.3./4).

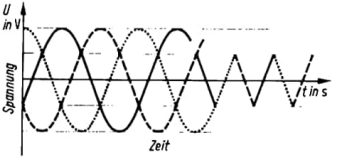


Abb. 3.2.3./4
Zeichenhilfe für die grafische Darstellung der Spannungen des Drehstromes

3.2.4. Die Verkettung der Ströme eines Drehstromgenerators in Sternschaltung und in Dreieckschaltung

1. Stromversorgungsgerät
2. U-Kern, geblättert
3. Polschuhpaar
4. 2 Bürstenhalter mit je 3 Bürsten
5. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
6. Drehstromanker
7. Grundbrett mit Spannvorrichtung
8. Antriebsvorrichtung
   oder an Stelle von 2. bis 7.
   Generator-Motor-Modell mit Drehstromzusatz oder Selbstbau nach V 3.0.3.

9. Klemmenbrett ⑨, dazu erforderliches Material:
   a) Hartpapier oder Plasttafel (160 mm × 80 mm)
   b) 6 Geräteklemmen
   c) 4 Kabelschuhe
   d) 3 Streifen Messingblech (55 mm × 10 mm)
10. Lampenbrett ⑩, dazu erforderliches Material:
   a) kreisförmige Hartpapier- oder Plastscheibe (∅ 160 mm)
   b) Halteleiste
   c) 12 Telefonbuchsen
   d) 3 Glühlampen (4 V; 0,3 A) auf Steckerbrettchen mit 400 mm Steckerabstand

Methodischer Hinweis

Auf Grund der mit V 3.2.2. vermittelten Erkenntnis über die Summe der Spannungen wird mit diesen Versuchen die Verkettung der Spannungen und Stromstärken eingeführt, die mit V 3.2.5 vertieft behandelt wird.

Herstellen der Schaltbretter

Das Modell eines Drehstromgenerators wird wie in V 3.2.3. zusammengestellt. Zur übersichtlichen Gestaltung der Schaltungen fertigt man aus je einer Hartpapiertafel ein rechteckiges Klemmenbrett (Abb. 3.2.4./1) und ein kreisförmiges Lampenbrett (Abb. 3.2.4./2) an. In das Klemmenbrett bohrt man 6 Löcher zur Aufnahme von Geräteklemmen. Unter die drei Buchsen der rechten und unter die mittlere Buchse der linken Reihe klemmt man je einen Kabelschuh. Die Anschlußstellen werden durch die genormten Buchstaben U, V, W, X, Y, Z gekennzeichnet. Zur Verkettung verwendet man drei durchbohrte Messingblechstreifen (Abb. 3.2.4./1, Nebenbild). Diese werden durch die Bananenstecker der Verbindungsleiter mit den Geräteklemmen verbunden.
Das Lampenbrett wird nach Abbildung 3.2.4./2 aus Hartpapier oder Plast gefertigt und mit Telefonbuchsen versehen. Die Leitungsführung zwischen den Buchsen erfolgt für die Sternschaltung auf der einen und für die Dreieckschaltung auf der anderen Seite der Platte. Man verwendet isolierten Draht in einer Farbe, die sich gut von der Platte abhebt. Die Lampen werden auf Steckerbrettchen eingesetzt. Beide Bretter werden auf Stativfüßen vertikal gehaltert.

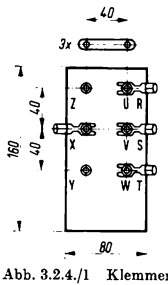


Abb. 3.2.4./1 Klemmenbrett

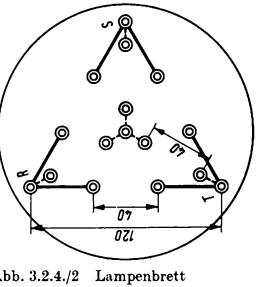


Abb. 3.2.4./2 Lampenbrett

Versuch

Die Verkettung kann entweder in Stern- oder Dreieckschaltung erfolgen.
Man zeichnet auf die Tafel den Schaltplan der vorzunehmenden Schaltart. Davon ausgehend nimmt man die Verkettung am Klemmenbrett vor. Man stellt zuerst die Verbindungen vom Generator zu den Anschlüssen dieses Brettes her. Dabei müssen die Wicklungsenden U und X, V und Y, W und Z der Erregerspulen, die an je zwei Bürstenpaaren liegen, mit den ihnen entsprechenden Anschlüssen verbunden werden (Abb. 3.2.4./3 und 3.2.4./4). Von den Kabelschuhen führt man die Verbindungsleiter möglichst straff zu einer senkrecht stehenden Klemmenstange und von dort zum Lampenbrett. Dort nimmt man ebenfalls die entsprechende Verkettung vor. Setzt man das Generatormodell in Betrieb, so leuchten die Lampen auf.
Die Verkettung der Leitungen führt auch zu einer Änderung der Spannung. Die zwischen den Enden jeder Spule bestehende Spannung erhöht sich zu der zwischen zwei Hauptleitern gemessenen verketteten Spannung.

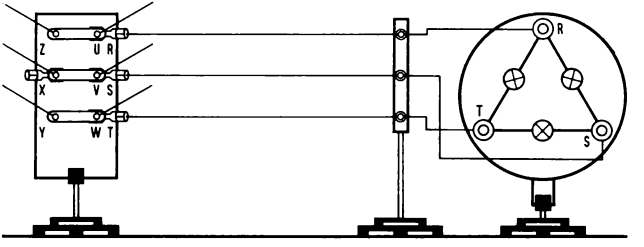


Abb. 3.2.4./3 Dreieckschaltung

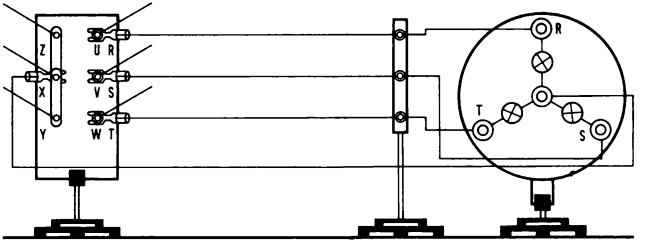


Abb. 3.2.4./4 Sternschaltung

3.2.5. Verkettung von Spannungen und Stromstärken

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Dreiphasengenerator nach MB 3.0.3. oder V 3.2.3.
3. Lampenbrett nach V 3.2.4.
4. 3 Widerstände (100 Ω) auf Steckerbrett
5. 1 Widerstand (1 Ω) auf Steckerbrett
6. 3 Spannungsmesser (100 mV — ; Nullpunktmittellage)
7. Strommesser (2 mA — ; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.2.4.!

Versuch 1: Die Entstehung des Drehstroms

In einer Schaltung nach Abbildung 3.2.5./1 werden zunächst drei phasensymmetrische Ströme erzeugt und die Rückleitungen zu den Spulen durch einen Mittelpunktleiter ersetzt. Nach Inbetriebnahme des Generators schlagen die Meßgeräte wie bei V 3.2.1. aus. Am Ergebnis des Versuches ändert sich nichts, wenn der Mittelpunktleiter auch noch entfernt wird (Abb. 3.2.5./2).

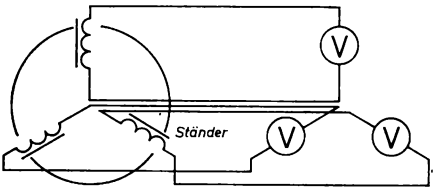


Abb. 3.2.5./1
Nachweis der drei unverketteten Spannungen

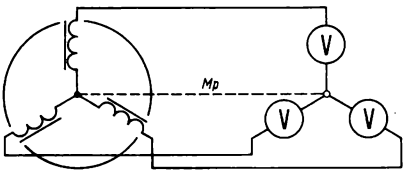


Abb. 3.2.5./2
Fortfall des Mittelpunktleiters

Versuch 2: Sternschaltung bei symmetrischer Belastung (Dreileitersystem)

Nach Abbildung 3.2.5./3 wird das Generatormodell im Stern geschaltet. Ebenfalls in Sternschaltung liegen auf einem Grundbrett die drei Widerstände von etwa 100 Ω. In den Mittelpunktleiter wird ein Demonstrationsdrehspulgerät mit Nullpunktmittellage ohne Nebenwiderstand eingeschaltet. Beim Drehen der Handkurbel bleibt der Zeiger nahezu in Ruhe. Bei symmetrischer Belastung der Sternschaltung bleibt der Mittelpunktleiter stromlos und kann fortgelassen werden (Dreileitersystem).

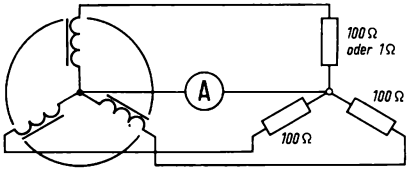


Abb. 3.2.5./3
Nachweis der Stromlosigkeit des Mittelpunktleiters bei symmetrischer Belastung und der Stromführung bei unsymmetrischer Belastung

Versuch 3: Sternschaltung bei unsymmetrischer Belastung (Vierleitersystem)

Wird im vorangegangenen Versuch einer der drei in Sternschaltung liegenden Widerstände von etwa 100 Ω durch einen Widerstand von 1 Ω ersetzt (unsymmetrische Belastung), so führt der Mittelpunktleiter beim Betrieb des Generatormodelles Strom, der Zeiger des Drehspulmeßgerätes schlägt im Rhythmus der Drehung des Ankers aus.

Versuch 4: Der Unterschied zwischen der Phasenspannung und der verketteten Spannung bei Sternschaltung im Vierleitersystem

Nach Abbildung 3.2.5./4 wird ein Demonstrationsdrehspulgerät ohne Nebenwiderstand zwischen den Mittelpunktleiter und einen Außenleiter, ein zweites zwischen zwei Außenleiter gelegt. Man bezeichnet die zwischen dem Mittelleiter und einem Außenleiter gemessene Spannung als Phasenspannung und die zwischen zwei Außenleitern bestehende Spannung als verkettete Spannung. Bei langsamem Drehen des Ankers zeigen beide Geräte eine Wechselspannung an. Die Ausschläge der beiden Meßgeräte haben verschieden große Amplituden. Die verkettete Spannung ist größer als die Phasenspannung.
Wird der Anker durch die Handantriebsvorrichtung in schnelle Drehung versetzt und hat man an Stelle der Drehspulmeßgeräte Wechselstrommeßgeräte, am besten zwei Vielfachmeßgeräte, eingeschaltet, so kann man näherungsweise beide Spannungen messen. Man findet etwa das Verhältnis $U_{RMp} : U_{RS} = 1 : 1{,}7$. Da 1,7 mit großer Annäherung gleich $\sqrt{3}$ ist, ergibt sich:

Die verkettete Spannung ist gleich dem Produkt aus Phasenspannung und $\sqrt{3}$:

$$U_{RS} = U_{RMp} \cdot \sqrt{3}\,.$$

Dieses Verhältnis ist frequenzunabhängig, wovon man sich durch rascheres oder langsameres Drehen überzeugen kann.

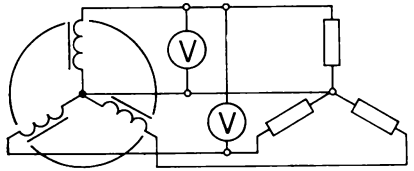


Abb. 3.2.5./4 Nachweis des Spannungsunterschiedes zwischen Phasenspannung und verketteter Spannung

Bemerkungen

1. Die Versuche können auch mit Netzfrequenz unter Verwendung eines Transformators aus Aufbauteilen (Primär: 3 · 1500 Wdg., sekundär: 3 · 125 Wdg.) und Wechselstrommeßgeräten ausgeführt werden.
2. An Stelle des Transformators aus Aufbauteilen können drei Schülerstromversorgungsgeräte benutzt werden. Dazu ist von einem Elektriker ein Schaltbrett mit drei Schukosteckdosen anzufertigen, die in Sternschaltung über ein vieradriges Kabel und Drehstromstecker an das Netz angeschlossen werden.

3.2.6. Modellversuch zum Drehfeld

1. Hufeisenmagnet
2. Büchse aus Eisenblech
3. Nadelträger
4. Lasche für U-Kern

Methodischer Hinweis

Zum Verständnis dafür, warum sich Anker im Drehfeld drehen, ist dieser Versuch mit einem mechanisch erzeugten Drehfeld sehr zweckdienlich (vgl. V 2.4.3. und V 3.1.8.).

Versuch

Der Hufeisenmagnet wird in die Lasche gelegt und mit einer Fadenschlaufe an ein Stativ gehängt (Abb. 3.2.6./1). In den Boden der Blechbüchse schlägt man mit einem Körner auf der Innenseite genau im Mittelpunkt eine Vertiefung, so daß sie sich auf den Nadelträger aufsetzen läßt. Man verdrillt die Fadenschlaufe und hält den Magneten fest. Stellt man die auf den Nadelträger gesetzte Blechbüchse darunter und läßt den Magneten los, so beginnt sich die Blechdose in gleicher Richtung wie der Magnet zu drehen.

An Stelle der Blechbüchse kann man auch eine Kompaßnadel verwenden.

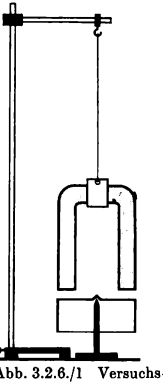


Abb. 3.2.6./1 Versuchsaufbau zur modellmäßigen Erzeugung eines Drehfeldes

Bemerkung

Um eindeutig die Bewegung der Büchse auf Wirbelströme zurückzuführen, dürfte sie nicht aus Eisen bestehen. Eine Büchse aus Aluminium erreicht aber eine erheblich kleinere Drehzahl.

3.2.7. Modelle von Drehstrommotoren

Zum Drehstrommotormodell

1. 3 Spulen (750/1500 Wdg.)
2. Haltering
3. 3 Zylinderkerne
4. Kompaßnadel
5. Stahlblechläufer
6. Käfigläufer
7. Wirbelstromläufer
8. Ringläufer oder Motor-Generator-Modell mit Drehstromzusatz oder Modell nach MB 3.0.3.

Als Spannungsquelle

9. Drehstromgenerator nach V 3.2.3. oder
10. Drehstromtransformator aus Aufbauteilen (Primär: 3 × 1500 Wdg., sekundär: 3 × 125 Wdg.) oder
11. 3 Schülerstromversorgungsgeräte und Anschlußplatte nach Bemerkung 2 in V 3.2.5.

Methodische Hinweise

1. Zum Nachweis des Drehfeldes ist es zweckmäßig, zunächst bei langsamer Drehung des Generators die Bewegung einer Kompaßnadel beobachten zu lassen.
2. Im nächsten Unterrichtsschritt zeigt man, daß die Kompaßnadel bei größerer Frequenz, z.B. Netzfrequenz, nicht von allein anläuft und erklärt damit den Begriff Synchronmotor.
3. Schließlich geht man zum Asynchronmotor über, indem man Wirbelstromläufer oder Induktionsläufer einsetzt.

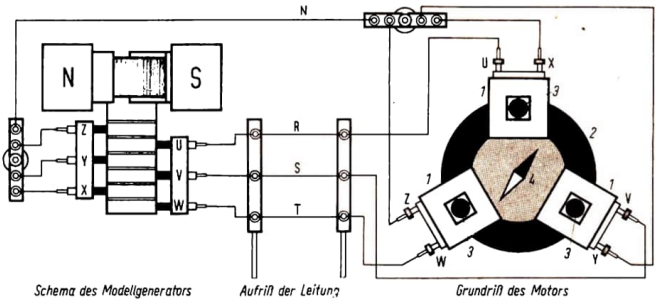


Abb. 3.2.7./1 Modell eines Drehstrommotors in Sternschaltung, angeschlossen an einen Drehstromgenerator.
Im linken Teil des Bildes sind die drei Schleifringpaare schematisch wiedergegeben.

Versuchsanordnung

Der Aufbau des Drehstrommodells aus Aufbauteilen erfolgt in waagerechter Lage (Abb. 3.2.7./1 und Abb. 3.2.7./2). Auf den Haltering setzt man den Nadelträger mit der Kompaßnadel, drückt die Zylinderkerne in die Rohrstutzen und schiebt die auf 750 Wdg. geschalteten Spulen darüber. Die Schaltung kann sowohl im Dreieck wie im Stern erfolgen.
Günstiger ist der Aufbau in vertikaler Anordnung mit dem Selbstbaugerät nach MB 3.0.3. oder mit dem Generatormodell, in die man auch Magnetläufer oder Induktionsläufer für Synchron- und Asynchronmotormodelle einsetzen kann.

Anschluß der Modelle an eine Spannungsquelle

Als Spannungsquelle können die in den vorangehenden Versuchen beschriebenen Generatormodelle verwendet werden.
Für die Drehung von Induktionsläufern kommen aber nur die leistungsstärksten Generatormodelle mit Antrieb durch einen Experimentiermotor in Frage. Besser geeignet ist für diese Asynchronmotormodelle die herabtransformierte Netzspannung (Abb. 3.2.7./2). Am Transformator aus Aufbauteilen müssen die Primärspulen (1500 Wdg.) in Sternschaltung geschaltet werden, weil sie in Dreieckschaltung überlastet werden.

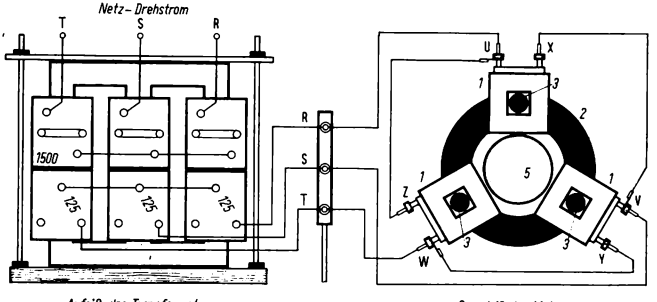


Abb. 3.2.7./2 Modell eines Drehstrommotors in Dreieckschaltung, angeschlossen an einen Drehstromtransformator

Gut geeignet ist der Einsatz von drei Stromversorgungsgeräten, weil dabei Berührungsschutz besteht.
Wegen der symmetrischen Belastung durch die Motormodelle ist es gleichgültig, ob die Spannungsquellen in Stern- oder Dreieckschaltung geschaltet sind.

Versuch 1: Nachweis des Drehfeldes

Das Motormodell kann in Stern- oder Dreieckschaltung geschaltet sein. Eine Kompaßnadel oder ein anderer Magnetläufer wird eingesetzt. Das Motormodell wird an einen Drehstromgenerator mit Handantrieb angeschlossen. Mit langsamer

Drehung des Generatorankers beginnt der Läufer sich mit dem Drehfeld zu drehen und folgt jeder Drehzahländerung am Generator.

Versuch 2: Modell des Synchronmotors

Der Versuch gleicht im Aufbau Versuch 1. Der Generator wird durch einen Experimentiermotor angetrieben, oder das Motormodell wird an die auf etwa 12 V herabtransformierte Netzspannung angeschlossen. Der Magnetläufer läuft bei höherer Frequenz erst mit dem Drehfeld synchron mit, wenn man ihn mechanisch in Gang setzt. Bei leichten Magnetläufern kann die Anstoßdrehzahl unter der Betriebsdrehzahl liegen.

Versuch 3: Modell des Asynchronmotors

Das Motormodell wird mit einem Kurzschluß- oder Käfigläufer ausgerüstet, in Dreieckschaltung geschaltet und an eine der oben genannten Spannungsquellen angeschlossen (Abb. 3.2.7./3).

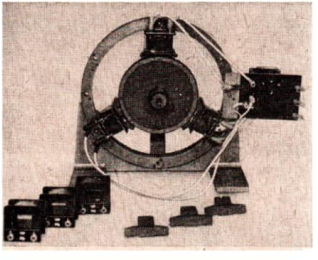


Abb. 3.2.7./3 Aufbau eines Asynchronmotors mit dem Generator-Motor-Modell

Der Läufer läuft von selbst an und steigert seine Drehzahl, erreicht aber nicht die Drehzahl des Generators.
Schaltet man das Motormodell in Sternschaltung, so wird der Schlupf größer, die Drehzahl liegt tiefer unter der Generatordrehzahl.
Der Unterschied zwischen Stern- und Dreieckschaltung ist besonders deutlich zu zeigen, wenn man den Stern-Dreieck-Schalter nach V 3.2.8. vor den Motor schaltet.

Bemerkung

Durch Vertauschen von zwei Zuleitungen zum Motormodell ist die Drehrichtung des Drehfeldes und damit des Läufers zu ändern.

3.2.8. Hebelschalter- und Walzenschaltermodell eines Stern-Dreieck-Schalters

1. Hebelschaltermodell (S), dazu erforderliches Material:
   a) Plastplatte (ungefähr 200 mm × 200 mm × 5 mm)
   b) 3 Hebelschalter
   c) dünne Leiste zum Verbinden der Handgriffe
   d) 10 Telefonbuchsen oder Geräteklemmen
2. Walzenschaltermodell (S), dazu erforderliches Material:
   a) Welle
   b) Rohr (Außendurchmesser 40 mm, Länge 190 mm), Werkstoff: Trolitul oder Hartpappe
   c) Brett (100 mm × 100 mm × 10 mm)
   d) 2 Bretter (100 mm × 80 mm × 10 mm)
   e) Scheibe (∅ 50 mm; 5 mm dick) als Sperrscheibe
   f) Scheibe (∅ 40 mm; 5 mm dick)
   g) Handrad
   h) 3 Messingblechstücke (10 mm × 10 mm)
   i) 3 Messingblechstücke (30 mm × 10 mm)
   j) 4 Messingblattfedern (50 mm × 45 mm)
   k) 6 Messingblattfedern (30 mm × 45 mm)
   l) 9 Klemmbuchsen
   m) große und kleine Versenkschrauben
3. Spannungsmesser
4. Strommesser
5. Experimentiermotor

Methodische Hinweise

1. Der Versuch hat besondere Bedeutung für die polytechnische Bildung.
2. Mit einem Stern-Dreieck-Schalter kann man ohne Schwierigkeiten von der Sternschaltung zur Dreieckschaltung übergehen. Die Stern-Dreieck-Schalter sind in der Regel als dreipolige Hebelschalter oder als Walzenschalter gebaut. Sollte die Schule nicht im Besitze eines Stern-Dreieck-Schalters sein, so kann man einfache Modelle dieser Schalter mit geringer Mühe selbst herstellen.

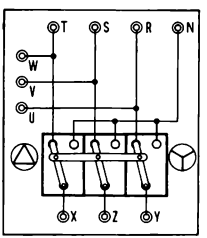


Abb. 3.2.8./1
Modell
eines Y/Δ-Hebelschalters

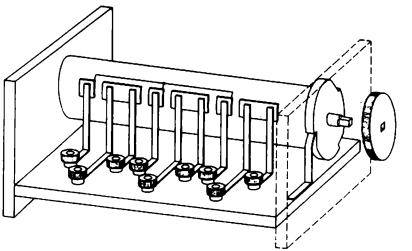


Abb. 3.2.8./2 Modell eines Y/Δ -Walzenschalters.
Die rechte Stirnwand ist fortgelassen.

Herstellen eines Hebelschaltermodells

Drei einpolige Schalter werden dicht nebeneinander auf das Grundbrett geschraubt (Abb. 3.2.8./1). Etwa vorhandene Verbindungen von der Achse zu der einen Klemmschraube sind vorher zu entfernen. Die Hebel werden durch eine Leiste verbunden, so daß man sie gemeinsam durch einen Griff umlegen kann. Am Rand werden zehn Bohrungen zur Aufnahme von Telefonbuchsen oder Steckbuchsen angebracht. Der aus der Abbildung ersichtliche Schaltplan wird auf die Frontseite gemalt, die Verdrahtung wird auf der Rückseite ausgeführt.

Herstellen eines Walzenschaltermodells

Das Modell eines Walzenschalters läßt sich nach Abbildung 3.2.8./2 herstellen. Der Aufbau ist aus der Zeichnung ersichtlich. Die beiden Blechkontaktgruppen für Stern- und für Dreieckschaltung sind auf zwei Mantellinien der Walze angeordnet. Die Blechstücke werden leicht gewölbt, so daß sie sich der Wölbung der Rohroberfläche anpassen; sie werden mit Epoxidharzkleber auf das Rohr geklebt. Die beiden Mantellinien sind um 120° gegeneinander versetzt. Eine dritte Mantellinie, ebenfalls um 120° gegen die beiden ersten versetzt, dient als Nullage. Die kleinen Kontaktbleche der Gruppe für Sternschaltung sind im Innern des Rohres untereinander durch Schaltdraht kurzgeschlossen und bilden den Sternpunkt (Abb. 3.2.8./3). Ein

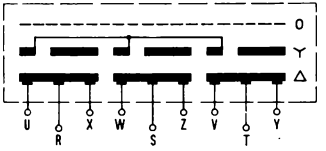


Abb. 3.2.8./3
Schema der Schaltwalze. Der Walzenmantel ist in eine Ebene abgewickelt.

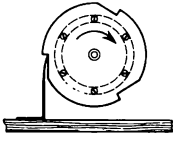


Abb. 3.2.8./4
Sperrad mit Sperrwinkel

Sperrad, das am rechten Ende der Walze befestigt ist, sorgt dafür, daß die Drehung nur in einer Richtung erfolgen kann (Abb. 3.2.8./4). Man kann nur von der Nullstellung zur Sternschaltung und weiter zur Dreieckschaltung übergehen. An diese schließt sich wieder die Nullstellung an.

Versuche

Das Schaltermodell kann in die Versuchsanordnung V 3.2.7, Versuch 3, eingefügt werden. Die Wicklungsenden der Feldspulen werden mit den entsprechenden Anschlüssen verbunden (Abb. 3.2.8./5).
Man legt in eine Hauptleitung einen Strommesser und parallel zu einer Feldspule des Motors einen Spannungsmesser. Der Generator wird zum Erzeugen einer gleichbleibenden Spannung durch einen Motor angetrieben. Man mißt die Spannung und die Stromstärke und bestimmt die Drehzahl. Die Ergebnisse werden in einer Tabelle festgehalten.

Der Nachweis, daß bei Inbetriebnahme des Motormodells in Dreieckschaltung die Stromstärke das zulässige Maß weit überschreiten würde, kann experimentell nicht erfolgen, da der Anker nicht den technischen Gegebenheiten entspricht.

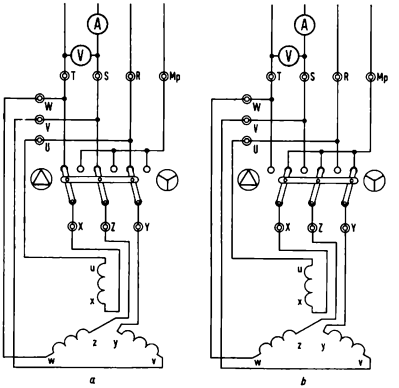


Abb. 3.2.8./5
Hebelschaltermodell im Stromkreis.
a) Dreieckschalter,
b) Sternschalter

Bemerkung

Aus den Versuchen folgt, daß ein Drehstrommotor in der Sternschaltung eine kleinere Stromstärke aufnimmt und langsamer läuft als in der Dreieckschaltung. Man verwendet den Stern-Dreieck-Schalter deswegen als Anlasser für Drehstrommotoren mit Kurzschlußläufern. Man schaltet den Motor zunächst in Sternschaltung und geht erst bei höherer Drehzahl zur Dreieckschaltung über. Die durch Induktion erzeugte Gegenspannung verhindert eine zu große Stromstärke.

4. Der Wechselstromkreis

4.0. Methodische Bemerkungen

4.0.0. Im Unterricht wird der Wechselstrom in die Behandlung der elektromagnetischen Schwingungen im Zusammenhang mit mechanischen Schwingungen vor der Behandlung der Wellen eingeordnet. In diesem Experimentierbuch ist die Zuordnung zu den Vorgängen der elektromagnetischen Induktion und den elektrischen Maschinen beibehalten worden, weil er mit den gleichen Unterrichtsmitteln und der gleichen Experimentiertechnik zu untersuchen ist, während für die Ton- und hochfrequenten Schwingungen und Wellen, die im 10. Teil der Physikalischen Schulversuche behandelt werden, andere Gerätesätze benutzt werden. Für den Wechselstrom werden die Teile des Aufbaugerätesatzes oder des Schülerexperimentiergerätes Elektrizitätslehre benötigt, die durch einige hier beschriebene Selbstbaugeräte ergänzt werden können. Sehr zu empfehlen ist der Einsatz des Katodenstrahloszillografen, zum Teil ergänzt durch einen elektronischen Umschalter für Zweistrahlbetrieb. Es sind aber Versuche beschrieben, mit denen man alle Gesetze des Wechselstroms auch ohne diese Geräte nachweisen kann.
Soweit es möglich ist, sollte man zur besseren Übersicht die Versuche wie für den Gleichstromkreis (s. 6. Teil) in vertikaler Anordnung auf dem Tafelschaltgerät aufbauen. Zu diesem Zweck ist die Anfertigung einiger Adapter (MB 4.0.5.) zum Einsatz von Teilen des Schülerexperimentiergerätes auf dem Tafelschaltgerät zu empfehlen.

4.0.1. Methodisch knüpft die Behandlung des Wechselstroms an die Kenntnisse an, die die Schüler über den Gleichstrom und die für ihn geltenden Gesetze erworben haben. Vielfach ist es günstig, den Übergang vom Gleichstrom zum Wechselstrom an einem Wechselstrom sehr kleiner Frequenz zu untersuchen. Es werden in diesem Buch verschiedene Möglichkeiten zum Erzeugen niederfrequenter Wechselströme beschrieben. Der Abschnitt 4.1. bringt in V 4.1.1. ein Beispiel dafür, er verwendet den Drehwiderstand des Aufbausatzes für Elektrophysik und einen Scheibenwischermotor. Eine andere Möglichkeit ist schon in V 2.2.1. angegeben. In V 4.1.2. und V 4.1.3. sind der Schleifen- und Glimmlichtoszillograf beschrieben, die zur Demonstration von Wechselspannungs- und Wechselstromstärkekurven dienen. Das technisch vollkommenste Gerät für diese Zwecke ist zweifellos der Katodenstrahloszillograf. In vielen Fällen ist jedoch die Verwendung von Glimmlampen methodisch günstiger als die eines Katodenstrahloszillografen. Der in Versuch V 4.1.3. beschriebene Dreifach-Glimmlichtoszillograf ist vielseitig einsetzbar, da er auch auf höhere Frequenz anspricht. Ein Modellversuch zum Frequenzmesser folgt im V 4.1.5. Er macht gleichzeitig mit einem Gerät zum Erzeugen von Wechselspannungen für beliebige mittlere Frequenzen bekannt, das als ro-

tierender Umpolschalter gebaut ist. Ein interessantes Verfahren zum Nachweis von Wechselspannungen und zur Messung von Frequenzen ist in V 4.1.6. erläutert. Dieses Verfahren der Staubfigurenaufzeichnung ist besonders für Schülerexperimente und Praktikumsversuche zu empfehlen, weil es den Einsatz von Oszillografen erspart, gut auswertbar ist und besonders Kurzzeitmessungen und Bewegungsuntersuchungen ermöglicht. Die Selbstbauanleitungen sind in den Versuchsbeschreibungen gegeben.

4.0.2. Im Abschnitt 4.2. werden Versuche zu den *Wechselstromwiderständen* zusammengefaßt.
V 4.2.1. zeigt die Gleichheit des Ohmschen Widerstandes im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis. Zur experimentellen Behandlung des induktiven Widerstandes bieten sich zwei verschiedene Wege an. Im V 4.2.2. wird der induktive Widerstand eingeführt, indem man den Gleichstrom- und den Wechselstromwiderstand eines langen geradlinigen Leiters mit dem Widerstand desselben Leiters vergleicht, nachdem dieser auf einen Eisenkern gewickelt wurde. Es ist ein erheblich größerer Widerstand des aufgewickelten Drahtes im Wechselstromkreis festzustellen. Die Schüler erkennen, daß die Selbstinduktion die Ursache dieses Widerstandes ist. Dabei wird mit Netzfrequenz gearbeitet. Eine zweite Möglichkeit der Einführung des induktiven Widerstandes gibt V 4.2.3. Die Herleitung des induktiven Widerstandes aus der Induktivität wird hier deduktiv vorgenommen.
Die Versuchsreihe führt weiter zu V 4.2.4. Es wird gezeigt, in welcher Weise der induktive Widerstand von der Induktivität abhängt. Außerdem wird im V 4.2.4. die Abhängigkeit des induktiven Widerstandes von der Frequenz abgeleitet, indem man sich eines rotierenden Stromwenders bedient, durch den man die Frequenzen in weiten Grenzen ändern kann. Mit einer Bestimmung des induktiven Widerstandes und der Induktivität im V 4.2.5. schließt die Versuchsreihe über den induktiven Widerstand ab. Die Ableitung der Gleichungen zur Berechnung des induktiven Widerstandes aus den Versuchen ist schwierig und kaum durchzuführen, da der induktive Widerstand immer mit einem Ohmschen Widerstand gemeinsam auftritt. Man wird sie daher im Unterricht zweckmäßigerweise besser deduktiv entwickeln und den Versuch 4.2.5. zur Festigung des erarbeiteten Stoffes einsetzen. Es folgen drei Versuche zum kapazitiven Widerstand (V 4.2.6. bis 4.2.8.), die in der Zielsetzung und der Aufgabenstellung den Versuchen zum induktiven Widerstand entsprechen. Zur weiteren Übung und Festigung dient V 4.2.9., bei dem Wechselstromwiderstände verschiedener Art zusammengeschaltet werden. Es wird das Parallelschalten und das Hintereinanderschalten von induktiven und kapazitiven Widerständen gezeigt und schließlich das Hintereinanderschalten eines Ohmschen, eines kapazitiven und eines induktiven Widerstandes betrachtet. Das Parallelschalten dieser Bauelemente und die Fülle weiterer Schaltkombinationen bleiben unberücksichtigt.

4.0.3. Es folgen im Abschnitt 4.3. einige Versuche, die das Auftreten von *Phasenverschiebungen* an den Wechselstromwiderständen zeigen. Der Versuch 4.3.1. ist zur Einführung geeignet, da er die Vorgänge wegen der zur Verwendung kommenden niedrigen Frequenz gewissermaßen im Zeitlupentempo zeigt. Die Versuche 4.3.2. bis 4.3.4. sind gleichwertig. Als Anzeigegerät wird in den beiden ersten Versuchen der Mehrfach-Glimmlichtoszillograf, im letzten der Katodenstrahloszillograf mit Umschalter verwendet. Die Versuche 4.3.5. und 4.3.6. leiten über zur Behandlung der *Schwingkreise*, die im 10. Teil ausführlicher erfolgt.

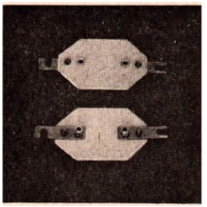


Abb. 4.0.5./1
Adapter für zweipolige Bauelemente

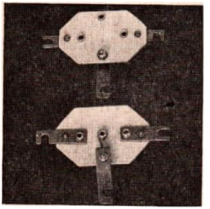


Abb. 4.0.5./2
Adapter für dreipolige Bauelemente (Umschalter, Drehwiderstände)

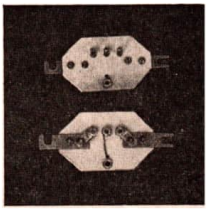


Abb. 4.0.5./3
Adapter für Kastenspulen

4.0.4. Abschnitt 4.4. bringt Aufschluß über die *Effektivwerte der Spannung und der Stromstärke* und über das *Messen von Arbeit und Leistung* im Wechselstromkreis. V 4.4.1. kann man durchaus schon vor der genauen Behandlung des Wechselstromkreises im Unterricht bei der Untersuchung der Meßgeräte bringen. Bei der Behandlung des Wechselstromkreises kann man mit V 4.4.1. die Begriffe Effektivwert der Spannung und der Stromstärke einführen. Das Verhältnis von Effektiv- und Maximalwert ist mit V 4.4.2. zu ermitteln, und anschließend ist zu zeigen, wie Meßgeräte die Effektivwerte anzeigen (V 4.4.3.). Der Abschnitt schließt mit Versuchen zur Leistung im Wechselstromkreis, zu deren Erklärung die Versuche zur Phasenverschiebung aus 4.3. herangezogen werden müssen.

4.0.5. Der *Selbstbau von Adaptern* (Abb. 4.0.5./1 bis 3) für den Einsatz von Teilen des Schülerexperimentiergerätes ist auch dann noch empfehlenswert, wenn zum Tafelschaltgerät bereits eine Zusatzrüstung mit entsprechenden Teilen vorhanden ist, weil besonders für Arbeitsgemeinschaften und für den fakultativen Unterricht das Sortiment der einsetzbaren Bauelemente wesentlich vergrößert wird.

Benötigtes Material

1. Plastplatten (3 mm ... 4 mm dick)
2. Messingblechstreifen (0,7 mm ... 1 mm dick; 12 mm breit)
3. Schrauben und Muttern (M 3)
4. Telefonbuchsen
5. Steckerstifte (∅ 4 mm)

Die Bauelementeträger werden in den Abmessungen der Originalteile des Tafelschaltgerätes gefertigt.
Die Messinglaschen werden durch Schrauben M3 und Telefonbuchsen mit den Plastplatten verbunden. Dazu sind zusätzliche Buchsen einzusetzen und durch kurze Drähte zu verbinden. Die Abbildungen zeigen die notwendigen Bauformen für die Versuche dieses Abbschnitts, weitere folgen in 5.0.4.

4.1. Nachweis eines Wechselstromes

4.1.1. Erzeugung von Wechselströmen niedriger Frequenz

1. Gerät zur Erzeugung von Wechselströmen ⑤, dazu erforderliches Material:
   a) Scheibenwischermotor (12 V) mit Getriebe
   b) Drehwiderstand
   c) Holzbrett
      (A 4, 14 mm ... 20 mm dick)
   d) kräftiger Metallwinkel
   e) Metallmuffe mit 2 Stiftschrauben und Längsbohrung (6 mm) oder ein Stück Gummischlauch
   f) 3 Geräteklemmen
   g) 2 M-6-Maschinenschrauben (40 mm) mit Rändelmuttern
   h) 3 Holzschrauben
2. 2 Stromversorgungsgeräte
   (20 V — ; 2 V —)
3. Spannungsmesser (5 V; Nullpunktmittellage)

Methodischer Hinweis

Durch die Verwendung von Wechselspannung kleiner Frequenz kann man eine große Anzahl von Versuchen gestalten, mit denen die Vorgänge im Wechselstromkreis besonders gut zu erklären sind.

Herstellen des Gerätes

Man befestigt einen Scheibenwischermotor an einem kräftigen Metallwinkel mit Holzschrauben auf einem Grundbrett (Abb. 4.1.1./1). Auf das Grundbrett wird auch der Drehwiderstand des Aufbausatzes geschraubt, nachdem man vorher den Bedienungsknopf entfernt und in die Grundplatte zwei Schlitzlöcher eingearbeitet hat. Die Achsen der beiden Geräte müssen gut fluchten. Durch ein Stück Gummischlauch werden die Achsen miteinander verbunden. Der Drehwiderstand ist mit einer Mittelanzapfung versehen, an die eine Geräteklemme angeschlossen ist.

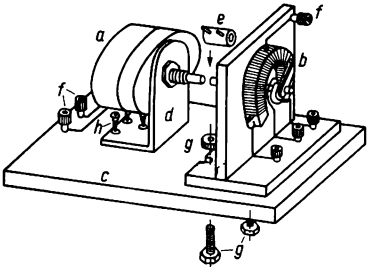


Abb. 4.1.1./1
Gerät zum
Erzeugen von Wechselströmen
extrem kleiner Frequenz

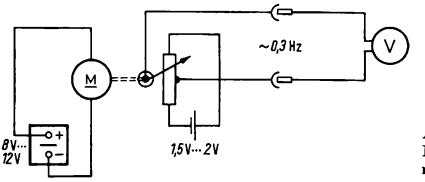


Abb. 4.1.1./2
Erzeugen von Wechselströmen niedriger Frequenz

Versuch

Man legt an den Scheibenwischermotor eine Gleichspannung von 8 V ... 12 V und prüft, ob sich der Schleifer am Drehwiderstand nach beiden Seiten gleich weit um die Mittelanzapfung bewegt. Nötigenfalls stellt man an der Muffe nach. Nunmehr wird der Widerstand nach Abb. 4.1.1./2 mit einer anderen Gleichspannungsquelle von etwa 1,5 V ... 2 V verbunden. An der Mittelanzapfung und am Schleifkontakt ist eine Wechselspannung mit einem Scheitelwert von etwa 0,5 V und einer Frequenz von etwa 0,3 Hz ... 0,5 Hz abnehmbar. Die Frequenz ist durch Verändern der Gleichspannung am Motor in geringen Grenzen variierbar. Zum Nachweis der Wechselspannung schaltet man einen Spannungsmesser mit Nullpunktmittellage an die genannten Teile.

4.1.2. Nachweis des Wechselstromes durch einen Schleifenoszillografen

1. Stromversorgungsgerät (4 V ~)
2. Schleifenoszillograf (einfach oder dreifach)
3. Gleitwiderstand (300 Ω) als Spannungsteiler
4. Drehspiegel
5. lichtdurchlässiger Bildschirm (600 mm lang)
6. Physikleuchte
7. Doppelkondensator ($f = +60$ mm)
8. Linse ($f = +100$ mm)
9. Lochblende
10. Transformator (220 V/6 V)
11. optische Bank
12. Schalter

Methodische Hinweise

1. Schleifenoszillografen erfordern einen verhältnismäßig hohen Aufwand für den Versuchsaufbau. Sie haben aber den Vorteil, daß man große und gut zu beobachtende Bilder vorführen kann.
2. Beim Einsatz als Zwei- oder Dreifachoszillograf kann man durch vorgeschaltete Farbglasfilter die Kurven gut unterscheiden.

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist der Abb. 4.1.2./1 zu entnehmen. Der Drehspiegel wird so aufgestellt, daß der Glühfaden der Physikleuchte etwa in halber Höhe des Drehspiegels liegt. Durch Verschieben der Glühpunktlampe ist auf dem Bildschirm ein möglichst kleiner, heller Lichtpunkt einzustellen. Die Wendel der Lampe wird senkrecht gestellt.
An die Drahtschleife des Oszillografenspiegels legt man über einen als Spannungsteiler geschalteten Gleitwiderstand die Wechselspannung von 2 V ... 4 V des Stromversorgungsgerätes, so daß am Oszillografen eine Spannung von 0,3 V liegt.

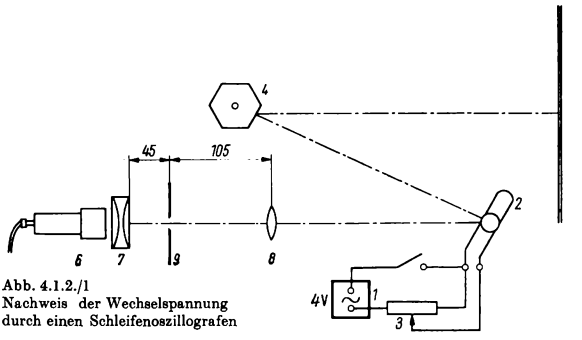


Abb. 4.1.2./1
Nachweis der Wechselspannung durch einen Schleifenoszillografen

Versuch

Wird der Wechselstrom eingeschaltet, so erscheint auf dem Bildschirm beim Drehen des Drehspiegels die sinusförmige Wechselstromkurve. Der Betrag der Amplitude kann durch den Spannungsteiler eingestellt werden. Damit die Leiterschleife schon bei schwachen Wechselströmen gut anspricht, ist sie mit Hilfe der Spannvorrichtung so zu spannen, daß die mechanische Eigenfrequenz des Systems mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt.
Die vom Oszillografen erzeugte Kurve darf nicht über den Projektionsschirm wandern, sondern muß zum Stehen gebracht werden. Das erreicht man dadurch, daß man die Drehzahl des Drehspiegels entsprechend einstellt.

Bemerkungen

1. Durch den Versuch können in erster Linie Wechselströme mit $f = 50$ Hz, aber auch Wechselströme anderer Frequenzen (bis zu etwa 500 Hz) veranschaulicht werden.
2. Mit dem Dreifachoszillografen kann man gleichzeitig zwei oder drei Wechselspannungs- oder Wechselstromstärkekurven zeigen.

Netzspannung

4.1.3. Nachweis des Wechselstromes durch Glimmlicht

Zu Variante a

1. Glimmlampenschwenkstab
2. Widerstand (500 kΩ)
3. Stabglimmlampe Typ GDL Ur
4. Polsucher

Zu Variante b

5. U-Kern, geblättert
6. I-Kern, geblättert
7. Spule (500 Wdg.)
8. Spule (15000 Wdg.)
9. Grundbrett mit Spannvorrichtung
10. große zylindrische Stabglimmröhre
11. Drehspiegel
12. Gleitwiderstand (300 Ω)
13. Netzadapter

Zu Variante c

14. Dreifach-Glimmlichtoszillograf (S), dazu erforderliches Material:
    a) Hartpapier-,Sperrholz- oder Hartfaserplatten (5 mm dick)
    b) Holzschrauben
    c) 4 Holzklötze
    d) 3 Stabglimmlampen
    e) 6 Blechwinkel
    f) 12 Telefonbuchsen
    g) 3 Widerstände (500 kΩ)
    h) 3 Drehwiderstände (1 MΩ)
    i) Schraube M4 mit 2 Muttern und 2 Unterlegscheiben

Methodische Hinweise

1. Die Funktionsweise einer Glimmlampe zum Nachweis und zur Beobachtung von Wechselspannungskurven ist für die Schüler leicht zu übersehen, und damit ist es häufig wirkungsvoller, diese zu benutzen, als den Katodenstrahloszillografen.
2. Der Glimmlampenschwenkstab ist zu empfehlen, wenn nur kurzzeitige Beobachtungen von Wechselspannungen, pulsierenden Gleichspannungen und geglätteten Gleichspannungen notwendig sind.
3. Mit dem Glimmlichtoszillografen und Drehspiegel können genauere und längere Beobachtungen mehrerer Kurven auch mit Phasenunterschieden erfolgen, so daß er in gewissem Grade einen Katodenstrahloszillografen mit elektronischem Schalter ersetzen kann.
4. Die Glimmlampen erfordern bei den meisten Versuchen einen Schutzwiderstand (500 kΩ) und arbeiten nur mit Spannungen über 100 V.

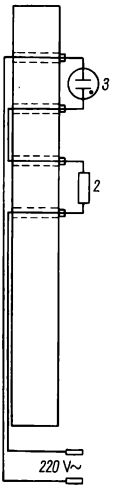


Abb. 4.1.3./1 Glimmlampen-Schwenkstab

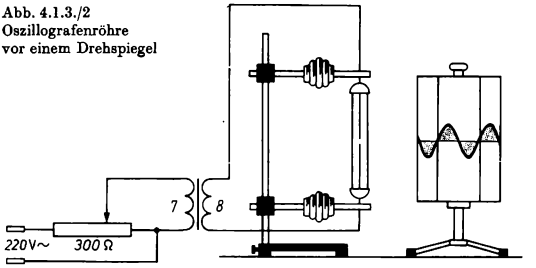
Variante a: Nachweis durch eine Glimmlampe

Die Leitungen sind nach der Abbildung 4.1.3./1 am Glimmlampenschwenkstab befestigt und zu den Buchsen geführt. In die Buchsen werden der Vorwiderstand von 500 kΩ und die Glimmlampe gesteckt. Beim Anschluß an eine Wechselspannung, die größer als 100 V ist, leuchtet die Glimmlampe auf. Wird der Stab rasch im verdunkelten Zimmer hin und her bewegt, so sieht man die sinusförmige Kurve. Mit einem Polsucher kann man den Versuch behelfsmäßig ausführen.

Variante b: Nachweis durch einen Glimmlichtoszillografen

Nach Abbildung 4.1.3./2 wird an die Primärspule des Transformators über einen Gleitwiderstand in Spannungsleiterschaltung die Wechselspannung von 220 V gelegt. Eine Stabglimmlampe wird in zwei Holtzschen Klemmen an ein Stativ geklemmt und mit der Sekundärspule verbunden. Die primäre Spannung wird langsam so weit erhöht, bis sich die beiden stabförmigen Elektroden der Röhre auf etwa ein Drittel ihrer Länge mit Glimmlicht überzogen haben. Das Glimmlicht beobachtet man im rotierenden Drehspiegel. Es zeigt sich die sinusförmige Kurve der Wechselspannung. Auftretende Verzerrungen und Lücken in den Spannungsumkehrpunkten sind durch den Unterschied zwischen der Zünd- und der Löschspannung zu erklären.

Abb. 4.1.3./2
Oszillografenröhre
vor einem Drehspiegel



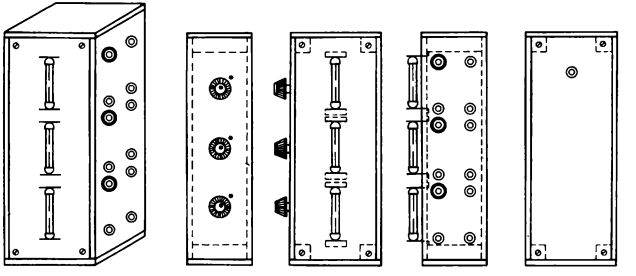


Abb. 4.1.3./3 Aufbau des Kastens für den Dreifach-Glimmlichtoszillografen

Variante c: Vergleich von Wechselstromkurven durch einen Dreifach-Glimmlichtoszillografen (Abb. 4.1.3./3)

Aus Hartpapier-, Hartfaserplatten oder Sperrholz wird ein Kasten mit den Abmessungen von etwa 230 mm · 100 mm · 60 mm gefertigt. In die Ecken setzt man von innen Vierkanthölzer ein, daß man die Rückseite mit vier Holzschrauben befestigen kann. In die Vorderseite werden Schlitze eingesägt, durch die man Blechwinkel steckt, die im herausragenden Teil Bohrungen zum Festklemmen der Glimmlampen haben. Der Abstand der Glimmlampen soll nicht mehr als 10 mm betragen. In die eine Seitenfläche werden 6 Buchsenpaare eingesetzt. An der anderen Seitenfläche werden übereinander 3 Drehwiderstände von 1 MΩ montiert. Die Rückseite erhält in der oberen Hälfte in der Mitte eine Bohrung mit einem Durchmesser von 4 mm. Durch eine Schraube M 4 wird ein kurzer Stativstab zum Festklemmen an einem Stativ befestigt. Die Verdrahtung erfolgt für jede der drei Glimmlampen nach Abbildung 4.1.3./4.
Die Bedienungsknöpfe der Drehwiderstände erhalten rote Markierpunkte. Auf dem Gehäuse wird für jeden Drehwiderstand ebenfalls ein Markierungspunkt angebracht. Die beiden Punkte müssen in Deckung stehen, wenn der Widerstand voll

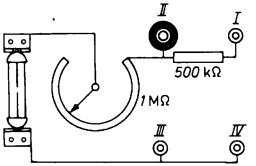


Abb. 4.1.3./4
Schaltung der einzelnen Glimmlampen

eingeschaltet ist. Die Buchse II wird durch einen roten Ring gekennzeichnet. Es empfiehlt sich, auf die Oberseite des Kastens einen Zettel zu kleben mit der Aufschrift

Buchse ◎ nur benutzen

bei Stellung ⏱

Die Buchse II ermöglicht es, den Schutzwiderstand der Glimmlampe ganz auszuschalten. Das ist bei einigen Versuchen erforderlich, zum Beispiel beim Untersuchen der Phasenverschiebung an hochohmigen Widerständen und beim Untersuchen von Schwingungskreisen. Damit die Glimmlampen nicht gefährdet werden, ist es angebracht, Bananenstecker in die Buchsen II zur Blockierung zu stecken. Der Kasten mit den Glimmlampen wird in einem Abstand von etwa 20 cm vor einem Drehspiegel aufgestellt.
Zum Vergrößern der Bilder ist es möglich, zwischen die Glimmlampen und den Spiegel einen Rahmen zu bringen, in den senkrecht übereinander 3 rechteckige Leselupen eingebaut sind. Die Drehzahl des Drehspiegels wird so eingestellt, daß die Bilder der Wechselstromkurven entstehen.

Benutzungshinweise

Mit dem Gerät können folgende Versuche durchgeführt werden:
1. Betrachten einfacher Wechselstromkurven, z.B. Kurven der Netzwechselspannung und der Wechselspannungen elektrischer Schwingungen,
2. Betrachten von Dreiphasenwechselspannungen,
3. Phasenverschiebungen im Wechselstromkreis,
4. Untersuchen von Gleichrichtern, Gegenüberstellung der Wechselspannungskurven mit den Kurven des pulsierenden Gleichstromes,
5. Demonstration der Modulation, nämlich der Trägerschwingung, der Modulationsschwingung und der modulierten Schwingung.

4.1.4. Vergleich einer unbekannten Wechselstromfrequenz mit der Frequenz der Netzspannung

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Katodenstrahloszillograf
3. elektronischer Schalter
4. Experimentiermotor und Wechselstromgenerator nach V 3.1.3. oder
5. Tonfrequenzgenerator (10. Teil)

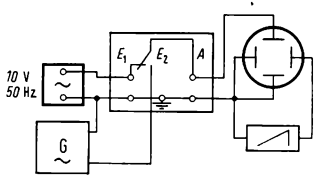


Abb. 4.1.4./1
Anschluß von zwei Wechselspannungen über einen elektronischen Umschalter an einen Oszillografen

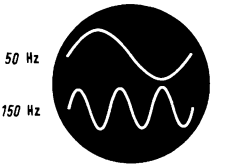


Abb. 4.1.4./2
Oszillogramm zweier Wechselspannungen

Methodische Hinweise

1. Die hier erläuterte Methode des Frequenzvergleichs durch die Abbildung der Kurven auf dem Bildschirm eines Oszillografen ist gegenüber anderen Möglichkeiten, z. B. Lissajous-Figuren, von den Schülern leicht zu verstehen.
2. Es können die Frequenzen von Wechselstromgeneratoren und Tonfrequenzgeneratoren bestimmt werden (siehe 10. Teil).

Versuch

Nach dem Schaltplan in Abbildung 4.1.4./1 wird eine Wechselspannung mit der Netzfrequenz (50 Hz) an den einen Eingang eines elektronischen Umschalters gelegt. Die zu untersuchende Wechselspannung eines Generators oder eines Tonfrequenzgenerators wird an den zweiten Eingang des Umschalters angeschlossen. Der Ausgang des Umschalters ist mit dem Y-Eingang des Oszillografen zu verbinden. Die Amplituden der beiden Kurven können getrennt an den Eingängen des Umschalters und gemeinsam am Oszillografen eingestellt werden. Es empfiehlt sich, die Höhenverstellung am Umschalter so vorzunehmen, daß die beiden Kurven sich nicht überschneiden (Abb. 4.1.4./2).
Die Kippfrequenz wird so eingestellt und mit dem Netz synchronisiert, daß das Bild der Netzspannung steht. Auch bei laufendem Bild der Spannung des Generators kann man ungefähr auszählen, wie viele Schwingungen auf eine Schwingung der Netzspannung entfallen.
Ein Wechselstromgenerator nach V 3.1.3. wird am besten mit einem Experimentiermotor angetrieben, damit die Drehzahl und damit die Frequenz annähernd konstant bleibt.
Schaltungen für Tonfrequenzgeneratoren findet man im 10. Teil (Wellenlehre).

Bemerkung

Der Vergleich kann auch zwischen einem Wechselstromgenerator, dessen Frequenz durch Drehzahlmesser bestimmt wird, und einem Tonfrequenzgenerator ausgeführt werden.

4.1.5. Modell eines Frequenzmessers

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Polwender
3. Handantriebsvorrichtung oder Experimentiermotor
4. U-Kern, geblättert
5. 2 Spulen (250 Wdg.)
6. 2 Blattfedern

Methodische Hinweise

1. Obwohl die Versuchsanordnung weit von der technischen Ausführung eines Frequenzmessers abweicht, sollte man diesen Versuch zur Erklärung der Wirkungsweise heranziehen.
2. Der Versuch ist auch geeignet, in der Schwingungslehre die Resonanz zu demonstrieren.

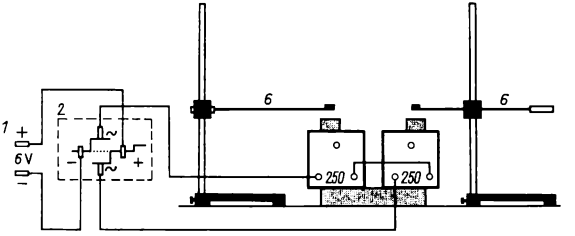


Abb. 4.1.5./1 Modellversuch eines Zungenfrequenzmessers

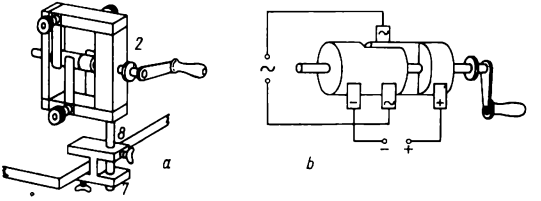


Abb. 4.1.5./2 Rotierender Polwender nach Rühmkorff.
a) Ansicht des Gerätes, b) schematische Wiedergabe der Schaltwalze

Versuch

Nach Abb. 4.1.5./1 wird an den Polwender eine Gleichspannung gelegt. Dieser ist mittels einer Tischklemme und eines kurzen Stativstabes mit Gewinde am Experimentiertisch befestigt (Abb. 4.1.5./2). Er hat die Aufgabe, in Verbindung mit einem Handantrieb oder mit einem Motor die beiden Spulen des Elektromagneten mit

Wechselstrom veränderlicher Frequenz zu versorgen. Über den beiden Polen des Magneten befinden sich im Abstande von 25 mm die freien Enden zweier Blattfedern, die 160 mm lang und 13 mm breit sind. Sie sind an zwei Stativen durch Kreuzmuffen so befestigt, daß die eine in ganzer Länge, die ander in halber Länge frei schwingen kann. Die freien Enden der Federn sind besser sichtbar, wenn sie mit weißen Papierfähnchen versehen werden.
Wird der Stromwender in Drehung versetzt, so beginnen beide Federn leicht zu schwingen. Die Blattfeder zeigt eine maximale Amplitude, deren Eigenfrequenz mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt.
Dieser Vorgang findet seine technische Verwendung beim Zungenfrequenzmesser. Es ist zweckmäßig, den Motor zuerst mit großer Drehzahl laufen zu lassen und diese dann herabzusetzen.

Bemerkungen

1. Der Versuch ist mit einem Tageslichtschreibprojektor projizierbar, indem man den Elektromagneten auf die Projektionsfläche legt.
2. Man kann das Modell einem Frequenzmesser noch ähnlicher gestalten. 5 Stahlblechstreifen mit abgestufter Länge werden zwischen zwei miteinander verschraubten Holzleisten nebeneinander eingespannt. Unter jeden Streifen wird eine Spule (500 Wdg.) mit I-Kern aus dem SEG Elektrik gestellt. Die Spulen werden in Reihe geschaltet.
3. Eine besonders einfache Gestaltung des Modells eines Zungenfrequenzmessers ist mit dem Aufbausatz Elektrizitätslehre möglich, wie in Abbildung 4.1.5./3 gezeigt wird.

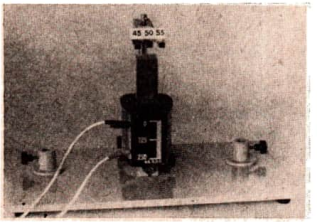


Abb. 4.1.5./3
Modell eines Zungenfrequenzmessers mit Teilen des Aufbausatzes Elektrizitätslehre

4.1.6. Nachweis von Wechselspannungen und Messen von Frequenzen durch Staubfiguren [SE]

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (40 V ~)
2. Frequenzschreiber
3. aloxidierte Aluminiumplatte (250 mm × 350 mm)
4. 2 Widerstandskabel ⑤
5. Lykopodium (Bärlappsporen) oder Schwefelpulver

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 5., außerdem
6. Doppelfrequenzschreiber ⑧

Methodische Hinweise

1. Die Versuche ermöglichen es, ohne den Einsatz kostspieliger Geräte den zeitlichen Verlauf von Wechselspannungen abzubilden.

Der Nachteil gegenüber anderen Oszillogrammen liegt darin, daß die Elongation nicht abgebildet wird, der Vorteil aber, daß man bleibende Spuren erhält, die gut auszumessen sind.

2. Die Versuche können als Demonstrationsversuche durchgeführt werden, indem man mit größerer Geschwindigkeit arbeitet und so größere Abstände der Figuren erhält. Die Platte wird nach dem Versuchsablauf hochgehalten und den Schülern gezeigt, oder es wird ein um 45° geneigter Spiegel darüber angebracht.
   Bei Schülerexperimenten wird mit kleineren Geschwindigkeiten gearbeitet.

Beschreibung der Geräte (Abb. 4.1.6./1.)

1. Ein kleines vernickeltes oder verchromtes Stück Rohr ist quer zur Achse mit einem Isoliergriff verbunden, so daß die Walze nicht rollend, sondernd schleifend bewegt wird. Wegen des Drehgelenkes, an dem sie befestigt ist, kann sie sich auch einer unebenen Unterlage anpassen. Eine Anschlußbuchse im Griff hat leitende Verbindung mit der Walze.

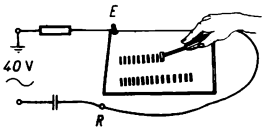


Abb. 4.1.6./1
Nachweis einer Wechselspannung durch einen Frequenzschreiber

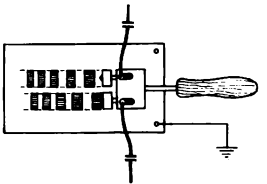


Abb. 4.1.6./2 Vergleich zweier Frequenzen mit einem Doppelschreiber. Die Abbildung gibt zwei Drehstromphasen wieder

2. Ein rechteckiges Aluminiumblech (etwa 250 mm × 350 mm) beliebiger Dicke ist für alle Versuche brauchbar, wenn das Blech mit einer dünnen Oxidhaut überzogen ist, wie das fast immer der Fall ist. Eine aloxidierte Platte ist besonders zu empfehlen. Es ist auch möglich, eine kupferkaschierte Platte dünn mit schwarzem Nitrolack zu streichen.
3. Ein Verbindungsleiter mit eingebautem Widerstand von etwa 1 MΩ oder mit eingebautem Kondensator mit einer Kapazität von etwa 1 nF soll als Widerstandskabel bezeichnet werden. Die Symbole für die Kabel sind in den Abbildungen 4.1.6./1 und 4.1.6./2 zu erkennen.
   Zur Selbstanfertigung eines Kabels mit eingebauter Kapazität nimmt man einen doppeladrigen Verbindungsleiter von etwa 1,50 m Länge und schließt an beiden Enden einen Bananenstecker an getrennten Adern an. Dadurch wird nur die Kapazität zwischen den Adern wirksam, es besteht aber keine galvanische Verbindung zwischen ihnen. Die freien Enden beider Adern sind auf beiden Seiten sehr sorgsam zu isolieren.
   Dieses Kabel hat zwar nur eine Kapazität von etwa 100 pF, genügt aber für alle Versuche.
4. Für alle Versuche darf nur unbedingt trockenes Schwefelpulver benutzt werden. Auch Lykopodium ist brauchbar, wie es für Kundtsche Staubfiguren benutzt wird.

Versuch 1: Nachweis von Wechselspannungen

Die Meßunterlage wird möglichst dünn mit Pulver bestreut, das mit einem trockenen Pinsel oder Lappen — nicht mit einem feuchten Finger — etwas verrieben wird.
Die Meßunterlage und der Frequenzschreiber werden durch je ein Widerstandskabel mit der Wechselspannungsquelle verbunden.
Führt man den Frequenzschreiber mit leichtem Andruck ziehend oder schiebend über die Meßunterlage, so erhält man die in Abb. 4.1.6./1 gezeigte Hell-Dunkel-Spur. Je nach der Geschwindigkeit der Handbewegung liegen die einzelnen Spuren eng oder weit auseinander. Die Spuren sind um so deutlicher, je trockener es im Versuchsraum ist.
Durch die Berührung des Frequenzschreibers mit dem Pulver wird dieses negativ aufgeladen und haftet an der Unterlage fest, wenn diese positiv geladen ist. Er wird von ihr abgestoßen und vom Frequenzschreiber mitgenommen, wenn die Ladung negativ ist.
Es entspricht jede Spur einer Hundertstelsekunde, wenn es sich um die Netzfrequenz handelt. Beim Auszählen der Spuren fasse man je eine helle und dunkle Spur zu einer Periode zusammen und zähle die Perioden.

Versuch 2: Messen von Frequenzen

Abbildung 4.1.6./2 zeigt den Doppelfrequenzschreiber, dessen Walzen durch gutes Isoliermaterial voneinander getrennt sein müssen. Die Anschlußbuchsen für die beiden Walzen befinden sich im Isoliermaterial, nicht im Griff.
Für Versuche mit Dreiphasenwechselstrom kann man dementsprechend auch drei Walzen nebeneinander montieren.

Versuchsablauf

1. Die Spannungen der beiden Wechselspannungsquellen werden über je ein Widerstandskabel an den Frequenzschreiber angelegt.
2. Die Meßplatte wird mit Pulver eingerieben und über die Widerstandskabel mit den noch freien Anschlüssen der beiden Spannungsquellen verbunden.
3. Zieht man den Doppelfrequenzschreiber mit leichtem Druck über die Unterlage, so werden zwei Hell-Dunkel-Spuren sichtbar.

Auswertung

Liegen n Perioden einer Wechselspannung, deren Frequenz f bekannt ist, auf der Strecke s, so ist die Zeit t für die Bewegung durch

$$t = \frac{n}{f} \text{ gegebn, worin } f \text{ die Wechselstromfrequenz}$$

bedeutet.
Für die Netzfrequenz $f = 50$ Hz ist folglich

$$t = \frac{n}{50} \cdot s = \frac{2n}{100} \cdot s \,.$$

Die beiden Walzen haben in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt. Für gleiche Wege gilt demnach

$$t = t_1 \quad \text{oder} \quad \frac{n}{f} = \frac{n_1}{f_1} \quad \text{oder} \quad f_1 = f \cdot \frac{n_1}{n} \,.$$

Somit ist f_1 durch f bestimmt.

Bemerkungen

1. Mit dem *Doppelfrequenzschreiber* ist es möglich, auch die Phasenverschiebungen an Wechselstromwiderständen sowie die Phasenunterschiede im Dreiphasenwechselstrom nachzuweisen.
2. Der Doppelfrequenzschreiber kann an Schwingkreise zum Nachweis gedämpfter und ungedämpfter Schwingungen angeschlossen werden.

4.2. Der Wechselstromwiderstand

4.2.1. Der Ohmsche Widerstand im Wechselstromkreis

1. Stromversorgungsgerät (4 V ≃)
2. Gleitwiderstand (300 Ω)
3. Grundbrett mit 3 geradlinigen parallelen Konstantandrähten (∅ 0,3 mm; je 5,6 Ω)
4. Spannungsmesser (5 V ≃)
5. Strommesser (1 A ≃)
6. Schalter

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist zwar einfach durchzuführen, aber in der exakten Auswertung methodisch schwieriger. Es wird empfohlen, den Wechselstromwiderstand deduktiv einzuführen. Er ist der Quotient der Momentanwerte $R = \frac{u}{i}$.

   Bei konstanter Temperatur ist dieser nach dem Ohmschen Gesetz konstant und gleich dem Gleichstromwiderstand $R = \frac{U}{I}$. Der Wechselstromwiderstand ist bestimmbar aus dem Quotienten der Maximalwerte oder der Effektivwerte

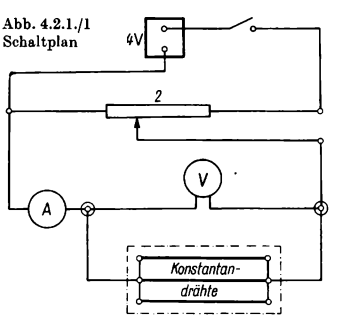
   $$R = \frac{U_{max}}{I_{max}} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} .$$

2. Die polytechnische Bedeutung liegt darin, daß man mit dem Versuch begründen kann, warum Wärmegeräte und Glühlampen an gleich große Wechsel- oder Gleichspannungen angeschlossen werden können.

Versuch

Nach Abbildung 4.2.1./1 wird an die Widerstandsdrähte des Widerstandsbrettes eine Gleichspannung gelegt. Die Spannung und die Stromstärke werden gemessen und daraus der Ohmsche Widerstand berechnet. Der Versuch wird mit einer Wechselspannung von 50 Hz wiederholt. Mit Hilfe des Potentiometers stellt man die Spannung auf den gleichen Wert ein wie beim Gleichstrom, damit die Messungen unter den gleichen äußeren Bedingungen erfolgen. Es zeigt

Abb. 4.2.1./1
Schaltplan



sich, daß die Widerstände für beide Stromarten nahezu gleich sind. Der Ohmsche Widerstand eines Leiters in einem Wechselstromkreis ist ebenso groß wie in einem Gleichstromkreis.

Bemerkungen

1. Der Versuch kann für verschieden große Widerstände ausgeführt werden, indem man die Drähte parallel oder in Reihe schaltet.
2. Es ist davon abzuraten, für diesen Versuch Vielfachmeßgeräte zu verwenden, da beim Umschalten von den Gleichstrom- auf die Wechselstrommeßbereiche andere Gerätewiderstände auftreten, die das Versuchsergebnis stark beeinträchtigen würden.
3. Bei der Durchführung als Schülerexperiment sind der Drehwiderstand (50 Ω) und die Konstantandrähte aus dem SEG Elektrik zu verwenden.

4.2.2. Der Übergang zum induktiven Widerstand

1. Akkumulator oder Flachbatterie (4,5 V)
2. Stromversorgungsgerät (4 V ≃)
3. Gleitwiderstand (300 Ω)
4. Spannungsmesser (5 V ≃)
5. Strommesser (5 A ≃)
6. isolierter Kupferdraht (⌀ 0,3 mm; Länge 10 m ... 15 m)
7. U-Kern, geblättert
8. I-Kern, geblättert
9. Schalter

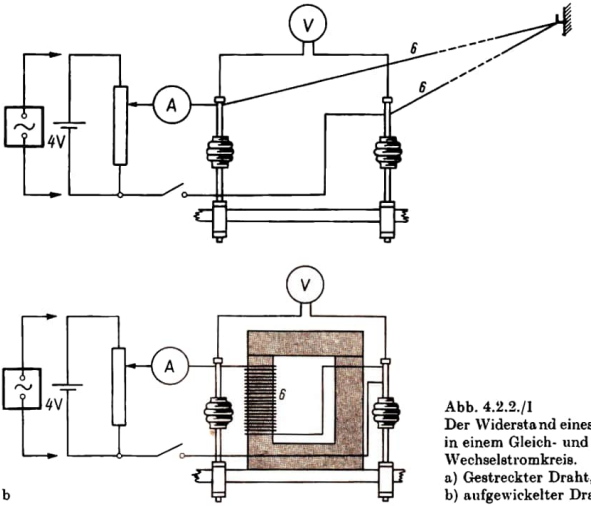


Abb. 4.2.2./1
Der Widerstand eines Drahtes in einem Gleich- und in einem Wechselstromkreis.
a) Gestreckter Draht,
b) aufgewickelter Draht

Methodischer Hinweis

Der Versuch 1 knüpft unmittelbar an V 4.2.1. an. Den Versuch 2 könnte man alleine wie in V 4.2.3. mit einer fertigen Spule durchführen, aber es ist hier gerade die Absicht, deutlich werden zu lassen, wie derselbe Draht als Spule auf einem Eisenkern eine neue Eigenschaft, den induktiven Widerstand, erhält.

Versuch 1

Man spannt über einen Haken in der Wand einen langen isolierten Kupferdraht von einer Holtzschen Klemme zu einer zweiten, die beide auf Tischklemmen befestigt sind (Abb. 4.2.2./1a). Nach V 4.2.1. bestimmt man bei gleichen Spannungen den Gleich- und den Wechselstromwiderstand. Man findet in beiden Fällen denselben Wert, etwa 0,9 Ω.

Versuch 2

Der Draht wird auf den einen Schenkel eines geblätterten U-Kernes gewickelt; der U-Kern wird durch einen I-Kern geschlossen (Abb. 4.2.2./1b). Man bestimmt wieder den Gleichstrom- und den Wechselstromwiderstand. Es stellen sich folgende Ergebnisse ein: Gleichstromwiderstand 0,9 Ω, Wechselstromwiderstand 6,5 Ω. Während der Gleichstromwiderstand gegenüber dem Versuch 1 unverändert bleibt, ist der Wechselstromwiderstand ganz erheblich größer. Es ist dies der Selbstinduktion der Spule zuzuschreiben, die sich als induktiver Widerstand äußert. Man bezeichnet den errechneten Wechselstromwiderstand als Scheinwiderstand.

Bemerkung

Als Gleichstromquelle verwendet man am besten einen Akkumulator oder eine Flachbatterie. Ein Stromversorgungsgerät ist nur geeignet, wenn die Gleichspannung durch einen Kondensator hinreichend geglättet ist. Das ist bei älteren Stromversorgungsgeräten nicht der Fall.

Netzspannung

4.2.3. Die Drosselspule im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis

Zu Versuch 1

1. Akkumulator (6 V) oder Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Gleitwiderstand (300 Ω)
3. Strommesser (0,5 A ≂)
4. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
5. U-Kern, geblättert
6. I-Kern, geblättert
7. Glühlampe (4 V; 0,3 A)
8. Netzadapter

Zu Versuch 2

Geräte 3. bis 8., außerdem
9. Glühlampe (220 V; 15 W)

Methodischer Hinweis

Im Anschluß an V 4.2.2. ist hier zu zeigen, daß der induktive Widerstand gegenüber dem Ohmschen Widerstand erheblich größere Beträge annehmen kann.

Versuch 1: Die Drosselspule im Gleichstromkreis

An eine Gleichspannungsquelle (6 V) wird der in Abbildung 4.2.3./1 wiedergegebene Stromkreis in Reihe geschaltet. Der Gleitwiderstand ist so einzustellen, daß die Glühlampe hell leuchtet. Beim Fortdrehen oder Zurückschieben des Joches vom U-Kern oder beim Herunternehmen der Spule vom Kern ändern sich die Helligkeit

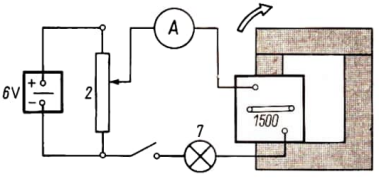


Abb. 4.2.3./1
Drosselspule im Gleichstromkreis

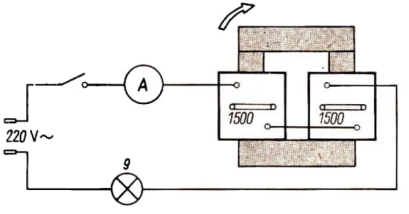


Abb. 4.2.3./2
Drosselspule
im Wechselstromkreis

der Glühlampe und der Ausschlag des Strommessers nicht. Die Spule wirkt im Gleichstromkreis nur als Ohmscher Widerstand.

Versuch 2: Die Drosselspule im Wechselstromkreis

An die Netzspannung (220 V ~) werden die in Abbildung 4.2.3./2 dargestellten Geräte in Reihe geschaltet. Beim Einschalten des Stromes leuchtet die Glühlampe nicht oder nur schwach; der Strommesser zeigt eine sehr kleine Stromstärke an. Beim Fortdrehen oder Zurückschieben des Joches nimmt die Helligkeit der Glühlampe zu; der Ausschlag des Strommessers steigt auf etwa 0,06 A an. Eine Drosselspule wirkt im Wechselstromkreis wie ein großer Widerstand.

Bemerkung

Die Versuche 1 und 2 kann man mit Gleich- und Wechselspannungen bis zu 20 V und mit einer Kleinspannungsglühlampe als Schülerexperiment ausführen lassen.

4.2.4. Abhängigkeit des induktiven Widerstandes von der Induktivität und von der Frequenz

Zu Variante a, Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (4 V ~)
2. Gleitwiderstand (300 Ω)
3. 2 Holtzsche Klemmen
4. Spule (125/250 Wdg.)
5. Spule (500 Wdg.)
6. Spule (750 Wdg.)
7. Spannungsmesser (4 V ~)
8. Strommesser (5 A ~ und 0,5 A ~)
9. U-Kern, geblättert
10. I-Kern, geblättert
11. Schalter

Zu Variante a, Versuch 2

Geräte 1., 2., 3., 6. bis 11., außerdem
12. Akkumulator (6 V) oder Flachbatterie
13. Stromversorgungsgerät (50 V ~)

Zu Variante a, Versuch 3

Geräte 1., 5., 8. bis 11., außerdem
14. Polwender mit Handantrieb oder mit Experimentiermotor
15. Glühlampe (4 V; 0,3 A).

Zu Variante b

16. Stromversorgungsgerät (9 V bis 10 V —)
17. Drehwiderstand (10 kΩ)
18. 2 U- und I-Kerne, geblättert
19. Spulen (500 Wdg.; 3800 Wdg.)
20. Spule (300 Wdg.)
21. Glühlampe (4 V; 0,05 A)
22. Kopfhörer
23. Widerstände (5,1 kΩ; 1,8 kΩ; 100 Ω)
24. Kondensatoren (0,1 μF; 100 pF; 100 nF; 1μF; 4 μF)
25. 2 Transistoren (200 mW)

Methodische Hinweise

1. Da es schwierig ist, die Induktivität einer Spule anders als durch Messung des induktiven Widerstandes zu bestimmen (V 4.2.5.), soll hier einführend die Abhängigkeit des Spulenwiderstandes von der Induktivität qualitativ gezeigt werden. In Versuch 1 wird der Ohmsche Widerstand nicht beachtet.
2. Auch die Abhängigkeit des induktiven Widerstandes von der Frequenz wird nur qualitativ demonstriert. In der Bemerkung wird erläutert, wie dieser Versuch quantitativ ausgewertet werden kann.
3. Die Variante a ist für den Physikunterricht, die Variante b als Schülerexperiment im fakultativen Unterricht oder in Arbeitsgemeinschaften nach Rahmenprogramm vorgesehen.

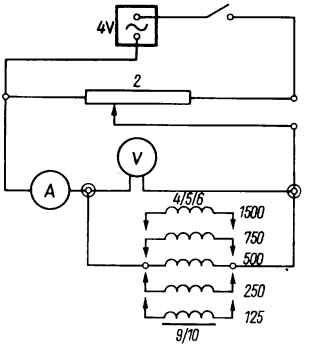


Abb. 4.2.4./1 Nachprüfen des induktiven Widerstandes von Spulen

Variante a

Versuch 1: Abhängigkeit des Widerstandes von der Induktivität

Es werden Spulen mit verschiedenen Windungszahlen nacheinander an eine Wechselspannungsquelle gelegt (Abb. 4.2.4./1). Die Spannung und die Stromstärke werden gemessen, daraus wird der Scheinwiderstand Z der Spule berechnet. Mit jeder Spule können verschiedene weiterführende Versuche durchgeführt werden, indem man die Spule auf einen U-Kern setzt, diesem den I-Kern auflegt und den

I-Kern verschiebt. Die Spannung ist so zu wählen, daß die für die Spulen zulässige Stromstärke nicht überschritten wird und daß die Stromstärke dem Meßbereich des Strommessers angepaßt ist. Die Ergebnisse werden in einer Tabelle nach beigefügtem Muster zusammengestellt.

Beispiele für den Einfluß der Induktivität auf den induktiven Widerstand

Windungszahl N	Spule ohne Kern			Spule auf U-Kern			Spule auf geschlossenem Kern		
	U in V	I in A	Z in Ω	U in V	I in A	Z in Ω	U in V	I in A	Z in Ω
125	0,80	1,9	0,42	1,8	1,5	1,2	2,8	0,16	18
250	2,0	2,4	0,83	3,0	0,75	4	3,5	0,08	44
500	2,3	0,80	2,9	2,8	0,18	16	3,4	0,018	190
750	2,7	0,50	5,4	3,2	0,085	38	3,2	0,0090	360
1500	3,3	0,12	28	3,4	0,020	170	3,4	0,0023	1500

Die Tabelle läßt erkennen, daß der Wechselstromwiderstand einer Spule mit größerer Induktivität zunimmt.

Versuch 2: Abhängigkeit des Widerstandes von der Induktivität an einem besonderen Beispiel

Beim Versuch 1 tritt die Abhängigkeit des induktiven Widerstandes von der Windungszahl nicht klar hervor, da die Spulen unterschiedlich große Ohmsche Widerständ haben. Die Spulen mit 750/1500 Wdg. ermöglichen es, bei doppelter Windungszahl gleiche Ohmsche Widerstände zu erreichen. Man schaltet die Spule auf 1500 Wdg., benutzt aber nur die eine Spulenhälfte mit 750 Wdg. auf geschlossenem Eisenkern (Abb. 4.2.4./2). Es wird der Gleichstromwiderstand bestimmt. Es ergibt sich beispielsweise:

$$U = 1{,}32\ \text{V}, \qquad I = 0{,}2\ \text{A}, \qquad R = \frac{U}{I} = 6{,}6\ \Omega.$$

In gleicher Weise findet man den Wechselstromwiderstand:

$$U = 77\ \text{V}, \qquad I = 0{,}2\ \text{A}, \qquad R = 385\ \Omega.$$

Will man bei 1500 Wdg. den gleichen Ohmschen Widerstand beibehalten, so hat man in zwei Spulen die Wicklungshälften von 750 Wdg. parallel und beide Spulen hintereinander zu schalten (Abb. 4.2.4./3). Man findet
aus $U = 1{,}32$ V und $I = 0{,}2$ A den Gleichstromwiderstand $R = 6{,}6\ \Omega$,
aus $U = 230$ V und $I = 0{,}2$ A den Wechselstromwiderstand $R = 1150\ \Omega$.

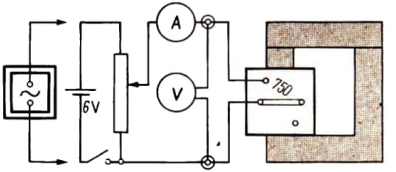


Abb. 4.2.4./2
Wechselstromwiderstand einer Spule mit 750 Wdg.

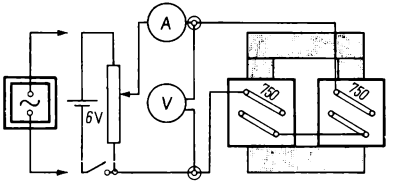


Abb. 4.2.4./3
Wechselstromwiderstand einer Spule mit 1500 Wdg.

Versuch 3: Abhängigkeit des Widerstandes von der Frequenz

Man kann die Wechselspannung auch aus einer Gleichspannung durch einen rotierenden Polwender erzeugen. Als Spannungsquelle verwendet man aus methodischen Gründen wieder einen 6 V-Akkumulator, dessen Spannung man über einen Spannungsteiler an die $\pm$-Buchsen des Stromwenders legt.
An den $\sim$-Buchsen entsteht dann eine Wechselspannung (Abb. 4.2.4./4). An diese werden eine Glühlampe (4 V; 0,3 A), ein Strommesser mit einem Meßbereich bis

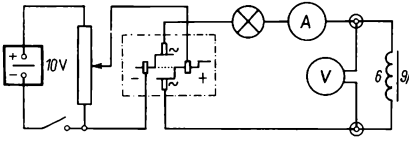


Abb. 4.2.4./4
Zunahme des induktiven Widerstandes mit der Frequenz

zu 0,5 A und eine Spule mit 750 Wdg. auf geschlossenem Eisenkern in Reihe geschaltet. Die Spannung am Spannungsteiler ist so einzustellen, daß die Glühlampe bei stillstehendem Polwender hell leuchtet. Wird der Polwender mit steigender Drehzahl in Umdrehung versetzt, so sinkt die Stromstärke; die Lampe leuchtet immer dunkler. Aus dem Versuch folgt die Frequenzabhängigkeit des induktiven Widerstandes.
Wie hier ohne Beweis mitgeteilt sei, erfolgt die Berechnung des induktiven Widerstandes X_L nach der Gleichung $X_L = \omega \cdot L$ und die Berechnung des Scheinwiderstandes Z nach der Gleichung

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}.$$

Hierin ist R der Ohmsche Widerstand, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz mit der Frequenz f und L die Induktivität.

Bemerkung

Der Versuch 3 läßt sich quantitativ auswerten, wenn man mit bekannten Frequenzen arbeitet. Dazu kann man an den Polwender einen Drehzahlmesser anschließen. Es besteht auch die Möglichkeit, durch eine Zweiweggleichrichtung mit Graetzschaltung (V 5.3.6.) aus der Netzfrequenz eine Frequenz von 100 Hz zu gewinnen, die zwar nicht sinusförmig ist, aber doch mit hinreichender Genauigkeit zum dop pelten induktiven Widerstand führt.
Eine weitere Möglichkeit bieten ein Tonfrequenzgenerator mit meßbarer Frequenz und ein nachgeschalteter Verstärker (vgl. 10. Teil).

Variante b

Versuch 1

Es werden an die Punkte A und B nacheinander eine Wechsel- und eine Gleichspannung von 10 V angelegt. Die Helligkeit der Glühlampe dient der Anzeige für die Widerstandsänderung. Bei angelegter Wechselspannung glimmt die Glühlampe.

Versuch 2

Durch Verschieben des Jochs auf dem Eisenkern oder durch Verwendung von Spulen unterschiedlicher Windungszahl wird bei angelegter Wechselspannung von 10 V der Wechselstromwiderstand geändert. Der Wechselstromwiderstand einer Spule hängt von der Windungszahl n und dem Kernmaterial (Permeabilität μ_r) ab. Außerdem kann er durch die Fläche der Spule und deren Länge beeinflußt werden. Je größer die Induktivität $L = \frac{\mu \cdot \mu_r}{} \frac{A \cdot n^2}{l}$, desto größer ist der induktive Widerstand im Wechselstromkreis. $R_L \sim L$.

Versuch 3

Es wird die Schaltung nach Abbildung 4.2.4./5 aufgebaut. Durch Änderung der Kapazitäten im Kollektorstromkreis des ersten Transistors Tr_1 wird die an die Verstärkerstufe gelegte Wechselspannung in ihrer Frequenz geändert. Bei höherer Frequenz (Ton im Kopfhörer) leuchtet die Glühlampe dunkler. $R_L \sim f$. Für den Wechselstromwiderstand einer Spule gilt: $R_L = 2\pi \cdot f \cdot L$.

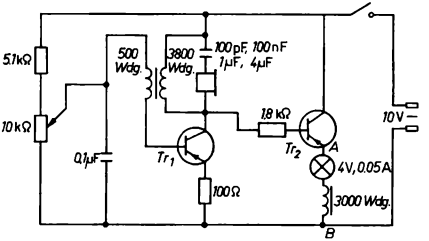


Abb. 4.2.4./5 Schaltplan

4.2.5. Bestimmen des induktiven Widerstandes und der Induktivität [SE]

1. Stromversorgungsgerät (4 V ≃)
2. Spannungsmesser (5 V ≃)
3. Strommesser (0,5 A ≃)
4. Gleitwiderstand (300 Ω) oder Drehwiderstand (50 Ω)
5. Spule (500 Wdg.)
6. Spule (750/1 500 Wdg.)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch setzt die Kentnis der Phasenverschiebung und die Addition von Wechselstromwiderständen (Zeigerdiagramm) voraus. Er ist für Arbeitsgemeinschaften geeignet und setzt V 4.2.4. quantitativ fort.
2. Vergleiche MH V 4.2.8.!

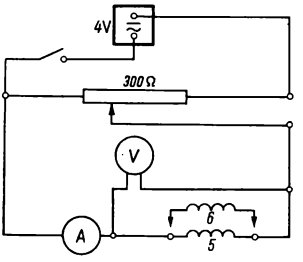


Abb. 4.2.5./1
Ermitteln der Induktivität aus dem Widerstand

Versuch

Unter Verwendung von Gleichstrom werden die Ohmschen Widerstände R der Spulen mit 500 Wdg., 750 Wdg. und 1500 Wdg. bestimmt. Nach der Versuchsanordnung (Abb. 4.2.5./1) werden bei angelegter Wechselspannung mit der Frequenz 50 Hz die Spannung U_{eff} und die Stromstärke I_{eff} gemessen. Die Verwendung zweier Vielfachgeräte erhöht die Genauigkeit der Messung. Der Quotient $\frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ ist der Scheinwiderstand Z; er ist gleich $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$.

Aus der Gleichung $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ werden der induktive Widerstand X_L und die Induktivität L errechnet. Es ist

$$X_L = \omega \cdot L = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad \text{und}$$

$$L = \frac{1}{2\pi f} \cdot \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{314} \cdot \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Beispiele für die Berechnung der Induktivität L

Spannung $U_{eff} = 1$ V; Frequenz $f = 50$ Hz

Windungszahl	Ohmscher Widerstand	Spannung	Stromstärke	Scheinwiderstand	Induktiver Widerstand	Induktivität
N	R	U_{eff}	I_{eff}	$Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$	X_L	L
	in Ω	in V	in A	in Ω	in Ω	in H
500	2,1	1,0	0,41	2,44	1,2	0,004
750	3,5	1,0	0,18	5,6	4,3	0,014
1500	14,0	1,0	0,04	25,0	20,4	0,066

4.2.6. Verhalten eines Kondensators im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis — Der kapazitive Widerstand

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (12 V — ; 12 V ~ , 50 V —)
2. Strommesser (6 mA; Nullpunktmittellage)
3. 3 Kondensatoren (4μF)
4. Glühlampe (6 V; 0,07 A)
5. Morsetaste

Zu Versuch 2

Geräte 1., 3. bis 5., außerdem

6. Schalter
7. Polwender mit Handantriebsvorrichtung oder Experimentiermotor

Methodische Hinweise

1. Die Versuche entsprechen V 4.2.3. mit der Spule.
2. Methodisch kann man sie vor oder nach der theoretischen Herleitung des Verhaltens von Kondensatoren im Unterricht einsetzen.
3. Die Versuche können in der Wiederholung als Black-box-Versuche durchgeführt werden.

Versuch 1: Verhalten eines Kondensators im Gleichstromkreis

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 4.2.6./1 zusammengestellt. Drückt man auf die Taste, so leuchtet die Glühlampe kurz auf und zeigt den Ladestrom an. Danach fließt kein Strom mehr. Läßt man die Taste los, so zeigt ein erneutes kurzes Aufleuchten den Entladestrom des Kondensators an. Die Glühlampe wird durch den Strommesser ersetzt. Der Versuch wird wiederholt. Der zweite Zeigerausschlag von etwa 3 mA ist dem ersten entgegengesetzt gerichtet.

Versuch 2: Fließen eines Wechselstromes am Kondensator

Die Gleichspannung wird durch die Wechselspannung von 12 V und das Meßgerät wieder durch die Glühlampe ersetzt (Abb. 4.2.6./2). Solange die Taste niedergedrückt wird, leuchtet die Glühlampe. Nach Abb. 4.2.6./3 wird in die Versuchsanordnung der rotierende Stromwender eingebaut, der durch die Tischklemme und den kurzen Stativstab an der Tischplatte befestigt ist. An ihn wird eine Gleich-

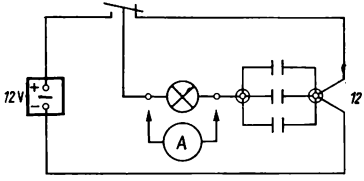


Abb. 4.2.6./1 Untersuchung eines Kondensators im Gleichstromkreis

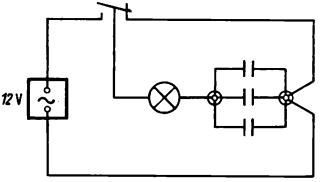


Abb. 4.2.6./2 Untersuchung eines Kondensators im Wechselstromkreis

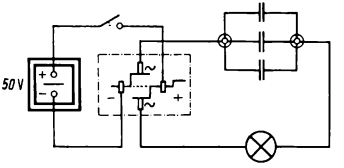


Abb. 4.2.6./3
Zunahme der Wechselstromstärke durch einen Kondensator bei wachsender Frequenz

spannung von 50 V gelegt. Der Stromwender erzeugt beim Rotieren Wechselspannungen, die über die Glühlampe dem Kondensator zugeführt werden. Die Frequenz des Wechselstromes wird so lange gesteigert, bis das Flackern der Glühlampe aufhört. Die Spannung muß während des Versuchs mit zunehmender Drehzahl herabgesetzt werden, damit der Faden der Glühlampe nicht durchbrennt.

Bemerkung

Die Kondensatoren müssen nach jeder Benutzung entladen werden.

4.2.7. Abhängigkeit des kapazitiven Widerstandes von der Kapazität und von der Frequenz

Zu Variante a, Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (50 V ~)
2. 2 Kondensatoren (2 μF)
3. Kondensator (1 μF)
4. Kondensatorsteckbrett
5. Spannungsmesser (250 V ~)
6. Strommesser (0,5 A ~)
7. Schalter

Zu Variante a, Versuch 2

Geräte 5. bis 7., außerdem

8. Stromversorgungsgerät (50 V —)
9. Polwender mit Handantriebsvorrichtung oder Experimentiermotor
10. Kondensator (10 μF)

Zu Variante b

11. Stromversorgungsgerät (6 V bis 10 V)
12. Stromversorgungsgerät (6 V)
13. Glühlampe (4 V; 0,05 A)
14. Elektrolytkondensatoren (5000 μF; 2000 μF; 200 μF; 50 μF)
15. Schwingschaltung nach Abbildung 4.2.4./5 oder Generator UVG 1

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind analog zu den Versuchen in V 4.2.4.
2. Zum Einsatz der Varianten siehe MH 4.2.4., Nr.3.

Variante a

Versuch 1: Abhängigkeit der Stromstärke von der Kapazität

Die Versuchsanordnung ergibt sich aus Abbildung 4.2.7./1. In dem Wechselstromkreis werden bei gleichbleibender effektiver Spannung von 50 V aus den Konden-

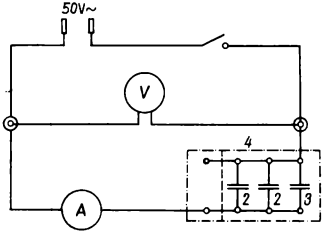


Abb. 4.2.7./1
Nachprüfen des kapazitiven Widerstandes von Kondensatoren

satoren von 1 μF und 2 μF durch Parallelschaltung Kondensatorgruppen von 1 μF bis 5 μF gebildet. Es wird für jede Kondensatorzusammenstellung die effektive Stromstärke gemessen. Der kapazitive Widerstand X_C ist angenähert gleich dem Scheinwiderstand Z, der durch den Quotienten $\frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ wiedergegeben wird.

Beispiele für die Berechnung von kapazitiven Widerständen

Kapazität C in μF	Spannung U_{eff} in V	Stromstärke I_{eff} in A	Kapazitiver Widerstand $X_C = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ in Ω	$X_c \cdot C$ in Ω · μF
1	50,0	0,014	3600	3600
2	50,0	0,032	1600	3200
3	50,0	0,045	1100	3300
4	50,0	0,059	850	3400
5	50,0	0,075	670	3300

Man erkennt, daß mit wachsender Kapazität die Stromstärke zunimmt, während der kapazitive Widerstand kleiner wird. Aus dem Umstand, daß das Produkt aus X_C und C angenähert konstant ist, folgt, daß der kapazitive Widerstand der Kapazität umgekehrt proportional ist:

$$X_C \sim \frac{1}{C}.$$

Daß manche Produkte $X_C \cdot C$ vom Mittelwert verhältnismäßig stark abweichen, ergibt sich aus der Toleranz der Kapazität von technischen Kondensatoren.

Versuch 2: Abhängigkeit der Stromstärke von der Frequenz

An eine Gleichspannungsquelle für 50 V wird nach Abbildung 4.2.7./2 ein am Tisch befestigter rotierender Polwender angeschlossen. Mit ihm werden ein Strommesser und ein Kondensator von 10 μF in Reihe geschaltet. Setzt man den Polwender in Umdrehung, so liefert er eine Wechselspannung, die von einem parallelgeschalteten Spannungsmesser angezeigt wird. Die Frequenz ist von der Drehzahl

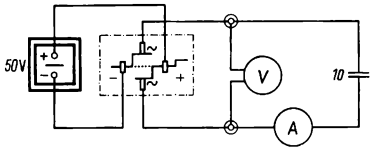


Abb. 4.2.7./2
Abnahme des kapazitiven Widerstandes beim Erhöhen der Frequenz

des Polwenders abhängig. Der Strommesser zeigt mit steigender Frequenz eine zunehmende Stromstärke an; der kapazitive Widerstand wird kleiner.
Wie hier ohne Beweis mitgeteilt sei, erfolgt die Berechnung des kapazitiven Widerstandes X_C nach der Gleichung $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ und die Berechnung des Scheinwiderstandes Z nach der Gleichung

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Hierin ist R der Ohmsche Widerstand, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz mit der Frequenz f und C die Kapazität.

Bemerkungen

1. Die Wechselspannung mit veränderlicher Frequenz kann auch einem Innenpolgenerator aus Aufbauteilen entnommen werden (s. V 3.1.3.). Dieser ist durch einen Experimentiermotor anzutreiben. Mißt man die Frequenz durch stroboskopische Drehzahlmessung und berechnet die kapazitiven Widerstände aus Spannung und Stromstärke, so läßt sich nachweisen, daß $X_C \sim \frac{1}{f}$ ist.
2. Wenn man pulsierenden Gleichstrom aus einer Zweigweggleichrichtung durch die Primärwicklung eines Tranformators leitet, erhält man an der Sekundärseite eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 100 Hz. Mit dieser Wechselspannung ist nachzuweisen, daß der Widerstand eines Kondensators nur halb so groß ist wie beim Verwenden einer Wechselspannung mit einer Frequenz von 50 Hz.

Variante b

Versuch 1

Die unterschiedliche Helligkeit der Glühlampe wird als Anzeige für den physikalischen Vorgang benutzt.
Gleichspannung: Kurzes Aufleuchten — Ladevorgang;
Wechselspannung: Schwaches Leuchten der Glühlampe.
Es werden Kondensatoren von 50 μF bis 5000 μF eingeschaltet. Kondensatoren haben für Gleichstrom einen unendlich großen Widerstand. Für Wechselstrom sind Kondensatoren leitend. Sie haben einen Wechselstromwiderstand R_C. Er ist umso größer, je kleiner die Kapazität C ist.

$$R_C \sim \frac{1}{C}$$

Versuch 2

An die Anordnung nach Abbildung 4.2.7./3 wird die Wechselspannung des Schwingungsgenerators (Abb. 4.2.4./5) gelegt.

Durch Veränderung der Frequenz wird die Abhängigkeit des kapazitiven Widerstandes nachgewiesen.

$$R_C \sim \frac{1}{f}$$

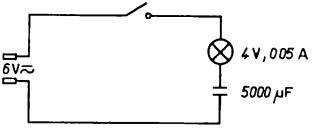


Abb. 4.2.7./3 Schaltplan

Für den Wechselstromwiderstand eines Kondensators gilt:

$$R_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C}.$$

Bemerkung

Bei den verwendeten niedrigen Spannungen ist es unproblematisch, Elektrolytkondensatoren an eine Wechselspannungsquelle anzuschließen.

4.2.8. Bestimmen des kapazitiven Widerstandes und der Kapazität

1. Stromversorgungsgerät (50 V ~)
2. Spannungsmesser (50 V ~)
3. Strommesser (0,5 A ~)
4. 2 Kondensatoren (2 µF)
5. Kondensator (1 µF)
6. Kondensatorsteckbrett
7. Schalter

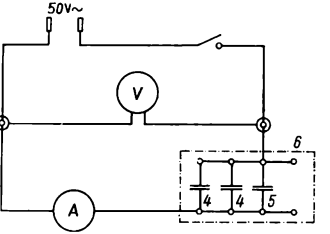


Abb. 4.2.8./1 Ermitteln der Kapazität und des kapazitiven Widerstandes

Methodischer Hinweis

Der Versuch führt V 4.2.7. quantitativ fort. Weil der Ohmsche Widerstand am Kondensator unwesentlich ist, bietet die Auswertung nicht die Schwierigkeiten wie V 4.2.5.

Versuch

Der Versuchsaufbau ergibt sich aus Abbildung 4.2.8./1. Nacheinander werden die Kondensatorgruppen von 1 µF bis 5 µF aus den Kondensatoren von 1 µF und von 2 µF durch Parallelschaltung zusammengestellt. Daran wird die gleichbleibende effektive Wechselspannung von 50 V gelegt. Jedesmal wird die effektive Stromstärke gemessen. Der kapazitive Widerstand X_C ist näherungsweise dem Scheinwiderstand Z gleichzusetzen, der durch den Quotienten $\frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ bestimmt wird. Dies führt zur Berechnung von C. Es ergibt sich $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ und daraus

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi f \cdot X_C}.$$

Für die Netzfrequenz ist $C = \frac{1}{314 \cdot X_C}$.

4.2.9. Das Zusammenschalten verschiedener Wechselstromwiderstände

Zu Versuch 1 und 2

1. Stromversorgungsgerät (4 V ≃, 50 V ~)
2. Gleitwiderstand (300 Ω)
3. Spannungsmesser (5 V ≃)
4. Strommesser (1 A ≃, 0,1 A ~)
5. Spule (500 Wdg.)
6. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
7. Schalter

Zu Versuch 3 und 4

Geräte 1., 4. und 7., außerdem

8. Spannungsmesser (50 V ~)
9. 2 Kondensatoren (1 μF)
10. 4 Kondensatoren (2 μF)
11. Kondensatorsteckbrett

Zu Versuch 5

Geräte 1., 4., 6. bis 8., 10. und 11., außerdem

12. Meßwiderstand (1 000 Ω)
13. U-Kern, geblättert
14. I-Kern, geblättert
15. Grundbrett mit Spannvorrichtung

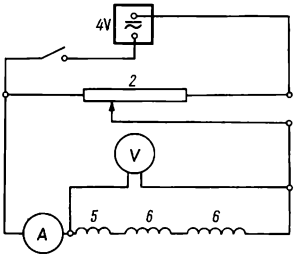


Abb. 4.2.9./1 Drei in Reihe geschaltete induktive Widerstände

Methodische Hinweise

1. Die Versuche schließen sich an V 4.2.5. und V 4.2.8. an.
2. Sie sind für Arbeitsgemeinschaften geeignet, um die deduktiv entwickelten Gleichungen für die Berechnung der Gesamtwiderstände bei zusammengeschalteten Wechselstromwiderständen zu bestätigen.

Versuch 1: Reihenschaltung induktiver Widerstände

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 4.2.9./1 mit 3 Spulen in Reihenschaltung. Es wird zunächst Gleichspannung angelegt, Spannung und Stromstärke werden gemessen und der Ohmsche Widerstand wird errechnet:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Dann werden mit Wechselspannung die Effektivwerte gemessen und der Scheinwiderstand wird berechnet:

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}.$$

Aus beiden Ergebnissen wird der induktive Widerstand X_L berechnet:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Die Widerstände, die in V 4.2.5. bestimmt wurden, werden addiert.

$R = R_1 + R_2 + R_3$ $\qquad$ $X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$

$R = 2{,}1\ \Omega + 3{,}5\ \Omega + 14\ \Omega$ $\qquad$ $X_L = 1{,}24\ \Omega + 4{,}32\ \Omega + 20{,}42\ \Omega$

$R = 19{,}6\ \Omega$ $\qquad$ $X_L = 25{,}98\ \Omega$

Diese Berechnungen ergeben mit hinreichender Übereinstimmung die gleichen Beträge der Widerstände, wie sie sich aus den Messungen bei der Reihenschaltung ergeben.

Versuch 2: Parallelschaltung induktiver Widerstände

Nach Abbildung 4.2.9./2 werden zwei Spulen parallel geschaltet. Messungen und Berechnungen der Gesamtwiderstände (R, Z und X_L) erfolgen wie in Versuch 1. Aus den Ergebnissen von V 4.2.5. werden die Widerstände nach den Gleichungen für die Parallelschaltung berechnet:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \qquad \frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}}$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \qquad X_L = \frac{X_{L1} \cdot X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}}$$

Es ergibt sich wieder eine hinreichende Übereinstimmung. Die Scheinwiderstände können nicht nach diesen Gleichungen berechnet werden, da sie unter verschiedenen Phasenwinkeln liegen (Abb. 4.2.9./3).

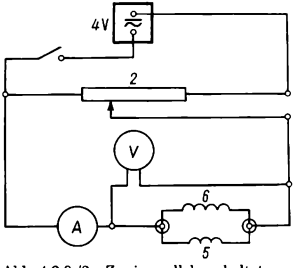


Abb. 4.2.9./2 Zwei parallelgeschaltete induktive Widerstände

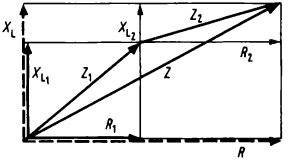


Abb. 4.2.9./3 Addition der Widerstände zweier Spulen im Zeigerdiagramm

Versuch 3: Reihenschaltung von kapazitiven Widerständen — Experimentelle Bestätigung der Gleichung

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots \frac{1}{C_n}$$

Wie Abbildung 4.2.9./4 zeigt, werden
1. die Kondensatoren mit der Kapazität 1 µF und 2 µF (Abb. 4.2.9./4a),
2. die Kondensatoren mit der Kapazität 2 µF und 3 µF (Abb. 4.2.9./4b),
3. die Kondensatoren mit der Kapazität 1 µF und 2 µF und 3 µF (Abb. 4.2.9./4c)

in einem Wechselstromkreis (50 V) mit einem Strommesser in Reihe geschaltet. Der Kondensator von 3 µF wird aus einem Kondensator von 1 µF und einem Kondensator von 2 µF durch Parallelschalten gebildet. Die effektive Stromstärke wird jedesmal am Strommesser abgelesen. Der kapazitive Widerstand X_C ist angenähert gleich dem Scheinwiderstand $Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$. Die Kapazität ist aus $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$

zu berechnen. Sie ist

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}.$$

Die so durch Messen und Rechnen gefundenen Werte der Kapazitäten stimmen annähernd mit den Werten überein, die sich aus $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ durch Einsetzen der Nennwerte C_1, C_2, C_3 ergeben. Das Zusammenfassen der Werte in einer Tabelle erhöht die Übersichtlichkeit.
Die aus kapazitiven Widerständen gefundenen Werte der Kapazität sind in den Meßbeispielen etwas größer als die aus den Nennwerten errechneten.

Beispiel für einen Kapazitätsvergleich

Spannung $U_{eff} = 50$ V; Frequenz $f = 50$ Hz

Lfd. Nr.	Kapazitäten (Nennwerte) C in µF	Stromstärke I_{eff} in A	Kapazitiver Widerstand $X_C \approx Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ in Ω	Kapazität $C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$ in µF	Kapazität errechnet aus $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$ in µF
1	1 + 2	0,011	4600	0,7	0,67
2	2 + 3	0,019	2600	1,2	1,20
3	1 + 2 + 3	0,009	5600	0,5	0,55

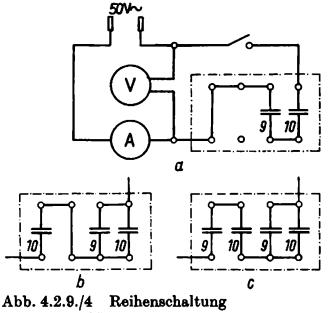


Abb. 4.2.9./4 Reihenschaltung kapazitiver Widerstände

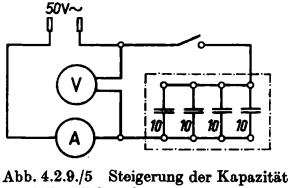


Abb. 4.2.9./5 Steigerung der Kapazität durch Parallelschalten von Kondensatoren

Versuch 4: Parallelschaltung kapazitiver Widerstände — Experimentelle Bestätigung der Gleichung $C = C_1 + C_2 + \ldots C_n$

Nacheinander werden 2, 3 und 4 Kondensatoren von je 2 µF parallel in den Wechselstromkreis (50 V) geschaltet (Abb. 4.2.9./5). Jedesmal wird die Stromstärke I_{eff} an einem Strommesser abgelesen und der Widerstand $X_C \approx Z = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$

errechnet. Aus $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ wird der Betrag der Kapazität ermittelt. Sie ist $C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$. Die so gefundenen Werte werden mit dem Ergebnis verglichen, das die Gleichung $C = C_1 + C_2 + C_3$ durch Einsetzen der Nennwerte für C_1, C_2, C_3 ergibt. Sie sind bei den Meßbeispielen etwas größer als die durch Rechnung gefundenen Werte, sind von ihnen aber nur wenig verschieden.

Beispiel für einen Kapazitätsvergleich

$U_{eff} = 50$ V; $f = 50$ Hz

Lfd. Nr.	Kapazitäten (Nennwerte) C in µF	Stromstärke I_{eff} in A	Kapazitiver Widerstand $X_C \approx \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$ in Ω	Kapazität $C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$ in µF (berechnet)	Kapazität $C = C_1 + C_2 + C_3$ in µF (berechnet)
1	2 + 2	0,064	781	4,07	4
2	2 + 2 + 2	0,095	526	6,05	6
3	2 + 2 + 2 + 2	0,127	394	8,10	8

Versuch 5: Reihenschaltung eines Ohmschen Widerstandes, eines induktiven Widerstandes und eines kapazitiven Widerstandes im Wechselstromkreis — Experimentelle Bestätigung der Gleichung $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$

Dieser komplizierte Zusammenhang wird hier durch einen bestimmten Fall veranschaulicht. Dementsprechend sind die Meßergebnisse keineswegs verbindlich. Sie liegen von Fall zuFall je nach den verwendeten Geräten anders. Sie dienen hier nur zur Erläuterung des Verfahrens.

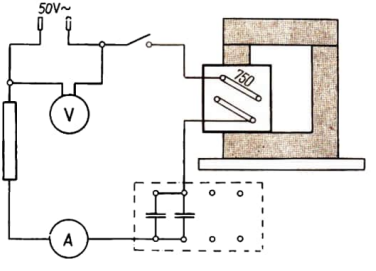


Abb. 4.2.9./6 Zusammenschalten eines Ohmschen Widerstandes, einer eisengefüllten Spule und zweier parallelgeschalteter Kondensatoren

Ein Ohmscher Widerstand ($R = 1000$ Ω), eine Spule (750 Wdg.) mit geschlossenem Eisenkern und zwei parallelgeschaltete Kondensatoren zu je 2 µF werden nach Abbildung 4.2.9./6 in Reihe an die Wechselspannung (50 V) gelegt. Die Strom-

stärke I_{eff} wird an einem Strommesser mit 0,043 A abgelesen. Der Scheinwiderstand Z wird als Quotient $\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$ mit etwa 1160 Ω ermittelt. Nach dem Entfernen des Ohmschen und des kapazitiven Widerstandes wird der Strom erneut eingeschaltet. Die Stromstärke I_{eff} wird mit 0,252 A gemessen und der induktive Widerstand $X_L = \omega \cdot L$ aus dem Quotienten $\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$ zu 190 Ω errechnet. Der kapazitive Widerstand X_C wird aus dem Versuch 4 mit 785 Ω entnommen. Danach ergibt sich der Gesamtwiderstand aus der Gleichung

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{1000^2 + (190 - 785)^2}\ \Omega = \sqrt{1000^2 + 595^2}\ \Omega \approx 1160\ \Omega.$$

Er stimmt mit dem oben angegebenen, aus dem Quotienten $\frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$ ermittelten Widerstand nahezu überein. Im Hinblick auf den Betrag des Ohmschen Widerstandes (1000 Ω) kann der Ohmsche Widerstand der Spule, der etwa 3,5 Ω beträgt, unberücksichtigt bleiben.

4.2.10. Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen

1. Stromversorgungsgerät (8 V bis 9 V ~)
2. Schalter
3. 2 Kondensatoren (4,7 µF)
4. Spule (3800 Wdg.)
5. U- und I-Kern, geblättert
6. Glühlampe (4 V; 0,05 A)

Methodischer Hinweis

Das Experiment ist als Schülerexperiment im fakultativen Physikunterricht oder in Arbeitsgemeinschaften nach Rahmenprogramm vorgesehen.

Versuch 1

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 4.2.10./1. Die Spule wird dabei auf den U-Kern gesteckt.

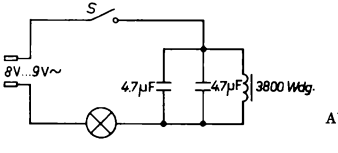


Abb. 4.2.10./1 Schaltplan

Durch Verändern der Induktivität (Verschieben des U-Kernes) wird der Widerstand der *LC*-Kombination geändert.

1. U-Kern vollständig in der Spule: Lampe leuchtet normal,
2. U-Kern $^1/_4$ aus der Spule gezogen: Lampe glimmt,
3. U-Kern völlig entfernt: Lampe leuchtet normal.

Der Wechselstromwiderstand einer Parallelschaltung von Spule und Kondensator (LC-Kombination) ist für einen bestimmten Wert der Induktivität am größten. Der Strom fließt ständig zwischen Kondensator und Spule hin und her. Die Parallelschaltung von Spule und Kondensator stellt einen Schwingkreis dar.

Versuch 2

Durch Anlegen einer Wechselspannung veränderlicher Frequenz (UVG 1 oder Schaltung nach Abb. 4.2.4./5) wird die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes einer LC-Kombination ermittelt. Bei einer bestimmten Frequenz der Wechselspannung erlischt die Glühlampe fast vollständig. Der Wechselstromwiderstand ist von der Frequenz abhängig. Bei einer durch die Induktivität L und die Kapazität C bestimmten Frequenz f ist er am größten. Es entsteht ein Kreisstrom zwischen Spule und Kondensator. Der Schwingkreis ist in Resonanz. Für diesen Fall gilt:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C},$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{L \cdot C}.$$

Ein Strom dieser Frequenz wird maximal unterdrückt (Filterwirkung der LC-Kombination).

4.3. Phasenverschiebungen im Wechselstromkreis

4.3.1. Nachweis der Phasenverschiebung an Wechselstromwiderständen mit Meßgeräten

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Spannungsmesser (10 V; 1 V; Nullpunktmittellage)
3. Strommesser (50 mA; 2 A; 5 mA; Nullpunktmittellage)
4. 2 Gleitwiderstände (110 Ω oder 300 Ω) zum Erzeugen von Wechselströmen kleiner Frequenz nach V 2.3.1.
5. Gleitwiderstand (1300 Ω)
6. 2 Spulen (1500 Wdg.)
7. U-Kern, geblättert
8. I-Kern, geblättert
9. Grundbrett mit Spannvorrichtung
10. Kondensator (4 μF)

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3., 5. bis 10., außerdem
11. Stromversorgungsgerät (4 V —) oder Monozelle
12. Gerät zum Erzeugen von Wechselströmen kleiner Frequenz nach V 5.1.1.
13. Drehwiderstand (100 Ω)
14. Elektrolytkondensator (1000 μF; 25 V)

Methodischer Hinweis

Zur Einführung der Phasenverschiebung muß man auf jeden Fall diese Versuche mit kleiner Frequenz vorführen, denn nur bei der kleinen Geschwindigkeit der ablaufenden Vorgänge kann den Schülern anschaulich klargemacht werden, wie Kapazität und Induktivität den Stromverlauf beeinflussen.
Ergänzt werden diese Versuche durch V 4.3.2. bis 4.3.4., in denen die Kurven von Spannung und Stromstärke sichtbar gemacht werden.

Versuchsanordnung

Es wird nach V 2.2.1. oder nach V 4.1.1. eine Schaltung zum Erzeugen einer Wechselspannung geringer Frequenz zusammengestellt. Einen Vorschlag für die Versuchsanordnung gibt Abbildung 4.3.1./2 wieder. Sie bezieht sich zwar auf die Variante b, läßt sich aber sinngemäß auch auf Variante a übertragen. Die übereinander angeordneten Meßgeräte ermöglichen sehr viel besser eine Beurteilung der Phasenlage von Stromstärke und Spannung als nebeneinander stehende. Beide Geräte werden auf Nullpunktmittellage eingestellt.
Die Versuchsanordnung wird bei Variante a nach Abbildung 4.3.1./1a vorgenommen. Die Meßgeräte sind so zu schalten, daß ihre Ausschläge in der gleichen Richtung erfolgen.

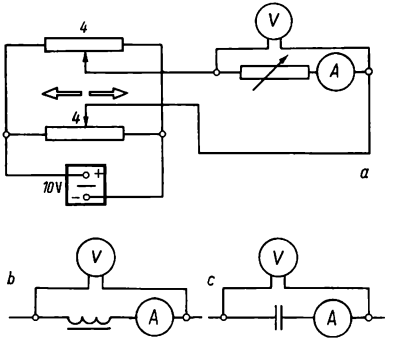


Abb. 4.3.1./1
Nachweis der Phasenverschiebung

Variante a

Als Versuchswiderstände werden nacheinander eingesetzt
1. ein Ohmscher Widerstand (Gleitwiderstand 1300 Ω, Meßbereich des Strommessers 5 mA),

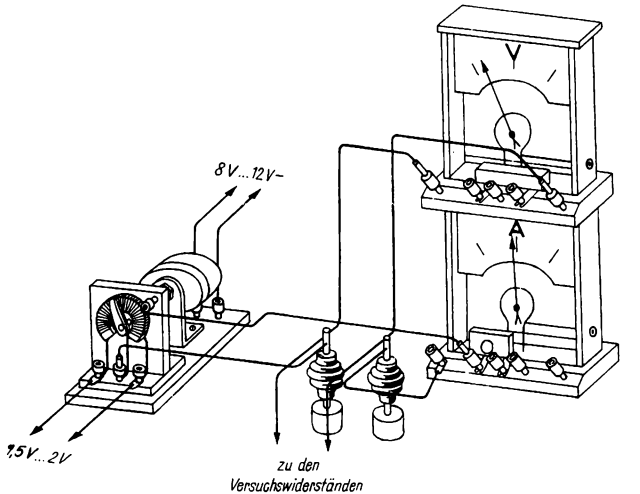


Abb. 4.3.1./2 Versuchsanordnung
zum Nachweis der Phasenverschiebung bei Wechselströmen geringer Frequenz

2. ein induktiver Widerstand (2 × 1500 Windungen auf geschlossenem Eisenkern in Reihe, Meßbereich des Strommessers 50 mA),
3. ein kapazitiver Widerstand (Kondensator 4 µF, Meßbereich des Strommessers 2 mA).

Erzeugt man eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 0,5 Hz ... 1 Hz, so erkennt man beim Ohmschen Widerstand den Gleichlauf der Zeiger an beiden Meßinstrumenten. Beim kapazitiven Widerstand läuft der Zeiger des Strommessers dem des Spannungsmessers voraus, die Stromstärke eilt somit der Spannung voraus. Beim induktiven Widerstand bleibt er hinter dem Zeiger des Spannungsmessers zurück, d. h., die Stromstärke bleibt hinter der Spannung zurück.

Variante b

Bei Variante b wird die Versuchsanordnung nach Abbildung 4.3.1./3 vorgenommen (vgl. auch Abb. 4.3.1./2). Der Strommesser wird mit einem Drehwiderstand (100 Ω) als Nebenwiderstand versehen. Dadurch kann der Ausschlag dem des Spannungsmessers angeglichen werden, damit die Phasenbeziehungen deutlich wahrgenommen werden können.
Durch Variieren der Gleichspannung am Motor kann man eine Frequenz zwischen 0,3 Hz und 0,5 Hz einstellen.

Wie bei Variante a wird mit den gleichen Versuchswiderständen eine Ohmsche, eine induktive und eine kapazitive Belastung vorgenommen. Die Versuche führen zu den gleichen Ergebnissen wie bei a. Die kleine Wechselspannung von 0,5 V bis 1 V schadet den Elektrolytkondensatoren nicht. Es wird zur Schonung der Meßgeräte geraten, die Gleichspannung am Drehwiderstand nur bei laufendem Motor ein- und auszuschalten. Dies ist besonders bei induktiver Belastung zu beachten.

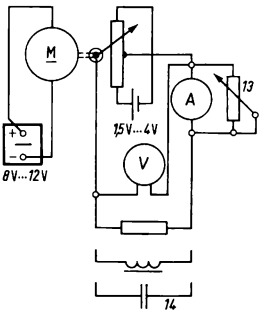


Abb. 4.3.1./3
Durchführung des Nachweises der Phasenverschiebung nach Abb. 4.3.1./2

Netzspannung

4.3.2. Nachweis der Phasenverschiebung an großen Widerständen im Wechselstromkreis

1. Netzspannung (220 V ~)
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Grundbrett mit Spannvorrichtung
5. 2 Spulen (15000 Wdg.)
6. Kondensator (3000 pF)
7. Widerstand (500 kΩ)
8. Dreifach-Glimmlichtoszillograf nach V 4.1.3.
9. Drehspiegel
10. Netzadapter

Methodische Hinweise

1. Obwohl die Beobachtungsmöglichkeiten an einem Katodenstrahloszillografen besser sind, ist dieser Versuch wertvoll, weil seine Schaltung und das Entstehen der Bilder von den Schülern leicht zu überschauen sind.
2. Vergleiche MH V 4.3.1.!

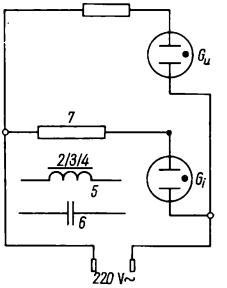


Abb. 4.3.2./1 Nachweis der Phasenverschiebung an hochohmigen Widerständen

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.3.2./1. Der Schichtwiderstand von 500 kΩ bzw. der Kondensator von 3000 pF werden in Reihe mit einer Glimmlampe des Dreifach-Glimmlichtoszillografen zwischen zwei Holtzsche Klemmen gelegt. Als induktiver Widerstand werden zwei Spulen von 15000 Wdg. auf geschlossenem Eisenkern in Reihe geschaltet. Die Glimmlampe G_u wird zur Anzeige des Spannungsverlaufs mit Schutzwiderstand angeschlossen. Die Glimmlampe G_l, die

den Stromstärkeverlauf anzeigt, wird ohne Schutzwiderstand verwendet. Die Versuchswiderstände sind so groß bemessen, daß die Glimmlampe durch Überstromstärke nicht gefährdet ist. Man legt an die Anordnung die Netzspannung von 220 V ~ und zeigt, daß durch den Ohmschen Widerstand keine Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke eintritt. Schaltet man den induktiven oder den kapazitiven Widerstand in die Versuchsanordnung, so sind im Drehspiegel deutlich die Phasenverschiebungen zwischen der Spannungs- und der Stromstärkenkurve zu erkennen. Beim induktiven Widerstand bleibt die Stromstärke hinter der Spannung zurück, beim kapazitiven Widerstand eilt sie der Spannung voraus.

Netzspannung

4.3.3. Nachweis der Phasenverschiebung an kleinen Widerständen im Wechselstromkreis

1. Netzspannung (220 V ~)
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Grundbrett mit Spannvorrichtung
5. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
6. Kondensator (4 µF)
7. 2 Gleitwiderstände (500 Ω)
8. Dreifach-Glimmlichtoszillograf
9. Drehspiegel
10. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.3.2.!

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 4.3.3./1. Die Glimmlampe G_i ist mit Schutzwiderstand geschaltet. Sie dient zur Anzeige der Phasenlage des Stromes. Der Strom fließt zum größten Teil durch den zu ihr parallelgeschalteten Widerstand von 300 Ω bis 500 Ω. Die Glimmlampe G_u liegt mit ihrem Schutzwiderstand parallel zum Versuchswiderstand und zeigt die Phasenlage der Spannung an diesem an. Als Versuchswiderstand werden nacheinander verwendet:

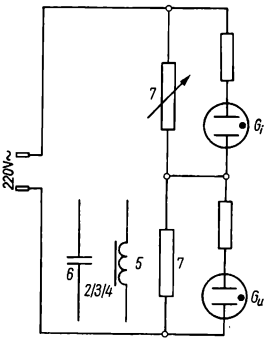


Abb. 4.3.3./1 Nachweis der Phasenverschiebung an niederohmigen Widerständen

a) ein Ohmscher Widerstand (Gleitwiderstand von 500 Ω),
b) ein induktiver Widerstand (2 Spulen mit je 1 500 Wdg. auf geschlossenem Eisenkern in Reihe),
c) ein kapazitiver Widerstand (Kondensator von 4 µF).

Durch Verstellen des parallel zur Glimmlampe G_i geschalteten Gleitwiderstandes sorgt man dafür, daß beide Glimmlampen gleich hell leuchten.
Die Spannungs- und Stromstärkenkurven sind im Drehspiegel zu beobachten.

Bemerkungen

1. Anstelle des Dreifach-Glimmlichtoszillografen kann man auch zwei Signalglimmlampen mit eingebautem Schutzwiderstand verwenden. Sie werden in zwei Fassungen E 14 senkrecht übereinander angeordnet.
2. Schaltet man zu dem Kondensator von 4 µF eine Spule mit 1500 Wdg. auf geschlossenem Eisenkern parallel, so wird die Phasenverschiebung nahezu aufgehoben. Durch Verschieben des I-Kerns kann man die Induktivität der Spule so einstellen, daß die Phasenverschiebung ganz aufgehoben wird. Es muß die Bedingung $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$ erfüllt sein. Für die Netzfrequenz 50 Hz ergibt sich daraus: $C \cdot L \approx 10000\,\mu F \cdot mH$.

4.3.4. Nachweis der Phasenverschiebung an Wechselstromwiderständen mit dem Katodenstrahloszillografen

1. Stromversorgungsgerät (50 V ~)
2. Widerstand (1 kΩ)
3. 2 Spulen (750/1 500 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. Kondensator (4 µF)
7. Drehwiderstand (100 Ω)
8. Katodenstrahloszillograf
9. elektronischer Umschalter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.3.2.!

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 4.3.4./1. Dabei ist zu beachten, daß man den gemeinsamen Masseanschluß der Eingänge nicht zwischen die beiden Widerstände legen kann, weil dies zu einer Verschiebung der Kurven gegeneinander um 180° führt. Der Drehwiderstand (100 Ω) am Eingang 2 muß möglichst klein gehalten werden, damit er die Phasenverschiebung nicht wesentlich beeinflußt. Über ihm wird der Stromstärkeverlauf abgegriffen. Der Spannungs-

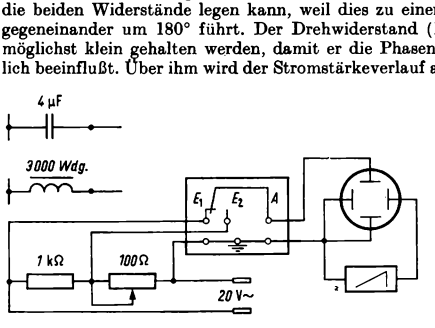


Abb. 4.3.4./1 Nachweis von Phasenverschiebung mit dem Kathodenstrahloszillografen

verlauf wird über ihm und dem Versuchswiderstand abgegriffen und liegt am Eingang 1. Die Amplituden der beiden Kurven stellt man am Umschalter so ein, daß sie sich nur wenig, aber noch deutlich voneinander unterscheiden. Dazu wird der Eingang 1 geschlossen und der Eingang 2 voll geöffnet. Dann werden der *Y*-Eingang des Oszillografen und der Drehwiderstand (100 Ω) so eingestellt, daß bei möglichst kleinem Widerstand eine hinreichend große Amplitude der Stromstärkenkurve entsteht. Der Eingang 1 wird nun so weit geöffnet, daß die Amplitude der Spannungskurve etwas größer wird.
Es ist nicht zu empfehlen, die Kurven in ihren Höhen gegeneinander zu verschieben.

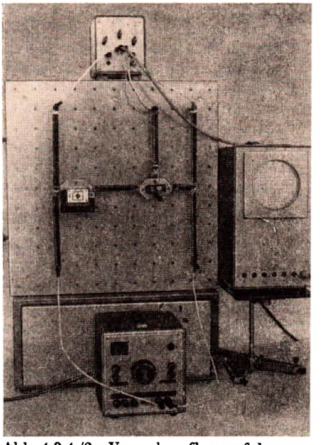


Abb. 4.3.4./2 Versuchsaufbau auf dem Tafelschaltgerät mit Adapter nach 4.0.5.

Bemerkungen

1. Die Aufhebung einer induktiven Phasenverschiebung durch Kondensatoren kann man demonstrieren, indem man parallel zum induktiven Widerstand stufenweise Kondensatoren von 1 μF ... 4 μF schaltet.
2. Anstelle des elektronischen Umschalters kann man die Umschaltkontakte eines Relais in die Schaltung nach Abb. 4.3.4./1 legen. Das Relais kann man einfach mit der Hand mit gleichmäßiger Frequenz tasten oder es durch einen Multivibrator schalten lassen.

4.3.5. Nachweis der Phasenlage der Spannungen und der Stromstärken in Resonanzkreisen

1. Gerät zum Erzeugen von Wechselströmen kleiner Frequenz nach V 4.1.1.
2. Stromversorgungsgerät (12 V—) und Monozelle (1,5 V) oder Stromversorgungsgerät (2 V—)
3. 4 Spulen (1500 Wdg.)
4. 2 U-Kerne, geblättert
5. Elektrolytkondensator (1000 μF; 25 V)
6. 2 Drehspulmeßgeräte
7. Vorwiderstand für 1 V —
8. Nebenwiderstand für 5 mA —
9. Drehwiderstand (1 kΩ)
10. Drehwiderstand (100 Ω)

Methodische Hinweise

1. Um Resonanz bei kleinen Frequenzen zu erreichen, sind große Induktivitäten und Kapazitäten erforderlich. In den Spulen treten also auch große Ohmsche

Widerstände auf, und die Kapazitäten sind nur durch Elektrolyt-Kondensatoren darzustellen, die während einer Halbperiode einen Strom fließen lassen. Dadurch entsprechen die Beträge der Stromstärken und Spannungen nicht den Resonanzbedingungen idealer Schwingkreise.
Trotzdem ist es methodisch sinnvoll, diese Versuche durchzuführen, um gerade mit kleiner Frequenz das Hin- und Herfließen der Energie in einem Schwingkreis deutlich werden zu lassen.

2. V 4.3.6. ermöglicht es, besser die annähernde Gleichheit der Stromstärken in den beiden Schwingkreiszweigen im Resonanzfall zu zeigen (siehe dazu Physikalische Schulversuche, 10. Teil).

Versuch 1: Phasenlage der Spannungen bei Reihenresonanz

An die Klemmen des Gerätes zum Erzeugen von Wechselströmen niedriger Frequenz werden ein induktiver und ein kapazitiver Widerstand in Reihe angeschlossen. Der induktive Widerstand besteht aus vier Spulen zu je 1500 Wdg., die auf zwei gegeneinander gekehrten U-Kernen in Reihe geschaltet sind; als kapazitiver Widerstand wird ein Elektrolytkondensator mit einer Kapazität von 1000 μF eingesetzt (Abb. 4.3.5./1). Parallel zu den Widerständen wird je ein Drehspulgerät mit Nullpunktmittellage als Spannungsmesser geschaltet. Das eine wird mit einem Vorwiderstand für 1 V versehen, das andere mit dem Drehwiderstand von 1 kΩ als Vorwiderstand. Nach dem Einschalten des Stromes und dem Angleichen der Zeigerausschläge beobachtet man ein gegenphasiges Schwingen der Zeiger der beiden Meßgeräte.

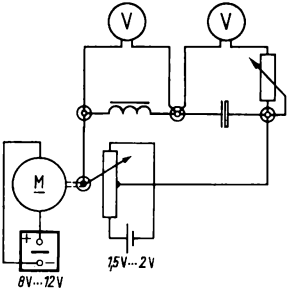


Abb. 4.3.5./1
Nachweis der Phasenlage der Spannungen bei Reihenresonanz

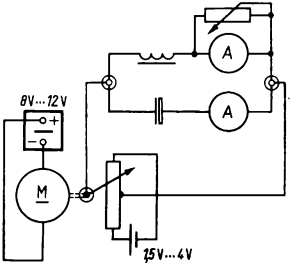


Abb. 4.3.5./2
Nachweis der Phasenlage der Teilstromstärken bei Parallelresonanz

Versuch 2: Phasenlage der Teilstromstärken bei Parallelresonanz

Die Schaltung des Versuches erfolgt nach Abbildung 4.3.5./2. Als induktiven Widerstand verwendet man 4 in Reihe geschaltete Spulen von je 1500 Wdg. auf 2 gegeneinander gekehrten U-Kernen. Der kapazitive Widerstand ist ein Elektrolytkondensator mit einer Kapazität von 1000 μF. Die beiden Meßgeräte sind Drehspulgeräte mit Nullpunktmittellage. Das eine wird mit dem Nebenwiderstand für 5 mA versehen, das andere mit dem Drehwiderstand von 100 Ω als Nebenwider-

stand. Nach dem Einschalten des Stromes und dem Angleichen der Zeigerausschläge beobachtet man ein gegenphasiges Schwingen der Zeiger der beiden Strommesser.

Bemerkung

Es empfiehlt sich, die beiden Meßgeräte übereinander anzuordnen, damit man die Phasenlage der Spannungen und der Stromstärken besser erkennen kann.

4.3.6. Untersuchung eines Parallelschwingkreises mit dem Katodenstrahloszillografen

1. Stromversorgungsgerät (40 V ~)
2. 2 Kondensatoren (4 µF)
3. Spule (750/1500 Wdg.)
4. U-Kern, geblättert
5. I-Kern, geblättert
6. 2 Widerstände (50 Ω; 1 W)
7. Katodenstrahloszillograf
8. elektronischer Umschalter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 4.3.5.!

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 4.3.6./1. Die Spule mit 1500 Wdg. wird auf einen geschlossenen Eisenkern gesetzt, und die beiden Kondensatoren werden parallelgeschaltet. Über den beiden Widerständen (50 Ω) werden Spannungen abgegriffen, die phasengleich mit den Stromstärken in den beiden Schwingkreiszweigen und diesen proportional sind, so daß die Kurven auf dem Bildschirm alsStromstärkenkurven betrachtet werden können. Beide Eingänge werden voll geöffnet, und die Kurvenhöhe wird durch die Spannungsquelle und den Y-Eingang des Oszillografen eingestellt.
Durch Verschieben des Eisenkerns ändern sich die Induktivität und damit die Amplituden der beiden Stromstärken und ihre Phasenverschiebung. Im Resonanzfall sind beide Amplituden gleich und um 180° gegeneinander verschoben.

Bemerkung

Vergleiche Bemerkungen zu V 4.3.4.!

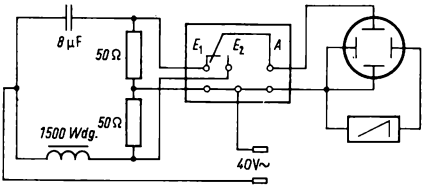


Abb. 4.3.6./1
Schaltung zur Untersuchung eines Parallelschwingkreises

4.4. Effektivgrößen der Spannung und der Stromstärke — Arbeit und Leistung im Wechselstromkreis

4.4.1. Verhalten eines Drehspulstrommessers im Wechselstromkreis

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Strommesser (0,5 A; Nullpunktmittellage)
3. Generator aus Aufbauteilen
4. Schalter
5. Glühlampe (4 V; 0,3 A)
6. Glühlampe (220 V; 25 W)
7. Netzadapter

Methodische Hinweise

1. Im allgemeinen werden Schüler durch Überlegungen finden, wie ein Drehspulmeßwerk sich bei wachsender Frequenz verhält. Die Hypothese findet durch diesen Versuch ihre Bestätigung.
2. Man sollte nicht versäumen, auf die Gefahr für das Meßwerk hinzuweisen. Wenn dieses mit zu kleinem Meßbereich von einem Wechselstrom durchflossen wird, so bleibt zwar der Zeiger in Ruhe, aber die Spule wird belastet.

Versuch

Nach V 3.1.2. wird aus Aufbauteilen ein fremderregter Wechselstromgenerator zusammengestellt, an dessen Elektromagnet eine Gleichspannung von 6 V gelegt wird. An die Schleifbürsten wird ein Drehspulmeßgerät mit Nullpunktmittellage und, mit ihm in Reihe liegend, eine Glühlampe (4 V; 0,3 A) angeschlossen (Abb. 4.4.1./1).
Wird der Elektromagnet erregt und der Doppel-T-Anker langsam, etwa einmal je Sekunde, in Umdrehung versetzt, so pendelt der Zeiger des Drehspulgerätes im Rhythmus der Stromwechsel um den Nullpunkt. Dreht man den Anker schneller, so vermag der Zeiger den schnellen Stromwechseln nicht mehr zu folgen und verbleibt schließlich in der Nullage in Ruhe. Dagegen leuchtet die kleine Glühlampe auf und läßt am schnellen Flackern die eintretenden Stromwechsel erkennen. Daß trotz des Versagens des Drehspulmeßwerks ein Strom durch die Leitung fließt, tritt noch deutlicher hervor, wenn man das Meßgerät in Reihe mit einer 25-W-Glühlampe (220 V) an die Wechselspannung des Netzes legt. Die Glühlampe leuchtet hell; der Strommesser zeigt aber keinen Strom an, da der Zeiger dem schnellen Wechsel nicht folgen kann.

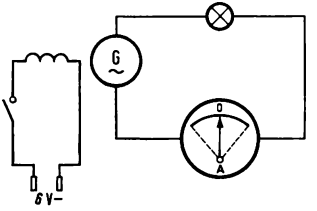


Abb. 4.4.1./1
Drehspulmeßgerät im Wechselstromkreis mit veränderlicher Frequenz

4.4.2. Vergleich zwischen dem Maximalwert und dem Effektivwert einer Wechselspannung

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (50 V —)
2. 2 Gleitwiderstände (110 Ω oder 300 Ω)
3. Spannungsmesser (50 V — ; Nullpunktmittellage)

Zu Variante b

4. Stromversorgungsgerät (350 V —)
5. Amplitudenglimmlampe mit Skale
6. Gleitwiderstand (1300 Ω)
7. Widerstand (200 kΩ)

Methodische Hinweise

1. Durch die Variante a wird das andersartige Verhalten eines Dreheisenmeßwerkes gegenüber dem Drehspulmeßwerk deutlich, weil sein Zeigerausschlag unabhängig von der Stromrichtung ist.
2. Methodisch ist der Versuch gut zur Einführung des Begriffs Effektivwert einzusetzen. Der Zeiger stellt sich auf einen Mittelwert ein. Er wird dynamisch in dieser Stellung durch eine elektrische Leistung des Wechselstroms gehalten, die der Leistung eines Gleichstroms gleich ist, der ihn in die gleiche Stellung bringt.
3. In Variante b wird durch Vergleich mit einer Gleichspannung der Maximalwert einer Wechselspannung gemessen und das Verhältnis zum Effektivwert ermittelt, den ein Meßgerät anzeigt. Sie ergänzt die Variante a für Wechselstrom mit Netzfrequenz.

Variante a: Spannungsvergleich am Wechselstrom kleiner Frequenz

Nach V 2.2.1. wird eine Anordnung zum Erzeugen einer Wechselspannung von geringer Frequenz aufgebaut. In die Brückenleitung wird der Spannungsmesser gelegt (Abb. 4.4.2./1). Der Gleitkontakt des einen Widerstandes wird genau in die Mitte gestellt. Den Gleitkontakt des anderen Widerstandes schiebt man zunächst an das eine Ende, dann an das andere. Die Spannung muß in beiden Fällen gleich groß sein. Sie ist die Maximalspannung u_{max} der erzeugten Wechselspannung.

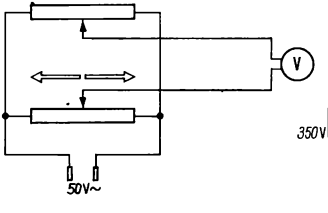


Abb. 4.4.2./1
Dreheisenspannungsmesser an einer Spannung mit kleiner Frequenz

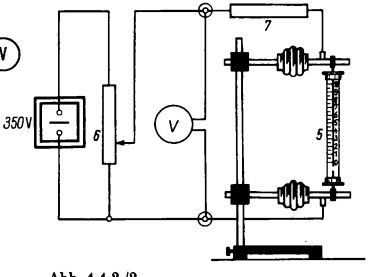


Abb. 4.4.2./2
Amplitudenglimmlampe als Anzeigegerät für Gleich- und Wechselspannungen

Man schiebt den Gleitkontakt so schnell wie möglich hin und her. Der Ausschlag des Zeigers pendelt dabei um den tiefer gelegenen Effektivwert der Spannung. Es ist beispielsweise

$$u_{max} = 18{,}4\ V\ ,$$
$$U_{eff} = 13{,}0\ V\ .$$

Bildet man den Quotienten, so erhält man

$$\frac{u_{max}}{U_{eff}} = \frac{18{,}4\ V}{13{,}0\ V} \approx 1{,}41 \approx \sqrt{2}\ .$$

Variante b: Durchführung des Versuches mit Netzfrequenz

In der nach Abbildung 4.4.2./2 zusammengestellten Versuchsanordnung verwendet man eine Amplitudenglimmlampe, die zunächst an die Netzspannung gelegt wird. Bei einer Spannung von $U_{eff} = 218\ V$ reicht der Glimmsaum der Glimmlampe beispielsweise bis zum Skalenteil 4,1. Darauf schließt man die Versuchsanordnung über einen Spannungsteiler an eine Gleichspannung von 350 V an und stellt die Spannung so ein, daß der Glimmsaum wieder den Skalenteil 4.1 erreicht. Man liest die Spannung 306 V ab. Es ist die Spannung, die bei der Wechselspannung gleich der Maximalspannung ist.
Bildet man den Quotienten, so findet man auch bei diesem Beispiel

$$\frac{u_{max}}{U_{eff}} = \frac{306\ V}{218\ V} \approx 1{,}4 \approx \sqrt{2}\ .$$

4.4.3. Messen der Effektivwerte von Stromstärke und Spannung

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (14 V ~)
2. Drehspulstrommesser (0,5 A)
3. Dreheisenstrommesser (0,5 A)
4. Drehspulstrommesser mit Gleichrichtervorsatz (0,5 A)
5. Drehspulstrommesser mit Thermovorsatz (0,5 A)
6. Glühlampe (14 V; 3 W)
7. Schalter

Zu Variante b

Geräte 1., 6., 7., außerdem

8. Dreheiseneinsatz
9. Spule (125/250 Wdg.)
10. Holzunterlage
11. Gleichrichter in Graetzschaltung
12. Thermoelement
13. Klemmenstange
14. dünner Eisendraht (Blumendraht)
15. Glühlampe (4 V; 0,6 A)

Methodische Hinweise

1. Nach der Einführung des Effektivwertes durch V 4.4.2. sind mit diesen Versuchen die verschiedenen Meßgerätetypen für Wechselstrommessungen zu demonstrieren.
2. Zur Wiederholung für die Wirkungsweise der Geräte sind V 1.3.8., V 1.3.9. und V 5.3.6. heranzuziehen.
3. Besonders wichtig ist die Behandlung von Drehspulgeräten mit Gleichrichtervorsatz, da diese technisch die größte Bedeutung haben. Auch die Schülermeßgeräte „Polyzet" und „Polytest" sind so gebaut.

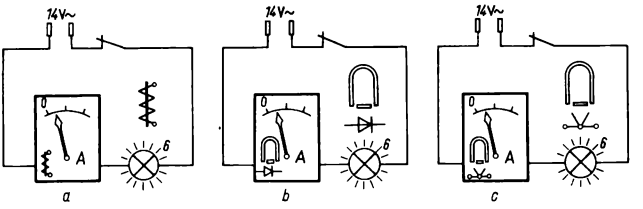


Abb. 4.4.3./1 Drei Typen von Wechselstrommessern.
a) Dreheisen- oder Weicheisengerät,
b) Drehspulgerät mit Gleichrichtervorsatz,
c) Drehspulgerät mit Thermovorsatz.
In den Nebenbildern die Schaltzeichen der Geräte

4. Um an die Gedankenführung in V 4.4.2. anzuknüpfen, kann man alle Teilversuche mit Gleichspannung mit wechselnder Polarität ausführen. Der Zeigerausschlag ist immer unabhängig von der Richtung des Stromes.

Variante a: Verwendung von Wechselstrommeßgeräten

Man legt nacheinander einen Dreheisenstrommesser, einen Drehspulstrommesser mit Gleichrichtervorsatz, einen Drehspulstrommesser mit Thermovorsatz über einen Schalter in Reihe mit einer 3-W-Glühlampe an eine Wechselspannung von 14 V (Abb. 4.4.3./1). Beim Einschalten des Stromes leuchtet die Lampe; die Meßgeräte zeigen eine Stromstärke von etwa 0,21 A an. Auch die Spannung kann man entsprechend mit verschiedenen Meßgeräten messen.
Die Verwendbarkeit der genannten Geräte zum Messen der Spannung und der Stromstärke eines Wechselstromes beruht auf der Eigenart ihrer Konstruktion. Man mißt nämlich bei diesen Geräten die Spannung und die Stromstärke nicht unmittelbar, sondern auf dem Umwege über die Leistungsaufnahme. Diese ist vom Quadrat der Spannung bzw. der Stromstärke abhängig, aber von der Richtung des Stromes unabhängig.
Die Zeigerstellungen geben die quadratischen Mittelwerte der Spannung und der Stromstärke an. Diese heißen die effektive Spannung U_{eff} und die effektive Stromstärke I_{eff}. Multipliziert man die Effektivwerte der Spannung und Stromstärke miteinander, so erhält man die Scheinleistung, gemessen in Voltampere (VA).

Variante b: Modellversuche zu den Meßgeräten

1. Dreheisengerät (Abb. 4.4.3./2)

Man führt den Dreheiseneinsatz in die Spule ein und stellt die Versuchsanordnung zusammen. Beim Einschalten des Stromes zeigt das Dreheisenmodell die Effektivstromstärke an.

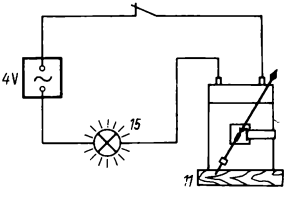


Abb. 4.4.3./2 Dreheiseneinsatzmodell

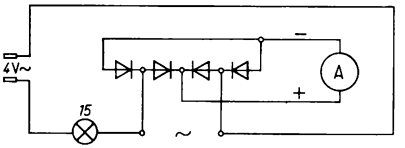


Abb. 4.4.3./3 Modell eines Drehspulmeßgerätes mit eingebautem Zweiweggleichrichter

2. Gleichrichtervorsatz (Abb. 4.4.3./3)

Man schaltet vor ein Drehspulmeßgerät einen Gleichrichter (Selengleichrichter oder 4 Dioden in Graetzschaltung). In Reihe damit legt man eine Kleinspannungsglühlampe mit großer Leistungsaufnahme und schließt die Anordnung an eine niedrige Wechselspannung an. Dies führt zu dem gleichen Ergebnis wie bei 1.

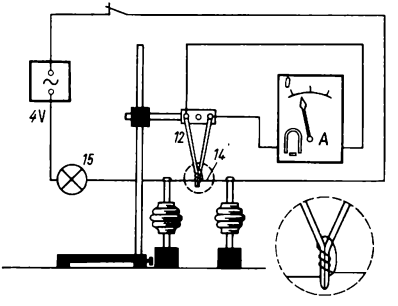


Abb. 4.4.3./4 Drehspulgerät mit vorgelegtem Thermoelement

3. Thermovorsatz (Abb. 4.4.3./4)

An die Drehspule eines Drehspulgerätes wird ein Thermoelement angeschlossen, dessen Spitze mit einem in der Wechselstromleitung liegenden blanken Eisendraht umwickelt ist. Wenn der Stromkreis geschlossen wird, leuchtet eine vom Strom durchflossene Lampe auf. Das Meßgerät zeigt einen Ausschlag, der von dem entstehenden Thermostrom erzeugt wird.

4.4.4. Leistungsberechnung aus Stromstärke und Spannung — Vergleich zwischen Gleichstrom und Wechselstrom [SE]

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (20 V ≃)
2. Strommesser (0,5 A ≃)
3. Spannungsmesser (20 V ≃) oder Vielfachmeßgeräte anstelle von 2. und 3.
4. Gleitwiderstand (300 Ω)
5. Glühlampe (14 V; 3 W oder 5 W)
6. Schalter

Zu Versuch 2

Geräte 2. bis 6., außerdem
7. Stromversorgungsgerät (6 V — ; 10 V ~)
8. Spule (1500 Wdg.)

Methodische Hinweise

1. Versuch 1 zeigt die Gleichheit der Gleichstromleistung mit der Leistung im Wechselstromkreis an einem Ohmschen Widerstand. Er knüpft an V 4.2.1. an und erläutert die Bedeutung der Effektivwerte zur Leistungsberechnung.
2. Versuch 2 kann zur induktiven Einführung der Scheinleistung dienen oder nach einer deduktiven Einführung über die Phasenverschiebung zur Bestätigung herangezogen werden. Ihm muß die Gedankenführung vorausgeschickt werden, daß in einer Spule im Wechselstromkreis die gleiche Wirkleistung wie im Gleichstromkreis auftritt, wenn die Stromstärken gleich sind; denn eine Spule kann als Reihenschaltung eines Ohmschen und eines induktiven Widerstandes aufgefaßt werden, und am induktiven Widerstand tritt keine Wirkleistung auf.

Versuch 1: Leistungsermittlung im induktionsfreien Stromkreis

An eine Gleichspannungsquelle für 14 V wird nach Abbildung 4.4.4./1a eine Glühlampe angeschlossen. Nach dem Schließen des Stromkreises werden die Stromstärke I und die Spannung U an den Meßgeräten abgelesen. Das Produkt $U \cdot I$ wird errechnet. Dann wird der gleiche Stromkreis an die Wechselspannung von ungefähr 14 V angeschlossen. Durch das Potentiometer werden die Spannungen in beiden Fällen auf den gleichen Wert eingestellt. Es werden die Effektivstromstärke und die Effektivspannung an den Meßgeräten abgelesen und als ihr Produkt die Scheinleistung errechnet, die in diesem Falle gleich der Wirkleistung ist. Es ergeben sich beispielsweise die in der beigefügten Tabelle zusammengestellten Werte.

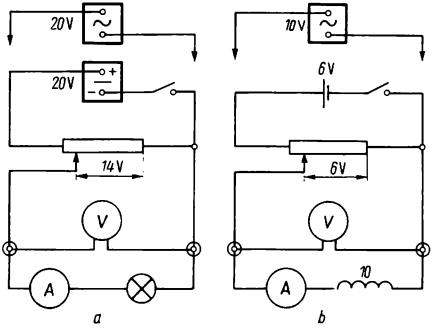


Abb. 4.4.4./1 Schaltplan zur Leistungsbestimmung
a) im induktionsfreien Stromkreis,
b) im induktionsbelasteten Stromkreis

Beispiele der Effektivwerte der Spannung und der Stromstärke

Stromart	Spannung U_{eff} in V	Stromstärke I_{eff} in A	Leistung $U_{eff} \cdot I_{eff}$ in W (errechnet)
Gleichstrom	14	0,215	3,01
Wechselstrom	14	0,210	2,94

In beiden Fällen stimmen die Leistungen annähernd überein.

Versuch 2: Messung in einem Stromkreis, der eine Induktivität enthält

Wie in Versuch 1 wird ein Stromkreis nach Abbildung 4.4.4./1b geschaltet, an den eine Gleich- und eine Wechselspannung angeschlossen werden kann. An die Stelle der Glühlampe tritt eine Spule. Nach Anlegen einer Gleichspannung von 6 V werden die Stromstärke I und die Spannung U an den Meßinstrumenten abgelesen. Das Produkt $U \cdot I$ wird errechnet.
Darauf wird der gleiche Stromkreis an die Wechselspannung des Stromversorgungsgerätes angeschlossen; durch ein Potentiometer wird die gleiche Stromstärke eingestellt wie bei der Gleichspannung. Die Stromstärke I_{eff} und die Spannung U_{eff} werden gemessen, und das Produkt $U_{eff} \cdot I_{eff}$ wird errechnet.

Stromart	Spannung U_{eff} in V	Stromstärke I_{eff} in A	Scheinleistung $U_{eff} \cdot I_{eff}$ in VA (errechnet)
Gleichstrom	6	0,37	2,2
Wechselstrom	9,5	0,37	3,5

Es zeigt sich, daß eine größere Scheinleistung im Wechselstromkreis notwendig ist, um die gleiche Wirkleistung wie im Gleichstromkreis zu erreichen.

4.4.5. Scheinleistung eines Wechselstromes — Bestimmen von cos φ

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (20 V ~)
2. Strommesser (0,5 A ~)
3. Spannungsmesser (250 V ~) oder 2 Vielfachmeßgeräte anstelle von 2. und 3.
4. Leistungsmesser mit Vorschaltwiderstand für 300 V und für 30 V
5. Glühlampe (220 V; 25 W)
6. Spule (1500 Wdg.)
7. Schalter

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 5. und 7., außerdem
8. technischer Transformator

Zu Versuch 3

Gerät 2. bis 4. und 7., außerdem
9. Kleinmotor für 220 V
10. Bremsbacken
11. Netzadapter

Methodischer Hinweis

Die Versuche können einerseits rein qualitativ ausgewertet werden, um zu zeigen, daß Unterschiede zwischen der aus Spannung und Stromstärke berechneten Scheinleistung und der mit dem Leistungsmesser gemessenen Wirkleistung bestehen. Andererseits sind sie quantitativ auswertbar, um den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ zu berechnen.

Versuch 1: Leistung im induktiv belasteten Stromkreis — Berechnung des Leistungsfaktors

An einem Elektrogerät, beispielsweise einer Glühlampe, mißt man die Effektivwerte der Spannung und der Stromstärke (Abb. 4.4.5./1). Ihr Produkt $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ liefert die Scheinleistung P_s. Gleichzeitig schließt man einen Leistungsmesser an und mißt die Wirkleistung P_w. Man legt die Spannungsquelle des Leistungsmessers mit dem 30-V-Anschluß in den Nebenschluß, die Stromspule in den Hauptschluß.

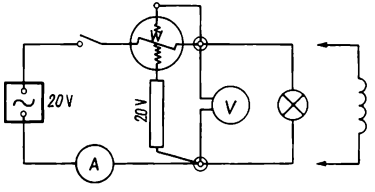


Abb. 4.4.5./1
Schaltplan zur Leistungsbestimmung im induktiv belasteten Stromkreis

Der Quotient $\frac{P_w}{P_s}$ ergibt den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und damit den Phasenwinkel φ.

Liegt eine Glühlampe im Stromkreis, so ist der Unterschied zwischen der Scheinleistung und der Wirkleistung nur klein. Tauscht man dagegen die Glühlampe gegen eine Spule aus, so ist der Unterschied der Scheinleistung und der Wirkleistung im Verhältnis viel größer. Die am Schluß beigefügten Tabellen geben Beispiele für durchgeführte Messungen wieder.

Versuch 2: Leistung eines unbelasteten und belasteten Transformators

In gleicher Weise kann man die Messungen und Berechnungen an der Primärseite eines belasteten oder unbelasteten Transformators und an der Sekundärseite eines belasteten Transformators vornehmen (Abb. 4.4.5./2). Die Belastung ist dabei zu verändern. Das Produkt der Effektivspannung und der Effektivstromstärke liefert

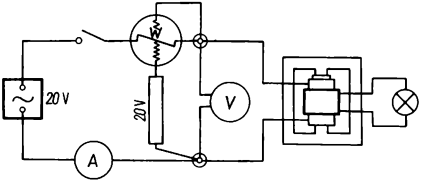


Abb. 4.4.5./2
Schaltplan
zur Leistungsbestimmung
eines Transformators

wieder die Scheinleistung, während die Wirkleistung am Leistungsmesser unmittelbar abgelesen wird. Der Quotient $\frac{P_w}{P_s}$ aus Wirkleistung und Scheinleistung ergibt wieder den Leistungsfaktor, aus dem man den Phasenwinkel ermittelt.

Versuch 3: Leistung beim Leerlauf und bei Belastung eines Motors

In der Versuchsanordnung 1 wird die Glühlampe durch einen 220 V-Kleinmotor ersetzt (Abb. 4.4.5./3). Die Versuchsanordnung wird an die Netzspannung (220 V ~) angeschlossen. Der Motor läuft im Leerlauf. Die Werte der drei Meßgeräte werden abgelesen. Dasselbe wird noch mit belastetem Motor durchgeführt, indem die Motorachse durch Bremsbacken abgebremst wird. Es schließen sich daran die gleichen Berechnungen wie bei a und bei b.

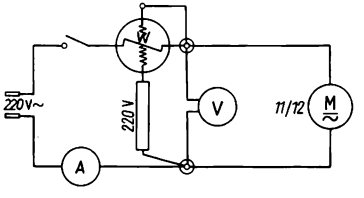


Abb. 4.4.5./3 Schaltplan zur Leistungsbestimmung eines Motors

Tabelle 1: Effektivwerte und Scheinleistung

Frequenz $f = 50$ Hz

Versuch Nennwert der Spannung	Gerät	Effektivwert der Spannung U_{eff} in V	Effektivwert der Stromstärke I_{eff} in A	Scheinleistung P_s in VA
a	Glühlampe 25 W	19,5	0,05	0,98
20 V	Spule 1500 Wdg.	18,5	0,8	15
b	unbelastet	20	1,2	24
	Transformator			
220 V	belastet	19	1,6	30
c	freilaufend	212	0,12	25
	Motor			
220 V	belastet	205	0,17	35

Tabelle 2: Scheinleistung, Wirkleistung, Leistungsfaktor

Frequenz $f = 50$ Hz

Gerät	Scheinleistung P_s in VA	Wirkleistung P_w in W	Leistungsfaktor $\cos\varphi$	Phasenwinkel φ in Grad
Glühlampe 25 W	0,98	0,9	0,92	23
Spule 1500 Wdg.	15	10,0	0,67	48
Transformator unbelastet	24	4,8	0,20	78
Transformator belastet	30	26,0	0,87	29
Motor freilaufend	25	19,0	0,76	41
Motor belastet	35	28,0	0,80	36

Bemerkungen

1. Ein Transformator muß so beschaffen sein, daß er unbelastet nur eine sehr geringe Leistung aufnimmt. Sein Phasenwinkel muß nahe an $\frac{\pi}{2}$ herankommen, sein induktiver Widerstand muß demnach sehr groß sein.
2. Bei großen leerlaufenden Wechselstrommotoren ist der Phasenwinkel erheblich größer. Er erreicht aber niemals den Wert $\frac{\pi}{2}$, da immer Energie zum Überwinden der Reibung und für den Ausgleich anderer Verluste benötigt wird.

5. Elektrische Leitungsvorgänge

5.0. Methodische Bemerkungen

5.0.0. Da im folgenden die Leitungsvorgänge in den verschiedenen Stoffen experimentell untersucht werden, ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes von verschiedenartigen Unterrichtsmitteln, die von der Art des Stoffes bestimmt sind. Für Vorgänge in Flüssigkeiten werden Glasgeräte und Elektroden aus unterschiedlichen Stoffen benötigt, die zum Teil als Gerät zur Elektrolyse und für Schülerexperimente im SEG Elektrizitätslehre bereitstehen und zum Teil leicht selbst zusammengestellt werden können.
Für die Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum stehen Spezialröhren zur Verfügung. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß nur noch Röhren mit geheizter Katode verwendet werden dürfen, weil die alten Kaltkatodenröhren Röntgenstrahlen emittieren, deren Intensität die nach den Strahlenschutzbestimmungen zulässigen Werte übersteigt. Für die Versuche mit Röhrendioden und Röhrentrioden sind das Tafelschaltgerät, das SEG Hochfrequenz- und Halbleitertechnik sowie ältere HF-Aufbaugerätesätze einzusetzen, mit denen auch die meisten Versuche des Abschnitts über Leitungsvorgänge in festen Körpern ausgeführt werden können. Der Vorschlag zur Ergänzung des Tafelschaltgerätes durch Adapterstücke aus 4.0.5. wird in 5.0.4. fortgesetzt. Hinweise zum Selbstbau sind auch im 10. Teil gegeben.

5.0.1. Dem allgemeinen Modell der elektrischen Leitungsvorgänge entsprechend, kommt es in allen Abschnitten darauf an, durch die Versuche zu zeigen, daß in den verschiedenen Stoffen unter Einwirkung des elektrischen Feldes Ladungsträger in Bewegung kommen, um welche Ladungsträger es sich jeweils handelt, wie sie entstehen und wie sie sich bewegen. Weiter muß untersucht werden, welche Wirkungen damit verbunden sind und in welcher Art diese technisch nutzbar sind. Soweit das mit schulischen Mitteln möglich ist, sind die Versuche nach diesen Gesichtspunkten ausgewählt.
Durch die Versuche wird zunächst die Leitfähigkeit und ihre Abhängigkeit von der Ionenkonzentration betrachtet (V 5.1.1.), dann die Ionenwanderung selbst sichtbar dargestellt (V 5.1.2.). Weiter werden verschiedene Arten von Ionen nachgewiesen (V 5.1.3. u. 5.1.4.). V 5.1.5. behandelt den Energietransport bei diesen Leitungsvorgängen. Die Versuche V 5.1.6. bis V 5.1.12. führen von qualitativen zu quantitativen Bestimmungen der Gesetzmäßigkeiten und zeigen gleichzeitig technische Möglichkeiten zur Nutzung der Elektrolyse.

5.0.2. Die methodische Gestaltung des Unterrichts mit den Versuchen aus dem Abschnitt 5.2. kann ähnlich wie im Abschnitt 5.1. erfolgen. Eine Reihe von Versuchen zeigt die Freisetzung von Ladungsträgern unter bestimmten Bedingungen: V 5.2.1. durch äußere Einflüsse, V 5.2.2. durch das elektrische Feld, V 5.2.4. durch

Erwärmung der Katode, V 5.2.13. und 5.2.14. durch Licht. Eingeschoben sind jeweils die Versuche, die deutlich machen, welche Wirkungen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes auftreten und wie diese technisch nutzbar sind (V 5.2.3. Leuchterscheinungen bei Gasentladungen, V 5.2.5. Katodenstrahlen, V 5.2.6. bis 5.2.12. Diode und Triode, V 5.2.15. und 5.2.16. Anwendungen von Fotozellen).

5.0.3. In Halbleitern sind die Ladungsträger nicht unmittelbar nachweisbar oder sichtbar zu machen, so daß die Existenz von Elektronen und Defektelektronen (Löchern) im Unterricht zunächst theoretisch erklärt werden muß. Die Versuche bestätigen dann die Richtigkeit dieser Erklärungen. Dazu dienen in erster Linie V 5.3.1. und 5.3.10. mit der Freisetzung von Ladungsträgern durch Erwärmung und durch Licht, V 5.3.2. mit der Untersuchung des p-n-Übergangs und V 5.3.7. mit der Untersuchung der pnp-Schichtung des Transistors sowie V 5.3.11. mit dem Nachweis des thermoelektrischen Effektes.
Die dazwischen eingeschobenen Versuche gehen wieder wie im Abschnitt 5.2. in technische Richtung und zeigen grundsätzliche Einsatzmöglichkeiten von Halbleiterbau elementen.
Die Montage der Bauelemente Fotodiode, Fotowiderstand und Fotoelement erfolgt am günstigsten auf Hartpapier oder Hartgewebeplatten der Größe 50 mm × 50 mm (Pertinax oder kupferkaschiertes Material).
Der Aufbau erfolgt am besten so, daß die fertigen Elemente in den Handapparat des SEG Optik oder in den Blendrahmen eingesetzt werden können.
Für den Fotowiderstand und die Fotodiode ist dieser Aufbau unproblematisch. Die Anschlußdrähte der Bauelemente werden durch zwei kleine Löcher geführt, scharf abgebogen und unter die Meßbuchsenanschlüsse geschraubt (Abb. 5.0.3./1).
Für das Fotoelement wird eine Anordnung nach Abbildung 5.0.3./2 mit kupferkaschiertem Material vorgeschlagen. Die Kupferschichtung läßt sich an den entsprechenden Stellen durch Einritzen mit einem scharfen Messer und Abziehen des Materials entfernen. Auf diese Art lassen sich auch rechteckige Fotoelemente, die z. B. aus alten Belichtungsmessern gewonnen werden können, montieren.
Soll mit den Elementen nur im Handapparat gearbeitet werden, ist es günstiger, die Meßbuchsen an der Rückseite zu befestigen. Zur Vermeidung von seitlichem Fremdlichteinfall ist es günstig, über die Bauelemente Zylinder aus Pappe oder entsprechenden Plastrohren von etwa 3 cm Länge zu kleben.

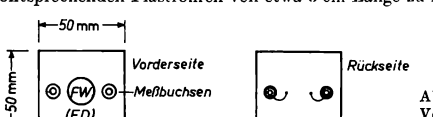


Abb. 5.0.3./1
Vorder- und Rückseite des Bauelementeträgers

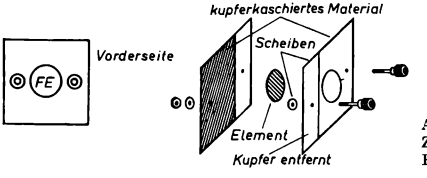


Abb. 5.0.3./2
Zur Montage eines Fotoelementes

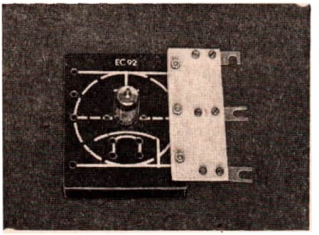


Abb. 5.0.4./1
Adapter für Röhrenbrett des SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

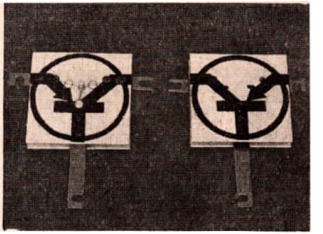


Abb. 5.0.4./2
Transistorfassung

5.0.4. Für die Versuche mit Elektronenröhren wird die Anfertigung eines Adapterstückes für das Röhrenbrett des SEG Hochfrequenz- und Halbleitertechnik empfohlen (Abb. 5.0.4./1). Material und Bauhinweise sind in 4.0.5. gegeben. Für den Einsatz von Transistoren auf dem Tafelschaltgerät zeigt Abb. 5.0.4./2 einen zweiseitig einsetzbaren Bauelementeträger, auf dem Transistoren leicht auswechselbar befestigt werden können (Abb. 5.0.4./3).

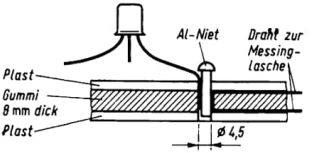


Abb. 5.0.4./3
Schnitt durch eine Anschlußstelle des Transistors

5.1. Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten

5.1.1. Elektrische Leitfähigkeit von Flüssigkeiten [SE]

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Elektrodenhalter
3. 2 Kohleelektroden
4. Bechergläser
5. destilliertes Wasser, Leitungswasser, verdünnte Säuren und Basen, Salzlösungen, Glyzerin, Brennspiritus
6. Strommesser (100 mA ... 1 mA —)
7. Spannungsmesser (5 V —)
8. Drehwiderstand (50 Ω)

Methodische Hinweise

1. Es soll nachgewiesen werden, daß in verschiedenen Flüssigkeiten unterschiedliche Mengen von Ladungsträgern für die Leitungsvorgänge bereitstehen, indem im gleichen elektrischen Feld unterschiedliche Stromstärken auftreten.
2. Die Bewegung der Ladungsträger wird mit V 5.1.2. gezeigt, die Arten der Ladungsträger in V 5.1.3.

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 5.1.1./1. Es werden vorher Bechergläser mit dem gleichen Volumen der verschiedenen Flüssigkeiten gefüllt.
Der Elektrodenhalter mit den Kohlestiften wird von einer Flüssigkeit zur anderen umgesetzt. Dabei spült man sie jedesmal gut ab. Der Meßbereich ist für jede neue Flüssigkeit auf 100 mA einzustellen. Bei den schlecht leitenden Flüssigkeiten setzt man ihn dann jeweils herab.
Gleich starke elektrische Felder stellt man durch den Vorwiderstand ein, indem man die Spannung zwischen den Elektroden auf 4 V stellt. Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Konzentration der Ladungsträger ist zu demonstrieren, indem man unter Umrühren dem destillierten Wasser tropfenweise eine konzentrierte Natriumchloridlösung zusetzt.

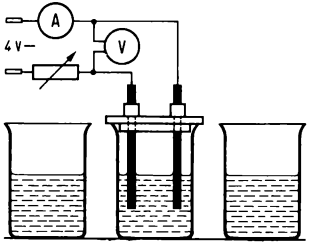


Abb. 5.1.1./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Leitfähigkeit von Flüssigkeiten

5.1.2. Veranschaulichung der Ionenwanderung

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (70 V —)
2. U-Rohr
3. wäßrige Kaliumnitratlösung (0,03%)
4. wäßrige Kaliumpermanganatlösung (0,05%);
   Dichte durch Zusatz von Harnstoff (5 g in 100 ml) vergrößert
5. 2 Kohleelektroden
6. Pipette

Zu Variante b

Geräte 1. und 3., außerdem

7. Glasplatte (90 mm × 120 mm)
8. Fließpapier
9. festes Kaliumpermanganat
10. dünne Kupferblechstreifen Ⓢ
11. 2 mit Kabelschuhen verlötete Krokodilklemmen Ⓢ

Methodischer Hinweis

Die Bedeutung dieser Versuche liegt darin, daß man die Bewegung von Ladungsträgern unmittelbar beobachten kann. Außerdem demonstrieren sie, daß die Geschwindigkeit der Ladungsträger sehr klein ist.

Variante a

Versuchsanordnung

Man füllt das U-Rohr zu einem Drittel mit der Kaliumnitratlösung, dann schichtet man mit einer Pipette vorsichtig die Kaliumpermanganatlösung darunter, deren Dichte man durch Zusatz von Harnstoff vergrößert, so daß scharfe Trennflächen zwischen den Lösungen in den beiden Meßröhren entstehen. Die Kohleelektroden werden so eingesetzt, daß sie nur in die Kaliumnitratlösung hineinragen. Die Schaltung erfolgt nach Abbildung 5.1.2./1. Die Gleichspannung beträgt etwa 70 V.

Versuch

Nach Schließen des Stromkreises kann man ein langsames Wandern der Trennflächen zwischen den beiden Lösungen beobachten; es vollzieht sich ein Steigen im Anodenraum und ein Sinken im Katodenraum. Läßt man den Stromkreis etwa 20 min ... 30 min geschlossen, so kann man durch Messen der Verschiebung der beiden Grenzflächen die Wanderungsgeschwindigkeit der Permanganat-Ionen ermitteln.

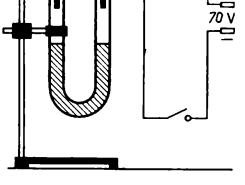


Abb. 5.1.2./1 Sichtbarmachen der Wanderung von Permanganat-Ionen

Bemerkung

Als sehr vorteilhaft erweist sich ein U-Rohr mit seitlichem Füllansatz, der an der tiefsten Stelle des Rohres abzweigt und oben in einen Trichter endet. Bei ihm dringt

die durch den Fülltrichter eingegossene Kaliumpermanganatlösung von unten ein und hebt die leichte Kaliumnitratlösung, wobei sich ganz scharfe Trennflächen bilden.

Variante b

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 5.1.2./2 ersichtlich. Die Glasplatte wird mit einem gleich großen Stück Fließpapier belegt, das mit Kaliumnitratlösung getränkt ist. Die dünnen U-förmig gebogenen Kupferstreifen werden an zwei gegenüberliegenden Seiten des Glases mit Krokodilklemmen befestigt, so daß sie Glas und Fließpapier umfassen. In die Mitte des Fließpapiers bringt man ein Körnchen Kaliumpermanganat. Durch die angelöteten Kabelschuhe kann die Glasplatte an zwei Holtzschen Klemmen in vertikaler Lage befestigt werden.

Versuch

Legt man an die Holtzschen Klemmen eine Gleichspannung von etwa 20 V, so beobachtet man das Wandern einer violetten Wolke von Permanganat-Ionen zur Anode. Polt man um, so weicht die violette Wolke zurück, an der gegenüberliegenden Seite aber wandert sie aus. Die freiwerdenden Bereiche nehmen wegen der Bildung von Braunstein braune Farbe an.
Für Schülerexperimente ist dieser Versuch in vereinfachter Form durchführbar. Man legt eine rechteckige Glasscheibe auf den Tisch und bedeckt die Scheibe mit einem Streifen Fließpapier, der mit 3prozentiger Kaliumnitratlösung getränkt ist. Quer zu seiner Längsrichtung legt man auf das Fließpapier einen kurzen Streifen Fließpapier, der mit 5prozentiger Kaliumpermanganatlösung getränkt ist. Hält man dann zwei Bananenstecker, die unter einer Gleichspannung von 20 V stehen, mit ihren blanken Metallteilen flach auf das Fließpapier, so breitet sich bald eine rote Wolke zum positiven Pol hin aus (Abb. 5.1.2./3).

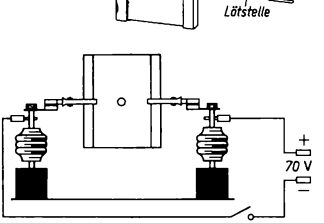


Abb. 5.1.2./2
Wanderung von Permanganat-Ionen

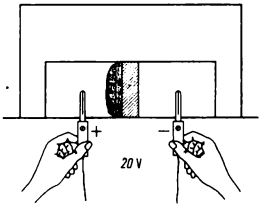


Abb. 5.1.2./3 Nachweis der Ionenwanderung durch einen Freihandversuch

5.1.3. Nachweis von Ionen bei Leitungsvorgängen in Flüssigkeiten

1. Stromversorgungsgerät (4 V ... 12 V —)
2. Becherglas (500 ml)
3. 2 Reagenzgläser
4. 2 Gummistopfen
5. 2 Kohlestifte oder Bleiblechstreifen
6. verdünnte Salzsäure
7. Kupfer(II)-chloridlösung

Methodische Hinweise

1. Bei sehr vielen elektrolytischen Vorgängen treten an den Elektroden Vorgänge auf, durch die die nicht am Ladungstransport beteiligten Ionen entladen und als Atome abgeschieden werden, z. B. Bildung von Hydroxiden an der Katode und Sauerstoff an der Anode.
   Diese Vorgänge werden im Physikunterricht nicht genauer untersucht.
2. Die Versuche sollen durch Abscheidung der entsprechenden Stoffe die Angaben in der Tabelle mit der Übersicht über die Ionenarten für die Schüler direkt bestätigen.

Elektrolytlösung	Kationen	Anionen
Säurelösung	Wasserstoff-Ionen	Säurerest-Ionen
Hydroxidlösung	Metall-Ionen	Hydroxid-Ionen
Salzlösung	Metall-Ionen	Säurerest-Ionen

3. Die Hydroxid-Ionen können nicht direkt, sondern immer nur indirekt durch Schließen aus der Sauerstoffabscheidung nachgewiesen werden.

Versuch 1: Nachweis von Wasserstoff- und Säurerest-Ionen

Versuchsvorbereitung

Man fertigt sich aus plastisoliertem Aluminiumdraht (1 mm² ... 2 mm²) zwei Drahtbügel nach Abbildung 5.1.3./1. An den Enden, die in die Flüssigkeit tauchen sollen, wird in etwa 5 cm Länge die Isolation entfernt. Der Draht wird um Kohlestifte aus einer Monozelle oder Streifen aus Bleiblech gewickelt. Die Wickel werden durch einen Alleskleber isoliert. An den anderen Enden wird ebenfalls ein Stück der Isolation entfernt und eine Öse zum Befestigen an Holtzschen Klemmen gebogen. Ein Becherglas (500 ml) wird mit etwa 300 ml verdünnter Salzsäure gefüllt. Zwei Reagenzgläser werden mit der gleichen Säure gefüllt und durch Gummistopfen so verschlossen, daß sich in ihnen keine Luftblase befindet. Die Reagenzgläser werden mit dem Stopfen nach unten in die Säure im Becherglas getaucht. Die Stopfen werden mit einer Tiegelzange herausgezogen und die Reagenzgläser über die Elektroden gestülpt.

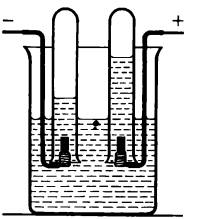


Abb. 5.1.3./1 Becherglas mit Reagenzgläsern und Elektroden

Versuch

Die Elektroden werden an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die Spannung wird so weit heraufgesetzt, bis eine kräftige Gasentwicklung an der Katode zu beobachten ist. Die Gasentwicklung an der Anode ist erheblich geringer, weil das freiwerdende Chlor zum Teil in der Flüssigkeit gelöst wird.
Wenn das Glas über der Katode fast vollständig mit Wasserstoff gefüllt ist, wird der Strom ausgeschaltet. Die Gläser werden unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche von den Elektroden abgehoben und mit Hilfe der Tiegelzange wieder mit den Gummistopfen verschlossen. Abschließend werden die aufgefangenen Gase untersucht. Der Wasserstoff verbrennt bei Entzündung puffend mit blauer Flamme (Vorsicht Knallgasgefahr!).
Das Chlor ist am Geruch zu erkennen.

Versuch 2: Nachweis von Metall- und Säurerest-Ionen

Als Elektrolytlösung verwendet man eine wäßrige Kupfer(II)-chloridlösung. An der Anode wird wie bei Versuch 1 verfahren. Als Katode wird ein Kohlestab in die Lösung getaucht, der sich während des Versuches mit einer rötlichen Kupferschicht überzieht.

5.1.4. Nachweis des negativen Pols einer Spannungsquelle mit Hilfe von Polreagenzpapier [SE]

1. Polreagenzpapier
2. Verbindungsleiter
3. Natriumchloridlösung
4. Stromversorgungsgerät (12 V — ; 40 V ~)
5. Glasplatte
6. Platte aus Aluminiumblech

Methodische Hinweise

1. Aus der Betrachtung der unterschiedlichen chemischen Wirkung an den Polen einer Spannungsquelle ist die Vorstellung von der Stromrichtung zu festigen.
2. Der Wechsel der Richtung des Stromes im Wechselstromkreis mit Kleinspannung ist einfach zu zeigen.
3. Es wird die Möglichkeit einer behelfsmäßigen Kurzzeitmessung durch die Netzfrequenz geboten.

Versuch

Ein Streifen Polreagenzpapier wird in einer konzentrierten Natriumchloridlösung angefeuchtet. Dann legt man ihn auf eine Blechunterlage. Das Blech verbindet man mit dem positiven Pol eines Stromversorgungsgerätes (12 V —). Das mit dem negativen Pol verbundene Verbindungskabel endet frei in einem Bananenstecker. Führt man den Stecker über das Papier, so erhält man einen roten Strich. Benutzt man als Unterlage eine Glasplatte und verbindet die beiden Pole mit zwei Bananensteckern, die man dicht nebeneinander hält und gemeinsam über das Papier führt, so erzeugt der negative Pol auf dem Papier einen roten Strich (Abb. 5.1.4./1a).

Sodann führt man den Versuch mit einer Wechselspannung von 40 V durch. Man bindet die freien Bananenstecker der Verbindungskabel dicht nebeneinander an einer Leiste fest. Diese führt man über das nach den obengenannten Angaben vorbereitete Papier hinweg, so daß die Bananenstecker das Papier gleichmäßig berühren. Es entstehen auf dem Papier zwei Reihen roter Punkte. Die Punkte beider Reihen sind so verschoben, daß jeweils ein Punkt der einen Reihe neben einer Lücke zwischen zwei Punkten der anderen Reihe liegt (Abb. 5.1.4./1b).
Noch überzeugender wirkt der Versuch, wenn man die Bananensteckerenden fest mit zwei kurzen Stücken blanken Kupferdrahtes umwickelt, deren freie Enden man auf eine Länge von etwa 2 cm begrenzt. Man biegt die Enden der Drähte so, daß sie in einer Entfernung von etwa 5 mm parallel laufen. Beim Bestreichen des angefeuchteten Papiers erscheinen die Punkte schärfer begrenzt und sind deutlicher zu erkennen.

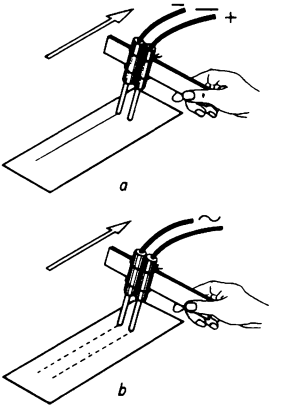


Abb. 5.1.4./1 Aufzeichnen einer Strichspur auf Polreagenzpapier durch zwei Bananenstecker
a) bei Gleichspannung,
b) bei Wechselspannung

Bemerkungen

1. Polreagenzpapier kann selbst hergestellt werden. Von etwa 0,5 g Phenolphthalein stellt man eine gesättigte Lösung in Alkohol her und verdünnt sie mit der 5fachen Menge Wasser, der man etwa 4 g Natriumchlorid je Liter zugesetzt hat. Mit dieser Lösung tränkt man Streifen von Filterpapier.
2. Die Konzentration der Salzlösung muß so eingestellt sein, daß die Stromstärke nicht den zulässigen Wert des Stromversorgungsgerätes übersteigt.
3. Zeichnet man die Punktspur mit einem Bananenstecker, indem man den anderen Pol der Wechselspannungsquelle an eine Blechplatte legt, und schaltet über Relaiskontakte die Spannung nur für die Dauer eines Kurzzeitvorganges ein, so ist die Zeit aus der Anzahl der Punkte zu ermitteln. Zeitabstand zweier Punkte 0,02 s.

5.1.5. Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie und umgekehrt — Modell eines Akkumulators [SE]

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Elektrodenhalter
3. 2 Kohleplatten oder Stifte
4. 2 Bleiplatten
5. Glasschale oder Becherglas
6. Kupfer(II)-sulfatlösung
7. verdünnte Schwefelsäure
8. Strommesser (500 mA; Nullpunktmittellage)
9. Glühlampe (2,3 V; 0,2 A)
10. Drehwiderstand (50 Ω; 25 W)

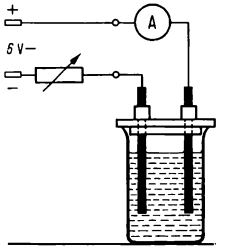


Abb. 5.1.5./1
Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energie bei der Elektrolys

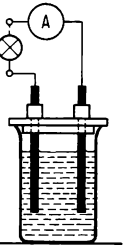


Abb. 5.1.5./2
Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie

Methodische Hinweise

1. Nach dem allgemeinen Modell des elektrischen Leitungsvorgangs ist jede Bewegung von Ladungsträgern mit einem Energietransport verbunden. Das soll hier für die Leitung in Flüssigkeiten nachgewiesen werden.
2. Mit den Versuchen soll die Umkehrbarkeit der Energieumwandlungen demonstriert werden.
3. Bei Verwendung von Bleiplatten und Schwefelsäure stellt die Versuchsanordnung das Modell eines Bleiakkumulators dar.

Versuch

In dem Versuchsaufbau (Abb. 5.1.5./1) werden entweder Kohleelektroden in einer leicht mit Schwefelsäure angesäuerten Kupfer(II)-sulfatlösung oder Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure eingesetzt. Der Vorwiderstand steht zunächst auf 50 Ω. Nach dem Einschalten wird er so weit verkleinert, daß eine Stromstärke von 0,5 A fließt. Man läßt den Versuch einige Minuten andauern und beobachtet die Vorgänge an den Elektroden.
An der negativen Kohleelektrode setzt sich ein Kupferüberzug ab, außerdem wird Wasserstoff frei. An der positiven Kohleelektrode entsteht Sauerstoff.
An der negativen Bleielektrode bildet sich Wasserstoff, während die positive sich mit einer Schicht von braunem Blei(IV)-oxid überzieht und hier allmählich Sauerstoff frei wird.
Dann werden Spannungsquelle und Vorwiderstand entfernt und der Stromkreis (Abb. 5.1.5./2) durch die Glühlampe geschlossen. Die Glühlampe leuchtet nur für kurze Zeit durch den Entladestrom auf. Der Strommesser zeigt eine Stromstärke in entgegengesetzter Richtung. Die dabei auftretenden chemischen Vorgänge sind durch Beobachtung der Elektroden nicht sofort zu erkennen.

5.1.6. Elektrolyse einer wäßrigen Bleiazetatlösung

1. Stromversorgungsgerät (4 V ... 20 V —)
2. Küvette
3. 2 Holtzsche Klemmen
4. Bleidraht (Mantel eines dünnen Bleikabels)
5. wäßrige Bleiazetatlösung
6. Kleinbildwerfer

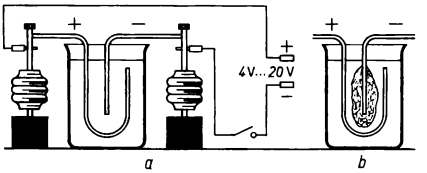


Abb. 5.1.6./1
Versuch zur Elektrolyse von Bleiazetat
a) Anordnung,
b) Ausscheidung

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Wiederholungen gut geeignet, weil er eine interessante Form der Metallabscheidung zeigt.

Versuchsanordnung

An zwei Holtzsche Klemmen werden gebogene Bleidrähte so befestigt, daß sie in eine Küvette hineinragen (Abb. 5.1.6./1). Die Küvette ist mit wäßriger Bleiazetatlösung gefüllt. Die beiden Elektroden werden über einen Hebelschalter mit einer Gleichspannungsquelle von 4 V ... 20 V verbunden, und zwar die U-förmige Elektrode mit dem positiven, die stabförmige Elektrode mit dem negativen Pol. Die Küvette wird zur besseren Beobachtung im Schattenwurf auf einer Projektionswand abgebildet.

Versuch

Nach Schließen des Stromkreises scheiden sich in baumartiger Verästelung Bleikristalle an der Katode ab (Bleibaum). Die Zunahme der Masse der Katode und auch die Abnahme der Masse der Anode kann man durch Wägen feststellen.

5.1.7. Untersuchung des Stromdurchganges durch eine Kupfer(II)-sulfatlösung mit Hilfe einer Waage

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Strommesser (500 mV —)
3. Drehwiderstand (25 Ω; 2 A)
4. empfindliche Balkenwaage mit einer langen und einer kurzen Waagschale
5. Tarierschrot
6. Becherglas (etwa 600 ml)
7. Kupfer(II)-sulfatlösung für Elektrolyse ($CuSO_4$ krist., Schwefelsäure, Äthanol, dest. Wasser)
8. Kupferblech (0,1 mm ... 0,3 mm dick)

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3., 6. bis 8., außerdem

9. behelfsmäßige Mohrsche Waagen Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) dickes Kupfer- oder Messing-Blech
   b) mehrere Stecknadeln
   c) 2 Spiegelmaßstäbe
   d) dicker Kupferdraht
   e) dünnes Glasrohr oder Trinkröhrchen

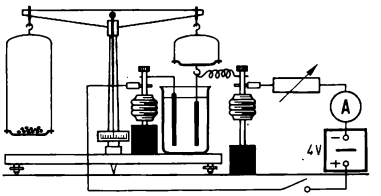


Abb. 5.1.7./1 Elektrolyse einer Kupfersulfat-Lösung. Nachweis der Massenveränderung durch eine Präzisionswaage

Methodischer Hinweis

Mit dem Versuch soll der Stofftransport bei einer Leitung in Flüssigkeiten qualitativ gezeigt werden. Eine quantitative Untersuchung kann nach V 5.1.10. erfolgen.

Herstellen einer Kupfer(II)-sulfatlösung

180 g kristallisiertes Kupfer(II)-sulfat werden in 500 ml destilliertem Wasser unter leichtem Erwärmen gelöst. Zur Herabsetzung der bei der Elektrolyse auftretenden Nebenreaktionen wird die erkaltete Lösung mit 40 ml konzentrierter Schwefelsäure und mit 60 ml Äthanol versetzt. Anschließend wird mit Wasser auf 1000 ml aufgefüllt.

Variante a: Verwendung einer Präzisionswaage

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 5.1.7./1. An die kurze Waagschale wird mit einem dünnen, blanken Kupferdraht ein 0,1 mm ... 0,3 mm dünnes Kupferblech (80 mm × 50 mm) als Katode gehängt. Besitzt die Waage Pfannen mit Achslagern, so muß die Stromzuführung über einen dünnen Kupferdraht erfolgen, der so biegsam sein muß, daß er das Spielen der Waage nicht behindert. Als Anode verwendet man ebenfalls ein Kupferblech, das nicht wie das Katodenblech völlig in die Flüssigkeit eintauchen muß.

Versuch

Nach dem Schließen des Stromkreises wird der Drehwiderstand so eingestellt, daß ein Strom von etwa 400 mA fließt. Das ergibt eine Stromdichte von etwa 1 mA · cm^{-2} an der Katode. Diese Stromdichte darf nicht überschritten werden, weil sonst an der Katode nicht nur Kupfer, sondern auch Wasserstoff abgeschieden wird. Der Stromkreis wird daraufhin wieder unterbrochen. Die Katode wird austariert. Schließt man abermals den Stromkreis, so tritt bereits nach einer Elektrolysedauer von 5 min die meßbare Zunahme der Masse der Katode ein.

Variante b: Verwenden einer behelfsmäßigen Mohrschen Waage

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau ist aus Abbildung 5.1.7./2 ersichtlich. Die behelfsmäßige Waage fertigt man aus einem 320 mm langen, etwa 25 mm breiten Streifen dünnen Kupferblechs an. Zum Erhöhen der Stabilität wird der Kupferstreifen nach

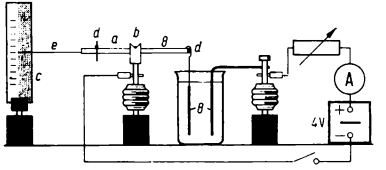


Abb. 5.1.7./2 Nachweis der Massenveränderung bei einer Elektrolyse durch eine behelfsmäßige Mohrsche Waage

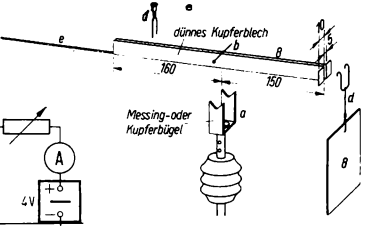


Abb. 5.1.7./3 Behelfsmäßige Mohrsche Waage

Abb. 5.1.7./3 U-förmig gebogen. An einem Ende wird der gebogene Streifen 1 cm tief eingeschnitten und rechtwinklig umgebogen, so daß eine Schneide entsteht. In der Mitte lötet man eine Stecknadel als Achse an. Als verlängerten Zeiger klebt man mit Alleskleber eine etwa 150 mm lange, aus einem dünnen Glasrohr gezogene feine (0,2 mm) Glaskapillare oder ein Trinkröhrchen aus Plast. Als Lager dient ein Bügel aus dickem Messingblech, der auf eine Holtzsche Klemme aufgeschraubt wird. Ein in einer Drehklemme mit einem Zylinderfuß aufgestellter Papp- oder Spiegelmeßstab dient als Skale. Die Katode wird ebenfalls aus Kupferblech gefertigt und mit einem gabelförmigen blanken Kupferdraht auf die Schneide der Waage gehängt. Das Austarieren erfolgt durch einen Drahtreiter.

Versuch

Beim Aufbau des Versuches nach Abbildung 5.1.7./2 erfolgt die Versuchsdurchführung in gleicher Weise wie beim Verwenden einer Waage. Man kann aber den Versuchsaufbau so durchführen, daß sowohl die Katode als auch die Anode von einer behelfsmäßigen Waage getragen werden (Abb. 5.1.7./4). Beide Waagen werden austariert. Dauert die Elektrolyse wenige Minuten, so kann bereits eine Zunahme der Masse der Katode und eine Abnahme der Masse der Anode festgestellt werden. Die Änderungen der Massen sind wegen der Sekundärvorgänge an der Anode ganz gleich.

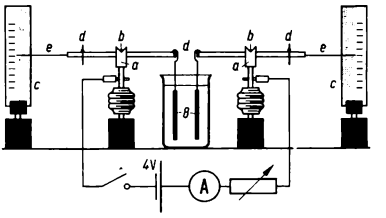


Abb. 5.1.7./4 Nachweis der Massenänderung bei einer Elektrolyse an der Katode und an der Anode

5.1.8. Ableitung des 1. Faradayschen Gesetzes

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. 2 Knallgascoulombmeter oder 2 behelfsmäßige Knallgascoulombmeter Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) 2 große Reagenzgläser (20 mm × 180 mm)
   b) 4 dünne Kohlestifte
   c) 2 Korken zu den Reagenzgläsern
   d) 2 Kapillarröhren
   e) 2 Meßzylinder (50 ml)
   f) 2 Korken zu den Meßzylindern
3. Schwefelsäure (10% .. 12%)
4. 2 Strommesser (0,5 A —)
5. 2 Gleitwiderstände (110 Ω)
6. Stoppuhr oder Uhr mit Sekundenzeiger

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3., 5. (nur 1 mal), 6., außerdem

7. ein drittes Knallgascoulombmeter

Methodischer Hinweis

Mit diesem Versuch kann man für die Schüler gut sichtbar das 1. Faradaysche Gesetz qualitativ herleiten, weil die abgeschiedenen Gasmengen und die Strommesser nebeneinander zu beobachten sind.

Herstellung eines behelfsmäßigen Knallgascoulombmeters

Die Herstellung der behelfsmäßigen Knallgascoulombmeter ist aus Abbildung 5.1.8./1 ersichtlich. Man verwendet dazu große Reagenzgläser. Als Elektroden eignen sich dünne Kohlestifte; sie werden gemeinsam mit einem dünnen, an einem Ende zu einer kurzen Kapillare ausgezogenen Glasrohr durch einen Kork geführt, der in einem großen Reagenzglas steckt. Mit einem zweiten, gekerbten Korken wird das Coulombmeter auf den Meßzylinder gesetzt. Das Reagenzglas wird bis zum Rand mit 10 ... 20%iger Schwefelsäure gefüllt, dann wird der Kork mit den Elektroden und dem Glasrohr aufgesetzt und so weit eingedrückt, bis überschüssige Säure aus der Kapillare tropft.

Variante a

Je ein Coulombmeter, ein Strommesser und ein Gleitwiderstand werden in Reihe geschaltet und bilden einen Zweig der Gesamtschaltung. Sie wird durch eine Spannungsquelle und einen einpoligen Schalter ergänzt (Abb. 5.1.8./2). Nach dem Einschalten des Stromes werden durch Verstellen der beiden Widerstände die Zweigstromstärken im Verhältnis 1 :2 eingestellt, zum Beispiel 100 mA und 200 mA. Dann wird der Strom abgeschaltet. Zu Beginn der Messung werden die Volumina an den Coulombmeter abgelesen. Gleichzeitig mit dem Strom wird eine Stoppuhr eingeschaltet und nach Ablauf von 1 min oder 2 min wieder ausgeschaltet. Die Volumina werden wieder abgelesen und die abgeschiedenen Knallgasmengen ermittelt. Der Vorgang wiederholt sich noch drei- bis viermal. Die Werte können nach dem Muster der beigefügten Tabelle zusammengefaßt werden.

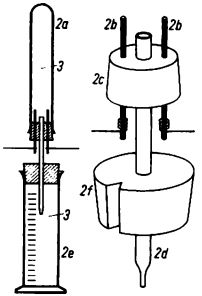


Abb. 5.1.8./1
Behelfsmäßiges Knallgascoulombmeter

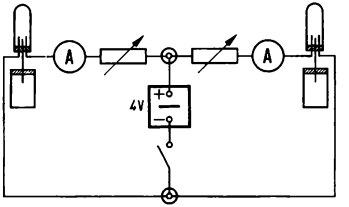


Abb. 5.1.8./2
Ableitung des 1. Faradayschen Gesetzes

Tabellenkopf

Zeit t in s	Stromstärke I in A	Ladung $I \cdot t$ in As	Gasvolumen V in ml	$\frac{v}{I \cdot t}$ in $\frac{\text{ml}}{\text{As}}$

Die Auswertung ergibt, daß das Volumen des abgeschiedenen Knallgases der Ladung proportional ist, denn $\frac{V}{I \cdot t} \approx$ konst.

Weil in den Coulombmetern gleiche Temperatur und gleicher Druck herrschen, ist das Volumen des Gases proportional seiner Stoffmenge n.
So ist festzustellen: Die abgeschiedenen Stoffmengen sind der Ladung proportional,

$$n \sim I \cdot t\,.$$

Variante b

Zwei Coulombmeter werden parallel geschaltet, das dritte dazu in Reihe. Der Stromkreis wird durch einen Schiebewiderstand und eine Spannungsquelle sowie einen einpoligen Schalter ergänzt (Abb. 5.1.8./3).

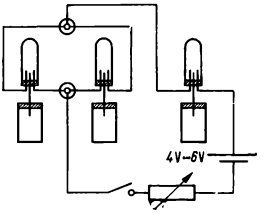


Abb. 5.1.8./3 Ableitung des 1. Faradayschen Gesetzes ohne Messen der Stromstärken

Die Versuchsdurchführung erfolgt wie bei Variante a, das Einstellen der Stromstärke entfällt. In der Auswertung findet man, daß die Summe der entstandenen Knallgasmengen der parallelgeschalteten Coulombmeter gleich der entwickelten Knallgasmenge im dritten Coulombmeter ist, woraus sich die direkte Abhängigkeit der abgeschiedenen Mengen von der Stromstärke ergibt. Die Abhängigkeit von der Zeit läßt sich wie bei Variante a ermitteln.

Bemerkung

Eine quantitative Bestimmung der Stoffmengen kann hier nicht erfolgen, weil das aufgefangene Gas nur einen Teil des Sauerstoffs enthält, da dieser sich stark in der Elektrolytlösung löst.

5.1.9. Ermittlung der Faradayschen Konstanten

1. Stromversorgungsgerät (4 V —)
2. Wasserzersetzungsapparat nach Hofmann (Platin- oder Kohle-Elektroden)
3. Strommesser (500 mA —)
4. Drehwiderstand (25 Ω; 2 A)
5. Schwefelsäure (10% ... 30%)
6. Stoppuhr
7. Barometer
8. Thermometer
9. Aräometer
10. Vertikalmeßstab mit zwei Zeigern

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ergänzt V 1.5.8. durch eine quantitative Untersuchung.

Versuch

Die Versuchsanordnung ergibt sich aus Abbildung 5.1.9./1. Nach Schließen des Stromkreises stellt man durch den Widerstand oder auch durch Ändern der Spannung eine Stromstärke von 200 mA ... 300 mA ein. Der Stromkreis wird daraufhin wieder unterbrochen. Das bereits in den Meßröhren entstandene Gas läßt man wieder ausströmen. Man muß abwarten, bis alle Gasblasen zur Oberfläche gestiegen sind, was man durch leichtes Klopfen an den Röhren etwas beschleunigen kann.
Man schließt den Stromkreis von neuem und setzt gleichzeitig eine Stoppuhr in Gang. Hat sich genügend viel Wasserstoff (Volumen etwa 20 ml ... 30 ml) gebildet, so kann der Versuch abgebrochen werden. Während der Dauer der Elektrolyse wird die Stromstärke nach jeweils 20 s abgelesen.
Sind alle Wasserstoffbläschen an die Oberfläche gestiegen und ist die Schaumbildung zurückgegangen, so liest man das entwickelte Wasserstoffvolumen V ab. An einem Vertikalmeßstab liest man die Überdruckhöhe Δh des Elektrolyten zwischen dem Meßrohr und dem Vorratsgefäß ab (Abb. 5.1.9./2). Zum Bestimmen des Überdruckes Δp braucht man noch die Wichte γ der Elektrolytlösung, die man mit Hilfe eines geeigneten Aräometers feststellt. Außerdem ermittelt man noch die Temperatur t der Elektrolytlösung und den Barometerstand b.

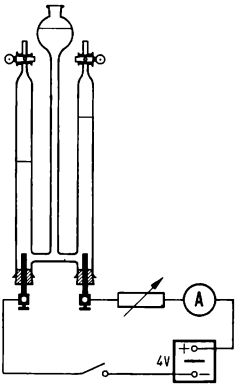


Abb. 5.1.9./1
Bestimmung der abgeschiedenen Stoffmenge von Wasserstoff

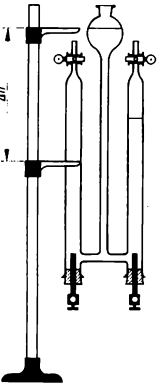


Abb. 5.1.9./2 Ermittlung der Überdruckhöhe im Hofmannschen Wasserzersetzungsgerät.
Das Stativ des Wasserzersetzungsgerätes ist in beiden Abbildungen fortgelassen.

Auswertung

Das gemessene Wasserstoffvolumen wird auf den Normzustand reduziert. Nach der allgemeinen Gasgleichung ist

$$V_0 = \frac{V \cdot p \cdot T_0}{T \cdot p_0} \qquad \text{mit } p = b + \Delta p\,,$$

$$\text{und } \Delta p = h \cdot \frac{\gamma_{\text{Elektrolyt}}}{\gamma_{\text{Hg}}}\,.$$

Es sind $p_0 = 1{,}013$ bar,
$T_0 = 273$ K,

$$T = \left(273 + \frac{t}{\text{K}}\right)\text{K}.$$

Ermittlung der Stoffmenge des Wasserstoffs n:

Es ist $n = \dfrac{V_0}{V_m}$.

Hierin ist

$$V_m = 22{,}41 \cdot \text{mol}^{-1}\,.$$

Die Masse des abgeschiedenen Wasserstoffs ergibt sich als Produkt der Stoffmenge n mit der molaren Masse des Wasserstoffs $M_H = 2{,}0156\ \dfrac{\text{g}}{\text{mol}}$.

$$m = n \cdot M_H\,.$$

Die Faradaysche Konstante findet man, weil Wasserstoff-Ionen einwertig sind, als Quotienten aus der Ladung und der abgeschiedenen Stoffmenge des Wasserstoffs,

$$F = \frac{I \cdot t}{n}.$$

Bemerkungen

1. Die an der Anode abgeschiedene Sauerstoffmenge kann nicht bestimmt werden, da sich Sauerstoff im Elektrolyten merklich löst.
2. Gute Ergebnisse erziehlt man auch bei folgenden Versuchsbedingungen:
   a) Wasserstoff an Bleikatode, Elektrolytlösung: Akkumulatorsäure
   b) Sauerstoff an Eisenanode, Elektrolytlösung: reine Basenlösung
   c) Wasserstoff an Platinkatode, Elektrolytlösung: reine Basenlösung
3. Bei der genauen Bestimmung der Stoffmenge ist noch der Dampfdruck des Elektrolyten zu berücksichtigen
4. Die Ableitung des 1. Faradayschen Gesetzes ist auch mit diesem Versuch möglich.

5.1.10. Bestimmung der Stoffmenge von Kupfer und Ermittlung der Faradayschen Konstanten

1. Stromversorgungsgerät (4 V ... 6 V —)
2. Strommesser (5 A —)
3. behelfsmäßiges Kupfercoulombmeter Ⓢ, dazu erforderliches Material:
   a) Becherglas (niedrige Form; 1000 ml)
   b) 4 Kupferelektroden nach gegebenen Abmessungen (2 Anoden, 1 Katode, 1 Hilfskatode)
   c) 2 paraffinierte Vierkant-Holzklötzchen, in der Mitte gekerbt (20 mm · 20 mm · 80 mm)
   d) 2 schmale Kupferblechstreifen (120 mm · 10 mm)
   e) 4 Holzschrauben
   f) 3 Telefonbuchsen
4. Kupfer(II)-sulfatlösung für Elektrolyse nach V 5.1.7.
5. Drehwiderstand (25 Ω; 2 A)
6. empfindliche Balkenwaage
7. Wägesatz (10 mg ... 500 mg)
8. Stoppuhr

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.1.7.!

Herstellung des Kupfercoulombmeters

Das Kupfercoulombmeter besteht aus leitend verbundenen Kupferanoden, deren Abmessungen aus Abb. 5.1.10./1a zu entnehmen sind. Sie werden an die Stirnseiten zweier paraffinierter Holzklötzchen geschraubt, durch die sie im Abstand von 80 mm gehalten werden (Abb. 5.1.10./1b). Durch zwei schmale Kupferbänder, die an den Längsseiten der Holzklötze verlaufen und an den Stirnseiten mit unter die Elektroden geklemmt werden, wird zwischen den Anoden eine leitende Verbindung hergestellt. An die eine Anode und an jede Katode wird eine Telefonbuchse

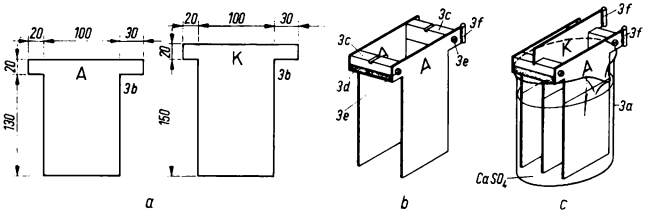


Abb. 5.1.10./1 Selbstherstellung des Kupfercoulombmeters.
a) Abmessungen der Elektroden,
b) Zusammenstellung der Anoden,
c) zusammengesetztes Coulombmeter

angelötet. In die Kerben der Holzklötze wird zum Einstellen der Stromstärke die Hilfskatode und zum Bestimmen der Stoffmenge die Hauptkatode eingehängt. Der Abstand der Elektroden voneinander beträgt dann 40 mm. Die Elektrodenanordnung wird in ein Becherglas von breiter Form mit einem Inhalt von 1000 ml eingesetzt (Abb. 5.1.10./1c). In dieses füllt man die Elektrolytlösung. Die Elektroden sollen nach dem Einfüllen etwa 10 cm tief eintauchen.

Versuch

Der Aufbau der Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 5.1.10./2. Die sauber geschmirgelte Hilfskatode wird in die Elektrolytlösung eingesetzt. Der Stromkreis wird geschlossen und die Stromstärke mit Hilfe des Widerstandes so eingestellt, daß die Stromdichte an der Katodenfläche etwa 0,01 A · cm^{-2} beträgt. Bei den Abmessungen der Katode nach Abb. 5.1.10./1a und bei einer Eintauchtiefe von 10 cm beträgt die Katodenfläche auf beiden Seiten 200 cm^2. Folglich kann die Stromstärke auf etwa 2 A eingestellt werden.
Man hält die Elektrolyse mit der Hilfskatode zur Abscheidung etwa vorhandener Kupfer(I)-Ionen wenige Minuten aufrecht. Die ebenfalls sauber geschmirgelte Hauptkatode wird mehrmals mit destilliertem Wasser und mit Äthanol gespült und anschließend getrocknet (Anzünden des Äthanols!). Sie wird genau gewogen, wobei sie nicht mit den Fingern angefaßt werden darf.
Bei unterbrochenem Stromkreis wird die Hauptkatode an Stelle der Hilfskatode in das Coulombmeter eingesetzt.
Gleichzeitig mit dem erneuten Schließen des Stromkreises wird eine Stoppuhr in Gang gesetzt. Zum genauen Bestimmen der abgeschiedenen Stoffmenge des Kupfers ist ein Kupferniederschlag von mindestens 0,5 g erforderlich. Die Elektrolyse muß demnach unter den gegebenen Bedingungen wenigstens 15 min aufrechterhalten

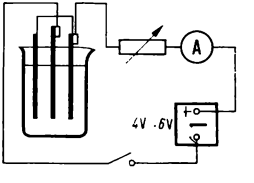


Abb. 5.1.10./2 Bestimmung der abgeschiedenen Stoffmenge vom Kupfer

werden; noch besser ist eine Elektrolysedauer von 30 min ... 45 min. Während der Elektrolyse wird durch Feineinstellung des Widerstandes die eingangs mit der Hilfskatode eingestellte Stromstärke konstant gehalten.
Nach Beendigung der Elektrolyse wird die Hauptkatode mehrmals mit destilliertem Wasser und anschließend mehrmals mit Äthanol gewaschen. Nach dem Trocknen stellt man die Masse der Katode und, unter Berücksichtigung der Erstwägung, die Massenzunahme Δm der Katode fest.

Auswertung

Die abgeschiedene Stoffmenge n des Kupfers wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$n = \frac{\Delta m}{M_{Cu}}.$$

Für die Faradaysche Konstante F ergibt sich die Gleichung

$$F = \frac{I \cdot t}{n \cdot z}.$$

Da der Elektrolyt eine Kupfer(II)-Verbindung ist, muß die Wertigkeit $z = 2$ eingesetzt werden.

Bemerkung

Man kann diesen Versuch auch dazu benutzen, das 1. Faradaysche Gesetz unter Anwendung verschiedener Stromstärken und Zeiten abzuleiten. Die Masse und damit die Stoffmenge des abgeschiedenen Kupfers sind proportional der Ladung.

5.1.11. Ableitung des 2. Faradayschen Gesetzes

1. Stromversorgungsgerät (4 V ... 6 V —)
2. Strommesser (500 mA —)
3. Knallgascoulombmeter oder behelfsmäßiges Knallgascoulombmeter nach V 5.1.5. ⑧
4. 2 behelfsmäßige Mohrsche Waagen nach V 5.1.7. ⑧
5. 2 kleine, leichte Waagschalen
6. 2 Kartonstreifen mit Skalen
7. Kupfer(II)-sulfatlösung für Elektrolyse nach V 5.1.7.
8. neutrale Silbernitratlösung
9. Kupfer- und Silberbleche
10. 2 Bechergläser (etwa 600 ml)
11. Schiebewiderstand (18 Ω)
12. Stoppuhr
13. Wägesatz (10 mg ... 500 mg)
14. Barometer

Methodischer Hinweis

Obgleich man das 2. Faradaysche Gesetz auch aus Einzelversuchen nach V 5.1.7. bis 5.1.10. herleiten kann, ist es methodisch günstiger, das Gesetz aus der Bewegung gleich großer Ladungen durch verschiedene Stoffe in einem Stromkreis zu finden.

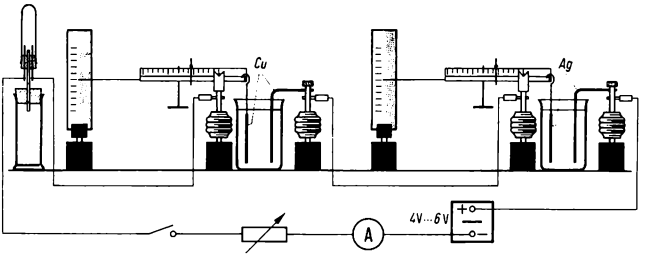


Abb. 5.1.11./1 Ableitung des 2. Faradayschen Gesetzes

Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 5.1.11./1 aus einem Wasserstoff-, einem Kupfer- und einem Silbercoulombmeter in Reihenschaltung zusammengestellt. Nach Schließen des Stromkreises wird durch den Schiebewiderstand eine Stromstärke von 200 mA ... 300 mA eingestellt. Daraufhin wird der Stromkreis wieder unterbrochen. Nunmehr erfolgt die Ablesung des Knallgascoulombmeters und die Nulleinstellung der Waagebalken durch Reiter. In die Waagebalken klebt man Kartonstreifen mit Skalen (Abb. 5.1.11./2).
Die kleinen, leichten Waagschalen sind beim Silbercoulombmeter in der Entfernung

$$l \cdot \left(1 - \frac{\varrho_{AgNO_3}}{\varrho_{Ag}}\right),$$

beim Kupfercoulombmeter in der Entfernung

$$l \cdot \left(1 - \frac{\varrho_{AgNO_3}}{\varrho_{Cu}}\right)$$

von der Drehachse angebracht, wobei l die Entfernung von der Drehachse zur Schneide bedeutet. Die Begründung dafür ist der Auswertung zu entnehmen. Der Stromkreis wird erneut geschlossen und gleichzeitig eine Stoppuhr in Gang gesetzt. Man hält die Elektrolyse etwa 500 s lang aufrecht und liest nach jeweils 20 s die Stromstärke ab.
Nach Beendigung der Elektrolyse werden die Kupfer(II)-sulfat- und die Silbernitratlösung vorsichtig umgerührt. Durch Auflegen von Wägestücken auf die kleinen Waagschalen stellt man wieder die Nulleinstellung der Waagebalken her und liest am Knallgascoulombmeter ab, wenn keine Gasblasen mehr aufsteigen.

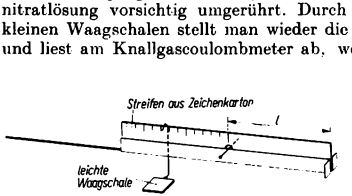


Abb. 5.1.11./2
Ergänzung zu der in V 5.1.7. beschriebenen Balkenwaage

Auswertung

Das abgeschiedene Knallgasvolumen wird auf den physikalischen Normzustand reduziert. Man muß dazu die Temperatur des Gases und den Barometerstand feststellen. Für genaue Messungen ist noch der Dampfdruck der Schwefelsäure zu berücksichtigen (vgl. V 5.1.9.).

Die Ermittlung der Massen des abgeschiedenen Silbers und Kupfers geschieht folgendermaßen: Der Massenzunahme Δm der Katode entspricht eine Volumenzunahme $\Delta V = \frac{\Delta m}{\varrho_{\text{Metall}}}$, wodurch der Auftrieb der Katode etwas erhöht wird.

Die aufgelegten Wägestücke haben die Masse Δm. Die Masse $\Delta m'$ des Kupfers und die des Silbers ermittelt man unter Berücksichtigung des Auftriebs, den die Niederschlagsmengen im Elektrolyten erfahren. Es ist

$$\Delta m' = \Delta m - V \cdot \varrho_{\text{Elektrolyt}} = \Delta m - \Delta m \cdot \frac{\varrho_{\text{Elektrolyt}}}{\varrho_{\text{Metall}}}$$

$$\Delta m' = \Delta m \cdot \left(1 - \frac{\varrho_{\text{Elektrolyt}}}{\varrho_{\text{Metall}}}\right).$$

Mithin ist

$$\Delta m = \frac{\Delta m'}{1 - \frac{\varrho_{\text{Elektrolyt}}}{\varrho_{\text{Metall}}}}.$$

Verkürzt man den Hebelarm des Waagebalkens, an dem die leichte Waagschale hängt, um den Faktor $\left(1 - \frac{\varrho_{\text{Elektrolyt}}}{\varrho_{\text{Metall}}}\right)$, so gibt die Masse der aufgelegten Wägestücke die Masse des abgeschiedenen Metalls an. Man muß dazu mit Hilfe eines Aräometers die Dichte der Elektrolytlösung bestimmen; die Dichte des Metalls entnimmt man einer Tabelle.

Nach dem 2. Faradayschen Gesetz stehen die abgeschiedenen Massen verschiedener Stoffe im gleichen Verhältnis wie die jeweiligen Quotienten aus der molaren Masse M und der Wertigkeit z. Bei einer exakten Versuchsdurchführung muß sich also ergeben:

$$\Delta m_{\text{H}} : \Delta m_{\text{Cu}} : \Delta m_{\text{Ag}} = \frac{M_{\text{H}}}{1} : \frac{M_{\text{Cu}}}{2} : \frac{M_{\text{Ag}}}{1}.$$

Die Faradaysche Konstante F kann man mit Hilfe der Ladung $Q = I \cdot t$ aus jeder der drei Stoffmengen der abgeschiedenen Stoffe berechnen:

$$F = \frac{I \cdot t \cdot M}{m \cdot z}.$$

Bei Abweichungen der Versuchsergebnisse vom 2. Faradayschen Gesetz kann man durch diese Berechnung von F prüfen, wie weit die Messungen ungenau waren ($F = 9{,}6494 \cdot 10^4\ \text{As} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Bemerkungen

1. An Stelle der Silberbleche können auch stark versilberte Kupferbleche verwendet werden.
2. Das Knallgascoulombmeter kann durch ein Wasserzersetzungsgerät nach Hofmann (V 5.1.9.) ersetzt werden.

5.1.12. Bestätigung des 2. Faradayschen Gesetzes

1. Stromversorgungsgerät (8 V —)
2. Strommesser (500 mA —)
3. Drehwiderstand (25 Ω; 2 A)
4. 2 behelfsmäßige Mohrsche Waagen als Kupfercoulombmeter nach V 5.1.7. ⑤
5. 2 Bechergläser (600 ml)
6. 4 Kupferelektroden
7. Kupfer(II)-sulfatlösung für Elektrolyse nach V 5.1.7.
8. Kupfer(II)-chloridlösung (10%)
9. Kupferspäne
10. konzentrierte Salzsäure
11. wäßrige Natriumchloridlösung (1,5%)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.1.11.!

Vorbemerkung

Da gleiche Ladungen aus verschiedenen Elektrolytlösungen verschiedene Stoffmengen ausscheiden, müssen für Elemente, die mit verschiedener Wertigkeit auftreten, auch verschiedene Stoffmengen abgeschieden werden.

Herstellen der Kupfer(I)-chloridlösung

Etwa 100 ml einer 10prozentigen Kupfer(II)-chloridlösung werden mit einem Überschuß von Kupferspänen nach Zugabe von einigen Tropfen Salzsäure durch Erwärmen reduziert (Verschwinden der Grünfärbung) und dann in etwa 300 ml bis 400 ml einer 1,5prozentigen Natriumchloridlösung gegossen. Die Lösung ist kurz vor dem Durchführen des Versuches anzusetzen, da mit der Zeit durch den Luftsauerstoff Kupfer(I)-chlorid zu Kupfer(II)-chlorid oxydiert wird. Man erkennt dies am Wiederauftreten der Grünfärbung.

Versuchsanordnung

Der Aufbau des Versuches erfolgt nach Abbildung 5.1.12./1. Die beiden als Coulombmeter dienenden Mohrschen Waagen werden in Reihe mit einem Drehwider-

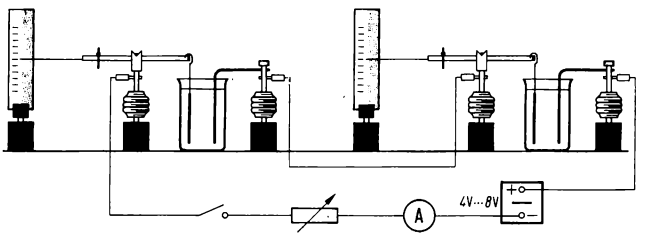


Abb. 5.1.12./1 Bestätigung des 2. Faradayschen Gesetzes

stand, dem Strommesser (500 mA) und einem Schalter an eine Gleichspannungsquelle mit 5 V bis 8 V angeschlossen. In dem einen Becherglas befindet sich eine nach V 5.1.7. bereitgestellte Kupfer(II)-sulfatlösung für Elektrolyse, im anderen die nach oben angegebener Vorschrift angesetzte Kupfer(I)-chloridlösung.

Versuch

Nach dem Schließen des Stromkreises wird durch den Drehwiderstand die Stromstärke auf 200 mA eingestellt. Der Stromkreis wird unterbrochen, die Balkenwaagen werden durch Verschieben der Reiter in ihre Nullstellung gebracht. Nach erneutem Schließen des Stromkreises elektrolysiert man etwa 5 min ... 10 min. Während und nach der Elektrolyse zeigen die beiden behelfsmäßigen Coulombmeter verschiedene Ausschläge. Man kann erkennen, daß aus der Kupfer(I)-chloridlösung die doppelte Stoffmenge wie aus der Kupfer(II)-sulfatlösung abgeschieden wurde. Damit ist das 2. Faradaysche Gesetz bestätigt.

Bemerkung

Man erhält nicht genau das erwartete Verhältnis der Massen von 1:2, da durch Oxydation schon während der Elektrolyse nicht nur Kupfer(I)-Ionen, sondern auch schon einige Kupfer(II)-Ionen aus der Kupfer(I)-chloridlösung abgeschieden werden. Die Grünfärbung der Elektrolytlösung deutet darauf hin.

5.2. Leitungsvorgänge in Gasen

5.2.1. Unselbständige Entladung durch Ladungsträger im elektrischen Feld

Zu Versuch 1

1. PVC-Stab mit Wollappen oder Bandgenerator oder Influenzmaschine
2. Elektroskop oder Braunsches Elektrometer
3. 2 Kondensatorplatten
4. 4 Holtzsche Klemmen
5. Stromversorgungsgerät (6 V —)
6. Heizwendel

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem
7. Kerze

Zu Versuch 3

Geräte 1. bis 4., außerdem
8. Bogenlampe mit Vorwiderstand

Zu Versuch 4

Geräte 1. bis 4., außerdem
9. Stoppuhr
10. radioaktives Präparat (Uranpechblende oder dgl.)

Zu Versuch 5

Geräte 1. bis 4., außerdem
11. Pipette mit Gummigebläse
12. Schwefel-Mennige-Pulver

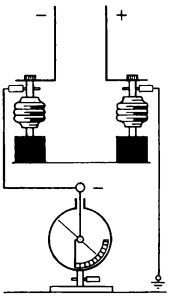


Abb. 5.2.1./1
Versuchsaufbau zur Demonstration einer unselbständigen Entladung

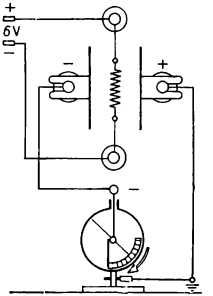


Abb. 5.2.1./2
Heizwendel zwischen den Kondensatorplatten (Draufsicht)

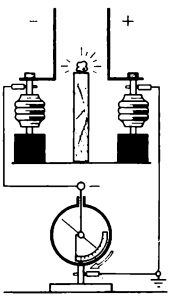


Abb. 5.2.1./3
Entladung durch ein radioaktives Präparat

Methodische Hinweise

1. Es soll deutlich werden, daß zur Leitung in einem Gas Ladungsträger erzeugt werden müssen.
2. Als Vorversuch kann man die Entladung eines Kondensators durch eine leichte Pendelkugel vorführen Pendelkugel und Staubteilchen können als Modelle der unsichtbaren Ionen in den Versuchen 1 bis 5 betrachtet werden.

Versuchsaufbau

Zur Demonstration der verschiedenen Formen der unselbständigen Entladung werden zwei Kondensatorplatten auf Holtzsche Klemmen im Abstand von etwa 10 cm aufgestellt. Man verbindet sie mit einem Elektroskop, dessen Gehäuse geerdet wird (Abb. 5.2.1./1).
Die nicht geerdete Kondensatorplatte wird mit dem geriebenen PVC-Stab negativ geladen. Durch Influenz lädt sich die andere Platte positiv auf. Das Elektroskop zeigt die bestehende Spannung an.

Versuch 1: Ionisation der Luft durch eine Heizwendel

Zwischen zwei Holtzschen Klemmen wird die Heizwendel ins elektrische Feld des Kondensators gebracht (Abb. 5.2.1./2). Nach dem Anlegen einer Spannung von etwa 6 V an die Heizwendel beginnt diese zu glühen. Dabei geht der Zeiger des Elektroskops allmählich zurück und zeigt so die Entladung an.

Versuch 2: Ionisation der Luft durch eine Flamme

Hält man eine brennende Kerze so unter die Kondensatorplatten, daß die Flammengase zwischen ihnen aufsteigen, so wird der Kondensator allmählich entladen.

Versuch 3: Ionisation der Luft durch UV-Strahlung einer Bogenlampe

Der Raum zwischen den Kondensatorplatten wird mit dem Licht einer kräftigen Bogenlampe bestrahlt. Der Ausschlag des Elektroskops geht allmählich zurück.

Versuch 4: Ionisation durch die Strahlung eines radioaktiven Präparates

Zwischen die Kondensatorplatten wird ein Holzklotz gestellt. Man beobachtet das Zurückgehen des Zeigerausschlages am Elektroskop und stoppt die Zeit für den Durchgang zwischen zwei Skalenpunkten. Man legt das radioaktive Präparat auf den Holzklotz und wiederholt die Messung nach erneutem Aufladen des Kondensators (Abb. 5.2.1./3). Die Entladung erfolgt wesentlich schneller.

Versuch 5: Entladung durch elektrisch geladene Staubteilchen

Man rückt die Kondensatorplatten auf 3 cm ... 4 cm zusammen und bläst mit einem Gummiballgebläse ein Gemenge von Schwefel- und Mennigepulver zwischen die Platten. Weil diese entgegengesetzt geladen sind, trennt sich Schwefel und Mennige voneinander und schlagen sich auf getrennten Platten nieder. Es erfolgt dabei eine Entladung.

Netzspannung

5.2.2. Selbständige Entladung bei normalem Luftdruck

Hochspannung

Zu Versuch 1

1. Bandgenerator oder Influenzmaschine

Zu Versuch 2

Gerät 1., außerdem
2. Steckspitze
3. Holtzsche Klemme
4. Kerze
5. elektrisches Windrädchen (8)

Zu Versuch 3

Gerät 1.

Zu Versuch 4

6. Bogenlampe mit Vorwiderstand
7. Sammellinse im Abblendrahmen ($f = 100$ mm)
8. lichtundurchlässiger Schirm (Papp- oder Blechtafel)

Methodischer Hinweis

Diese Versuche zeigen, unter welchen Bedingungen durch das elektrische Feld selbst die für die Leitung notwendigen freibeweglichen Ladungsträger entstehen. In V 5.2.3. werden die Versuche für verminderten Gasdruck fortgesetzt.

Versuch 1: Koronaentladung

Im gut verdunkelten Raum betätigt man den Bandgenerator oder die Influenzmaschine, nachdem sich die Augen an die Dunkelheit gewöhnt haben. Dabei beobachtet man auf dem Kondensator und auf dem Band des Generators oder auf den Kugeln der Influenzmaschine schwache Leuchterscheinungen. Die Entladungsstrecke muß dabei so groß sein, daß keine Funkenentladung auftritt.

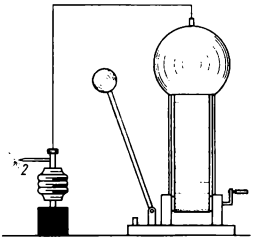


Abb. 5.2.2./1
Versuchsanordnung zur Demonstration der Spitzenentladung

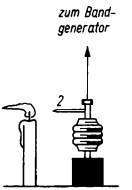


Abb. 5.2.2./2
Elektrischer Wind

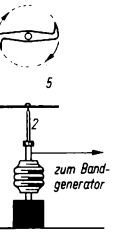


Abb. 5.2.2./3
Elektrisches Windrädchen

Versuch 2: Spitzenentladung

Eine Steckspitze wird in die seitliche Buchse einer Holtzschen Klemme gesteckt und mit dem Konduktor des Bandgenerators oder einem Pol der Influenzmaschine verbunden (Abb. 5.2.2./1). Man beobachtet die Leuchterscheinung. An der Spitze zeigt sich ein schwaches Lichtbüschel (Elmsfeuer). Vor die Steckspitze wird eine Kerzenflamme gestellt. Beim Einsetzen der Spitzenentladung wird die Flamme zur Seite geblasen (Abb. 5.2.2./2).
Die Steckspitze wird in die obere Buchse der Holtzschen Klemme gesteckt und dient als Träger für das elektrische Windrädchen (Abb. 5.2.2./3). Durch die Spitzenentladung treten Rückstoßwirkungen auf, die das Rädchen in Drehung versetzen. Im Dunkeln erkennt man einen bläulich leuchtenden Kreis. Das Windrädchen kann man aus dünnem Blech selbst herstellen. Als Lagerung dient ein Druckknopf.

Versuch 3: Funkenentladung

Der Versuch wird, wie in Versuch 1 beschrieben, durchgeführt, jedoch wird die Entladungsstrecke so weit verkürzt, daß eine Funkenentladung auftritt.

Versuch 4: Bogenentladung

Die Bogenlampe wird mittels eines kurzen Stativstabes und einer Kreuzmuffe an einem Stativ befestigt. Sie wird über einen Widerstand an eine Gleich- oder Wechselspannungsquelle angeschlossen. Zur Projektion des Lichtbogens klemmt man den Abblendrahmen einer Sammellinse an ein zweites Stativ. Ein Papp- oder Blechschirm schützt die Augen der Schüler vor dem grellen Bogenlicht und dient zum Vermeiden störenden Streulichtes.
Zunächst stellt man den Blendschirm vor die Lichtaustrittsöffnung der Bogenlampe, öffnet das seitliche Beobachtungsfenster und projiziert mit Hilfe der Sammellinse den Lichtbogen auf die Wand. In der Projektion ist das Bild des Lichtbogens, von der Seite her gesehen, zu erkennen. Allerdings steht es auf dem Kopf. Danach projiziert man den Lichtbogen durch die Lichtaustrittsöffnung. Nun sieht man den Leuchtkrater der horizontal liegenden Kohle von vorn. Wenn die Lampe mit Gleichstrom gespeist wird, liegt der positive Pol an dieser Kohle.

Bemerkungen

1. Die Koronaentladung, die Spitzenentladung und besonders die Funkenentladung kann man auch mit dem Funkeninduktor demonstrieren.
2. Die Bogenentladung kann behelfsmäßig auch mit Hilfe von Bleistiftminen oder Kohlestäben aus Flachbatterien bei einer Spannung von 20 V demonstriert werden.

5.2.3. Selbständige Leitung in Gasentladungsröhren bei niedrigem Druck

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Funkeninduktior
3. Vakuumpumpe
4. Gasentladungsrohr zum Aufsetzen auf die Vakuumpumpe
5. Ramsayfett

Zu Variante b

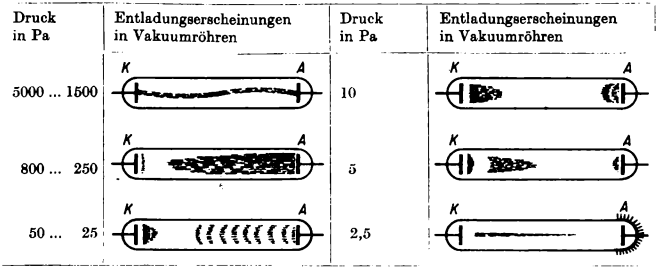
Geräte 1. und 2., außerdem
6. Vakuumskale

Methodische Hinweise

1. Es soll im wesentlichen die Erkenntnis vermittelt werden, daß durch die größere mittlere freie Weglänge der Ionen bei vermindertem Druck kleinere elektrische Feldstärken für die Bereitstellung der Ladungsträger im Glas ausreichen.
2. Das Vakuum soll nur bis auf etwa 50 Pa gebracht werden, weil bei kleinerem Druck eine harte Röntgenstrahlung auftritt.

Variant a: Verwendung eines Gasentladungsrohres auf der Vakuumpumpe

Der Versuch wird in einem gut verdunkelten Raum ausgeführt. Man fettet den Saugstutzen der Vakuumpumpe leicht mit Ramsayfett ein und setzt das Entladungsrohr auf. Durch Drehen des Rohres wird das Fett gleichmäßig verteilt, so daß die Verbindung luftdicht ist. Dabei ist jeder Druck zu vermeiden, weil sonst der gläserne Rohransatz leicht zerspringt. Nach dem Anschluß der Elektroden an den Funkeninduktor wird die Luft aus dem Rohr gepumpt. Während dieses Vorganges beobachtet man der Reihe nach den verschiedenen Drücken entsprechende Leuchterscheinungen.



Variante b: Verwendung einer Vakuumskale

Die Entladungserscheinungen können auch ohne Vakuumpumpe gezeigt werden, wenn man eine Vakuumskale benutzt. Dies ist ein Satz von Entladungsröhren, die jeweils bis zu einem bestimmten Druck evakuiert und zugeschmolzen sind. Der Versuch mit der Vakuumskale hat gegenüber der Variante a den Nachteil, daß der kontinuierliche Übergang zwischen den verschiedenen Leuchterscheinungen nicht beobachtet werden kann. Dagegen erweist es sich als vorteilhaft, daß man die einzelnen besonders typischen Leuchterscheinungen beliebig lange betrachten kann.

Bemerkungen zu Variante a

1. Man kann die Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge ablaufen lassen, wenn man den Hahn an der evakuierten Röhre etwas öffnet, so daß langsam Luft in die Röhre einströmt.
2. Es ist nicht ratsam, das Rohr längere Zeit evakuiert auf der Pumpe stehen zu lassen, weil dadurch Öl aus der Pumpe ins Rohr gedrückt werden kann.

Netz-spannung

5.2.4. Nachweis des Edison-Effektes

Zu Variante a

1. Glühlampe (220 V; 100 W)
2. Netzadapter
3. Elektroskop oder Braunsches Elektrometer
4. Aluminiumdraht (∅ etwa 2 mm; Länge etwa 600 mm)
5. PVC-Stab, Glasstab und Reibzeug oder Bandgenerator bzw. Influenzmaschine

Zu Variante b

Geräte 1. und 2., außerdem

6. Stromversorgungsgerät (400 V —)
7. Strommesser (3 mA) oder Vielfachmeßgerät
8. Glimmlampenschwenkstab
9. Holtzsche Klemme
10. Stanniol

Methodische Hinweise

1. Durch die Versuche wird die Möglichkeit der Freisetzung von Ladungsträgern (Elektronen) aus der Katode durch Wärmeenergie gezeigt.
2. Die Variante a entspricht weitgehend den Experimenten Edisons. Die Variante b ist für Schüler leichter zu verstehen und bietet bessere Möglichkeiten für den Übergang zur Röhrendiode, die in V 5.2.6. bis 5.2.9. behandelt wird.
3. Man kann ohne Bedenken gasgefüllte Glühlampen verwenden. Die Ionisierung des Füllgases durch den Glühfaden ist gegenüber der Elektronenemission so gering, daß nur ein unerheblicher Sperrstrom auftritt.

Variante a

Der Aluminiumdraht wird in einigen Windungen um den Glaskolben der Glühlampe gelegt. Sein Ende wird zu einer Öse gebogen. Die Versuchsanordnung ist aus der Abbildung 5.2.4./1 ersichtlich.

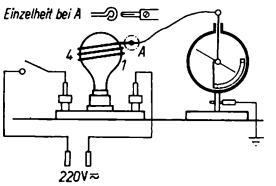


Abb. 5.2.4./1
Versuchsanordnung zum Edison-Effekt

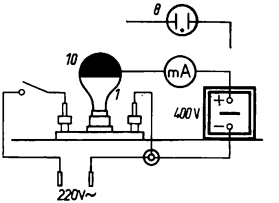


Abb. 5.2.4./2
Glühlampe mit aufgesetzter Stanniolkappe

Lädt man das Elektroskop durch einen geriebenen Glasstab auf, so geht der Ausschlag nach dem Einschalten der Glühlampe zurück. Bei negativer Aufladung durch einen geriebenen PVC-Stab bleibt der Ausschlag bestehen.

Variante b (Abb. 5.2.4./2)

Der Versuch läßt sich viel wirksamer durchführen, wenn man der Glühlampe eine Kappe aus Stanniol aufsetzt. An diese schließt man einen Strommesser (3 mA) an und legt zwischen die eine Klemme der Lampe und die freie Klemme des Strommessers die Gleichspannung von etwa 400 V des Stromversorgungsgerätes. Der Strommesser zeigt einen Strom von etwa 1 mA an. Er kann durch den Glimmlampenschwenkstab mit einem Schutzwiderstand (500 kΩ) ersetzt werden. Durch die steigende Temperatur wird die Leitfähigkeit des Glases so weit erhöht, daß meßbare Ströme fließen. Durch Umpolen der Gleichspannung kann man die Sperrwirkung demonstrieren.
Wenn man an Stelle der Gleichspannung eine Wechselspannung von 220 V anlegt, kann man mit Hilfe des Glimmlampenschwenkstabes einen pulsierenden, periodisch unterbrochenen Gleichstrom nachweisen.

5.2.5. Untersuchung der Katodenstrahlen

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 350 V — ; 50 V —)
2. Halterung für Röhren
3. Perrinsche Röhre
4. elektrische Radiometerröhre
5. Röhre mit Schattenkreuz
6. Braunsche Röhre
7. Kippgerät
8. Stabmagnet
9. Manipermmagnet
10. Strommesser (3 mA; Nullpunktmittellage)

Methodische Hinweise

1. Mit diesen Untersuchungen sollen ausgehend vom glühelektrischen Effekt die Leitungsvorgänge im Vakuum demonstriert werden.
2. Aus der Untersuchung der Eigenschaften der Katodenstrahlung ist schließlich am Modell der Braunschen Röhre die Möglichkeit ihrer technischen Nutzung in Oszillografen und Fernsehgeräten zu erläutern.

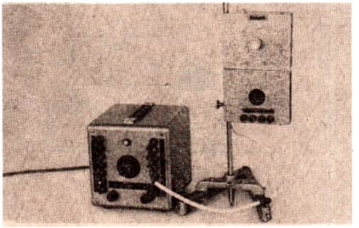


Abb. 5.2.5./1
Röhrenhalterung mit aufgesetztem Kippgerät am Stativ

3. Es ist nicht statthaft, Versuche mit den alten Kaltkatodenröhren durchzuführen, weil diese infolge der hohen Elektronengeschwindigkeiten eine harte, gesundheitsschädigende Röntgenstrahlung aussenden.

Versuchsanordnung

Die Röhrenhalterung wird an einem Stativ befestigt (Abb. 5.2.5./1), so daß die Röhre ihrer Art entsprechend in horizontaler oder vertikaler Lage betrieben wird. Das Anschlußkabel wird mit dem Stromversorgungsgerät verbunden (rot — Anode, schwarz — Katode, gelb — Wehneltzylinder, grün — Heizung).
Die Spannungen zur elektrischen und magnetischen Ablenkung an der Braunschen Röhre können an den Meßklemmen auf der Röhrenhalterung entnommen werden. Auf die Röhrenhalterung wird für die Braunsche Röhre ein Kippgerät gesteckt, das über diese Verbindung mit den notwendigen Spannungen versorgt wird und sofort mitläuft, sobald die Anodenspannung eingeschaltet wird.

Versuch 1: Perrinsche Röhre

Diese Röhre wird am besten in vertikaler Lage betrieben (Abb. 5.2.5./2). Der Katodenstrahl wird als dünner leuchtender Streifen sichtbar. Die geradlinige

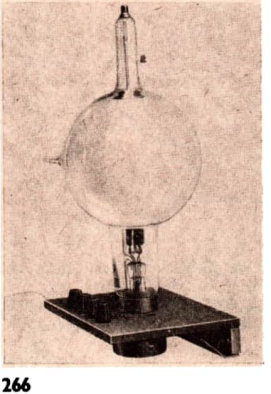


Abb. 5.2.5./2 Perrinsche Röhre. Im Versuchsaufbau in vertikaler Lage verwenden!

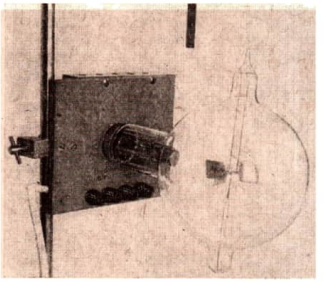


Abb. 5.2.5./3 Radiometerröhre

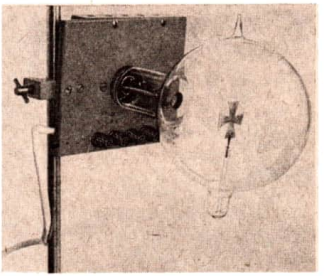


Abb. 5.2.5./4 Schattenkreuzröhre

Ausbreitung der Katodenstrahlen ist zu erkennen. Führt man von hinten einen Pol eines Stabmagneten oder eines Manipermmagneten an die Röhre, so erfolgt eine seitliche Ablenkung des Strahls. Wenn man die Bewegungsrichtung der Elektronen als bekannt voraussetzt, kann man aus der Feldlinienrichtung des Magneten und der Ablenkungsrichtung auf die negative Ladung der Elektronen schließen. Die negative Ladung der Elektronen kann auch unmittelbar nachgewiesen werden, indem man zwischen Auffangelektrode und Anode einen Strommesser (3 mA) mit Nullpunktmittellage legt. Die Auffangelektrode ist der Minuspol.

Versuch 2: Elektrische Radiometerröhre

In dieser Röhre verläuft der Katodenstrahl wie in der Perrinschen Röhre (Abb. 5.2.5./3). In der Mitte befindet sich ein Flügelrädchen mit Glimmerblättchen. Die mechanische Kraftwirkung der Katodenstrahlen kann man nachweisen, indem man mit einem Pol eines Magneten den Strahl so ablenkt, daß er auf einer Seite auf die Glimmerblättchen trifft und das Rädchen in Rotation versetzt oder es wieder abbremst.

Versuch 3: Röhre mit Schattenkreuz

Die Röhre wird in horizontaler Anordnung betrieben, so daß der Fluoreszenzschirm von den Schülern beobachtet werden kann (Abb. 5.2.5./4). Auf ihm erscheint ein scharf begrenzter Schatten des Malteserkreuzes aus Al-Blech und seiner Halterung aus Glas. Daraus ist zu schließen, daß sich die Katodenstrahlen geradlinig ausbreiten und daß sie Leiter wie Isolatoren schlecht durchdringen.
Durch Heranführen eines Magnetpols ist die Ablenkung der Strahlen nachweisbar.

Versuch 4: Braunsche Röhre

In den Röhrenhals sind zwei Platten zur Ablenkung durch ein elektrisches Feld eingebaut (Abb. 5.2.5./5).
Die Röhre wird horizontal angeordnet. Auf dem Bildschirm ist zunächst ein Leuchtfleck zu sehen. Durch die zwischen 0 und 50 V einstellbare Spannung am

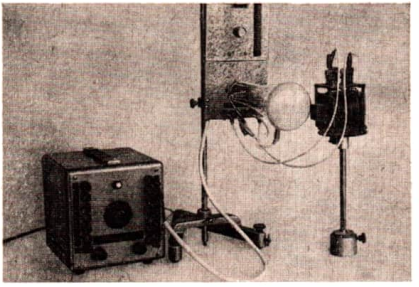


Abb. 5.2.5./5
Braunsche Röhre

Wehneltzylinder kann man die Hell-Dunkel-Steuerung und die Fokussierungswirkung demonstrieren.
Legt man eine Gleichspannung von 40 V an die Ablenkplatten, so ist die Ablenkung entsprechend der Polung nach links oder rechts zu erkennen. Bei einer Wechselspannung von 40 V erscheint ein horizontaler Leuchtstrich.
Führt man von links oder rechts den Pol eines Magneten oder eine von Gleichstrom durchflossene Spule an die Röhre, so erfolgt eine Ablenkung des Strahls nach oben oder unten entsprechend der Polung des Magnetfeldes.
Speist man eine Spule von 1500 Wdg. mit der Wechselspannung aus der Röhrenhalterung (6,3 V), so erscheint ein Leuchtstrich (Abb. 5.2.5./6).
Gleichzeitige elektrische und magnetische Ablenkung durch Wechselspannung (50 Hz) führt je nach Phasenlage und Betrag der Ablenkungsgrößen zu schrägen Strichen, Ellipsen oder Kreisen.

Versuch 5: Modell eines Katodenstrahloszillografen

Auf die Röhrenhalterung wird das zugehörige Kippgerät gesteckt. Der Ausgang des Kippgerätes liegt dann an den Buchsen auf der Röhrenhalterung. Sie werden mit den Ablenkplatten verbunden. Auf dem Bildschirm ist ein horizontaler Leucht-

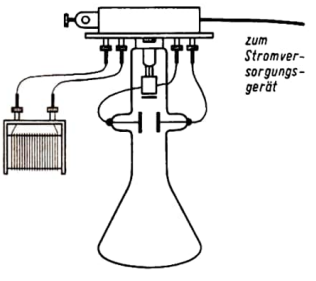


Abb. 5.2.5./6
Anschlüsse der Ablenkungssysteme
der Braunschen Röhre (von oben gesehen)

strich zu beobachten. Durch einen Manipermmagneten, den man an Stativteilen über der Röhre mit einem Pol nach unten anordnet, ist der Strich auf die Röhrenmitte zu justieren. Führt man von der Seite eine Spule (1500 Wdg.) an die Röhre heran, die an die Buchsen „Ablenkmagnet" (6,3 V ~) angeschlossen wird, erscheint auf dem Bildschirm die Wechselstromkurve. Die Kippfrequenz ist durch ein Potentiometer im Kippgerät begrenzt einstellbar. Um ein stehendes Bild zu erhalten, ist gegebenenfalls eine Veränderung der Anodenspannung notwendig, weil die Kippfrequenz von dieser beeinflußt wird.

Bemerkung

Falls die Röhren nicht von allein zünden, erreicht man dies, indem man mit einem piezoelektrischen Gasanzünder einen kurzen Zündimpuls auf ihre Vorderseite gibt.

5.2.6. Wirkungsweise der Diode [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 40 V ~)
2. Röhrenbrett
3. Diode oder Triode als Diode geschaltet
4. Widerstand (1 kΩ)
5. Strommesser (1 mA; 100 mA)
6. Kopfhörer

Methodischer Hinweis

Nach der Demonstration des glühelektrischen Effekts (V 5.2.4.) ist es ohne weiteres möglich, die Ventil- und Gleichrichterwirkung der Diode mit Schülerexperimenten einzuführen. Die Gleichrichterwirkung muß aber danach durch V 5.2.7. oder 5.2.9. bildlich dargestellt werden.

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 5.2.6./1 bzw. 2. Der Widerstand dient dem Schutz der Diode. Als Anodenspannung wird zunächst mit Gleichspannung gearbeitet. Bei veränderter Polung sind Sperr- und Durchlaßrichtung nachzuweisen.

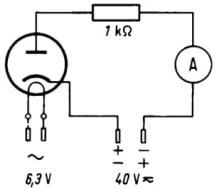


Abb. 5.2.6./1
Schaltplan zur Untersuchung einer Röhrendiode

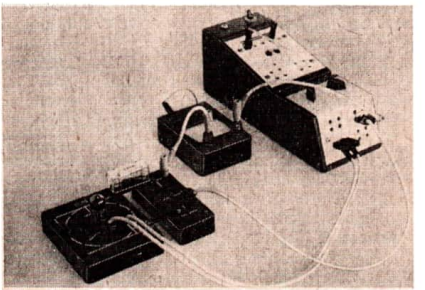


Abb. 5.2.6./2
Aufbau mit dem SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

An Stelle des Widerstandes wird ein Kopfhörer eingesetzt und als Anodenspannung eine Wechselspannung angelegt. Man hört durch den pulsierenden Gleichstrom einen Brummton (50 Hz), der sich mit dem Brummton vergleichen läßt, der bei direktem Anschluß des Kopfhörers an eine Wechselspannung (6,3 V) entsteht.

Bemerkung

Schließt man den Anodenstromkreis ohne Spannungsquelle, so fließt schon ein sehr kleiner Anodenstrom, weil einige Elektronen bei der Glühemission so hohe Geschwindigkeiten erhalten, daß sie die Anode erreichen.

Netzspannung

5.2.7. Gleichrichterwirkung einer Röhrendiode

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~; 200 V ⎓)
2. Röhrendiode
3. Röhrenbrett
4. 2 Glimmlampen (UR 110)
5. Glimmlampenbrett für 2 Glimmlampen Ⓢ
6. Widerstand (50 kΩ)
7. Widerstand (300 kΩ)
8. Spannungsmesser (250 V ⎓)
9. Drehspiegel

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ergänzt die Erkenntnisse aus V 5.2.6. Er ermöglicht es, die Bilder der anliegenden Wechselspannung und des pulsierenden Gleichstroms gleichzeitig zu zeigen.

Versuch

Die Versuchsanordnung wird gemäß der Abbildung 5.2.7./1 aufgebaut. Die beiden Glimmlampen werden übereinander angeordnet. Die Glimmlampe G_u dient zum Nachweis des Spannungsverlaufs, G_i veranschaulicht den Stromstärkeverlauf. Ihre Schutzwiderstände betragen etwa 300 kΩ bzw. 50 kΩ.

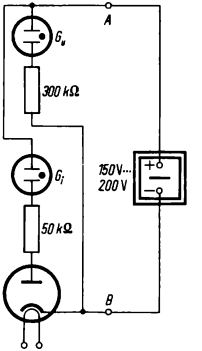


Abb. 5.2.7./1
Schaltplan zum Nachweis der Gleichrichterwirkung einer Diode

1. An die Anschlüsse A und B wird eine Gleichspannung von etwa 200 V gelegt, wobei der positive Pol mit A, der negative mit B verbunden wird. Damit Überlastungen vermieden werden, überprüft man die Spannung mit einem Meßgerät. Bei beiden Glimmlampen leuchten die unteren Elektroden, ein Zeichen dafür, daß die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist.
2. Die Anschlüsse an A und B werden vertauscht. Die Glimmlampe G_i bleibt dunkel, die Diode ist in Sperrichtung geschaltet.
3. Legt man an die Anschlüsse A und B eine Wechselspannung von etwa 200 V, so leuchten beide Elektroden der Glimmlampe G_u, jedoch nur die untere Elektrode von G_i. Im Drehspiegel kann man den Spannungs- und den Stromstärkeverlauf beobachten (Abb. 5.2.7./2). Die angelegte Wechselspannung bewirkt im Anodenstromkreis einen pulsierenden Gleichstrom. Wenn die beiden Glimmlampen an einem Schwenkstab befestigt werden, kann man auf den Drehspiegel verzichten (Abb. 5.2.7./3).

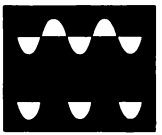


Abb. 5.2.7./2 Leuchtbild beider Glimmlampen bei Wechselspannung

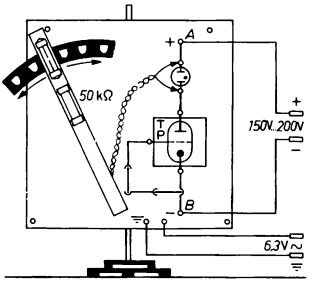


Abb. 5.2.7./3 Schaltung der Pentode des HF-Satzes als Diode

Bemerkung

Anstelle des Glimmlampenbrettes kann der Glimmlampenoszillograf nach V 4.1.3. eingesetzt werden.

Netzspannung

5.2.8. Kennlinie der Röhrendiode

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~; 250 V — oder 40 V —)
2. Röhrenbrett
3. Duodiode (EZ 80 oder 81)
   oder Triode (EC 92) oder Pentode (EL 83, EF 80)
4. Gleitwiderstand (1300 Ω; 0,7 A)
5. Strommesser (100 mA —)
6. Spannungsmesser (250 V —)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch soll quantitativ die funktionale Abhängigkeit der Anodenstromstärke von der Anodenspannung zeigen.
2. Demonstrations- und Schülerexperiment sollten im Unterricht ausgeführt werden. Im Demonstrationsexperiment kann man mit hoher Anodenspannung den Sättigungsbereich der Röhre zeigen. Im Schülerexperiment sollen die Schüler Fertigkeiten im Aufnehmen von Meßreihen vervollkommnen.

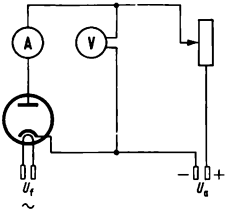


Abb. 5.2.8./1 Schaltung zur Aufnahme der Kennlinie

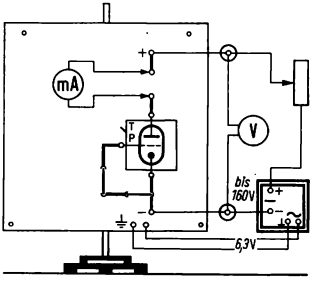


Abb. 5.2.8./2
Versuchsanordnung zur Aufnahme eines Stromstärke-Spannung-Diagramms

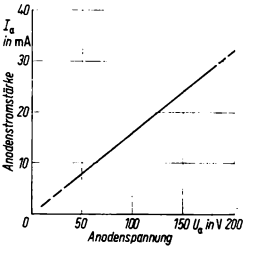


Abb. 5.2.8./3
Stromstärke-Spannung-Diagramm einer Zweielektrodenröhre

Versuch

Der Versuchsaufbau kann mit den verschiedenen Gerätesätzen nach dem Schaltplan (Abb. 5.2.8./1) erfolgen. Als Röhren sind auf den entsprechenden Röhrenbrettern zu verwenden: Duodioden EZ 80 oder EZ 81 mit einer Anode oder mit Parallelschaltung beider Anoden, Trioden oder Pentoden (EC 92, EF 80, EL 83), deren System zu Dioden geschaltet ist (g_1 an Katode, g_2 an Anode, g_3 an Katode). Die Heizspannung wird eingeschaltet. Die Anodenspannung wird stufenweise erhöht (Abb. 5.2.8./2). Die zugeordneten Werte von Anodenspannung und -stromstärke werden in Tabelle und Koordinatensystem eingetragen (Abb. 5.2.8./3). Durch den Einstellwiderstand ist die Anodenspannung auf ganzzahlige Werte einstellbar. Im Schülerversuch kann er durch einen Festwiderstand von 1 kΩ zum Schutz der Röhre ersetzt werden.

Bemerkungen

1. Technische Elektronenröhren haben Katoden mit einer so hohen Elektronenemission, daß der Sättigungsbereich erst bei Spannungen und Stromstärken erreicht wird, die zur Zerstörung der Röhre führen. Bei Schülerexperimenten darf ohnehin nur mit Anodenspannungen bis 60 V gearbeitet werden. Um den Sättigungsbereich im Demonstrationsversuch zu erreichen, ist die Heizspannung der Röhren auf etwa 3 V herabzusetzen.
2. Im Lehrmittelangebot gibt es ein Demonstrationsmodell „Diode". Es ist dem Schaltzeichen der Diode entsprechend aufgebaut und weicht dadurch in seiner Konstruktion von technischen Röhrendioden ab. Es ist für diesen Versuch gut geeignet. Den Sättigungsbereich erreicht man bei voller Heizspannung.

5.2.9. Röhrendiode als Einweggleichrichter

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 50 V ~)
2. Röhrenbrett
3. Röhre wie bei V 5.2.8.
4. Widerstand (5 kΩ)
5. Umschalter
6. Katodenstrahloszillograf
7. Elektrolytkondensator (4 μF ... 20 μF)
8. Lautsprecher (hochohmig)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch soll den Schülern eine Einführung in die technische Anwendung der Diode als Gleichrichterröhre geben. Dabei ist es wichtig, die Notwendigkeit der Glättung und ihre Realisierung akustisch zu demonstrieren. Dieser Teil des Versuches ist auch als Schülerexperiment mit Kopfhörern ausführbar.
2. Es ist wichtig, daß die Schüler aus der Durchlaßrichtung der Diode die Polarität der Gleichspannung am Arbeitswiderstand R_A bestimmen lernen.
3. In Arbeitsgemeinschaften ist auch interessant, die Restwelligkeit in Abhängigkeit von der Kapazität des Kondensators zu untersuchen.

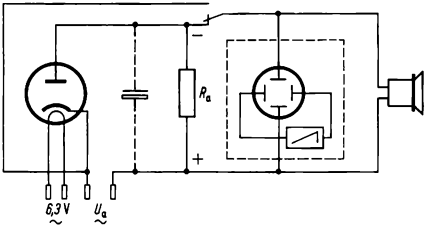


Abb. 5.2.9./1
Schaltung zum Nachweis der Gleichrichtung

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abb. 5.2.9./1, zunächst ohne Kondensator. Lautsprecher und Oszillograf liegen über den Umschalter direkt an der Anodenspannung. Der Oszillograf zeigt die Wechselspannungskurve durch den Lautsprecher etwas verzerrt (Abb. 5.2.9./2a). Der Lautsprecher brummt. Der Umschalter wird umgelegt. Am Oszillografen erscheint das Bild des pulsierenden Gleichstroms (Abb. 5.2.9./2b). Der Brummton wird schnarrend. Der Kondensator wird eingesetzt. Die Oszillografenkurve erscheint geglättet. Der Brummton wird erheblich leiser. Je größer die Kapazität ist, desto vollkommener wird die Glättung.

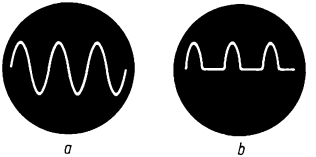


Abb. 5.2.9./2 Oszillogramm
a) sinusförmige Wechselspannung,
b) pulsierende, periodisch unterbrochene Gleichspannung

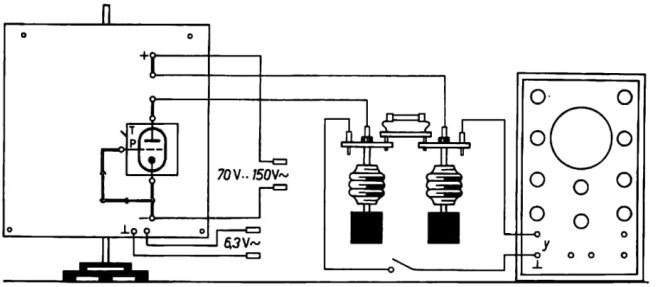


Abb. 5.2.9./3 Nachweis der Gleichrichterwirkung einer Röhre durch einen Katodenstrahloszillografen

Bemerkungen

1. Ohne Arbeitswiderstand zeigt der Oszillograf auch hinter der Diode eine Wechselspannungskurve.
2. Der Y-Eingang des Oszillografen sollte möglichst auf direkten Plattenanschluß geschaltet werden, damit auch bei der geglätteten Gleichspannung ein Ausschlag erfolgt.
3. Zum Nachweis des Restwelligkeit ist kapazitiver Plattenanschluß zu wählen, weil die Eingangsempfindlichkeit des Oszillografen erhöht werden muß.
4. Die Glättung kann notfalls auch mit dem Glimmlampenschwenkstab gezeigt werden ($U \approx 105$ V).

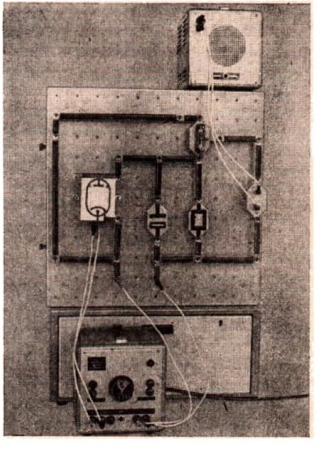


Abb. 5.2.9./4 Aufbau mit dem Tafelschaltgerät

5.2.10. Zweiweggleichrichtung durch eine Duodiode

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 50 V ~)
2. Transformator aus Aufbauteilen mit Mittelabgriff der Sekundärspule
3. Röhrenbrett (2 Stück zu Versuch 1)
4. Röhre (EZ 80, EZ 81) (2 Stück zu Versuch 1)
5. Widerstand (5 kΩ)
6. 2 Kondensatoren (4 μF)
7. Drosselspule oder Widerstand (5 kΩ)
8. Katodenstrahloszillograf oder Glimmlampenschwenkstab
9. Lautsprecher oder Kopfhörer

Methodische Hinweise

1. Es soll die Erkenntnis vermittelt werden, daß die Zweiweggleichrichtung technisch günstiger ist, weil die Ausnutzung beider Halbperioden der Wechselspannung größere Leistungen ermöglicht und der pulsierende Gleichstrom leichter zu glätten ist. Der technische Nachteil des größeren Schaltungsaufwandes ist dabei aber zu beachten.
2. Wenn hier zur Glättung eine Siebkette benutzt wird, liegt der Grund dafür nur darin, daß die Zweiweggleichrichtung und die Siebkette im allgemeinen nur in Arbeitsgemeinschaften behandelt werden.
3. Versuch 1 ist nur zur methodischen Heranführung an die Konstruktion der Duodiode zu betrachten.

Versuch 1: Verwendung von zwei Dioden

Der Aufbau erfolgt mit zwei Dioden nach dem Schaltplan in Abb. 5.2.10./1. Der Nachweis der pulsierenden Gleichspannung kann mit Oszillograf oder Glimmlampenschwenkstab (V 5.4.1.) erfolgen.

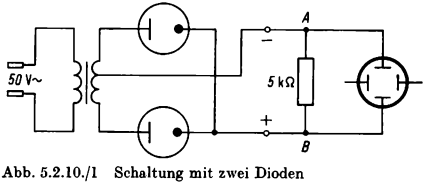


Abb. 5.2.10./1 Schaltung mit zwei Dioden

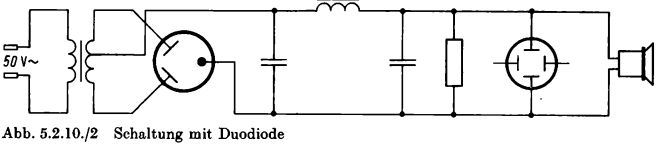


Abb. 5.2.10./2 Schaltung mit Duodiode

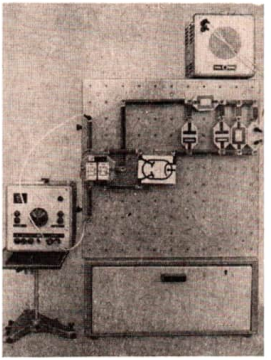


Abb. 5.2.10./3
Aufbau mit dem Tafelschaltgerät

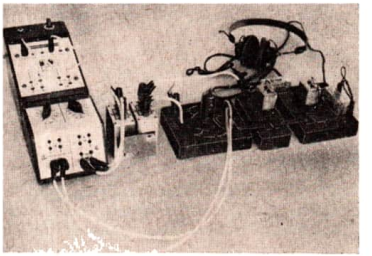


Abb. 5.2.10./4 Aufbau mit
dem SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

Versuch 2: Verwendung einer Duodiode

In dem Schaltplan (Abb. 5.2.10./2) sind die beiden Dioden in einer Duodiode zusammengefaßt. Es wird zunächst wie in Versuch 1 ohne Siebkette gearbeitet, aber der Lautsprecher zum akustischen Nachweis zugeschaltet. Dann wird der Ladekondensator C_L eingesetzt. Es folgen die Siebdrossel oder ein Siebwiderstand und schließlich der Siebkondensator C_s. Nach jeder Schaltungserweiterung wird die Restwelligkeit am Oszillografen und akustisch beobachtet.



Abb. 5.2.10./5 Oszillogramm
a) der pulsierenden Gleichspannung,
b) der geglätteten Gleichspannung

Bemerkungen

1. Die Einspeisung der Wechselspannung kann an Stelle des Transformators mit Mittelabgriff auch über eine Spannungsteilerschaltung aus zwei gleichen Widerständen erfolgen.
2. Von Interesse ist auch der akustische Vergleich der Zweiweggleichrichtung mit der Einweggleichrichtung. Der Brummton liegt bei der Zweiweggleichrichtung mit 100 Hz um eine Oktave höher. Der Vergleich ist leicht durchzuführen, indem man in den Versuchen die Zuleitung zu einer der Anoden unterbricht. Im Schülerexperiment ohne Oszillografen ist das die einzige Nachweismöglichkeit für die Unterschiede der beiden Gleichrichterschaltungen.

5.2.11. Kennlinie einer Triode

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~; 20 V – ; 50 V ... 200 V –)
2. Röhrenbrett
3. Triode (EC 92) oder Pentode als Triode geschaltet (EL 83, EF 80)
4. Drehwiderstand (1 kΩ)
5. Strommesser (50 mA)
6. Spannungsmesser (25 V)
7. Spannungsmesser (250 V)

Methodische Hinweise

1. Hier erfolgt eine weitere Übung in der quantitativen Erfassung des funktionalen Zusammenhangs physikalischer Größen, und den Schülern muß deutlich werden, wie Kennlinien die Arbeitsweise elektronischer Bauelemente kennzeichnen und sich daraus ihre Einsatzmöglichkeiten erkennen lassen.
2. Ausdrücklich muß darauf hingewiesen werden, daß man nicht aus dem Vergleich der Gitterspannungsänderung mit der Änderung der Anodenstromstärke auf die Verstärkerwirkung der Röhre schließen darf. Die Verstärkung ist nur durch den Vergleich der Wechselstromleistungen im Gitter- und Anodenkreis zu erklären.
3. Eine genaue Auswertung des Kennlinienfeldes soll nur in Arbeitsgemeinschaften vorgenommen werden.

Versuch

Die Meßanordnung ist nach dem Schaltplan in Abbildung 5.2.11./1 aufzubauen. (Pentoden werden zur Triode geschaltet, indem man g_2 mit der Anode und g_3 mit der Katode verbindet.) Mit positivem Potential am Gitter kann man nur bei Anodenspannungen bis 70 V oder bei herabgesetzter Heizspannung arbeiten, weil sonst die Anodenstromstärken zu groß werden.
Man nimmt die Kennlinien für verschiedene Anodenspannungen auf. Am Anodenspannungsteil des Stromversorgungsgerätes entspricht die Schalterstellung 1 etwa 70 V, die Stellung 2 etwa 140 V und die Stellung 3 etwa 200 V. Für jede dieser

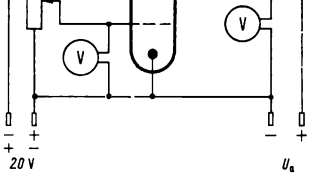


Abb. 5.2.11./1
Versuchsanordnung zur Aufnahme einer Kennlinie

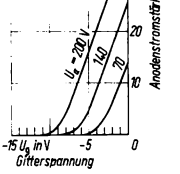


Abb. 5.2.11./2
I_a - U_g -Diagramm einer Dreielektrodenröhre

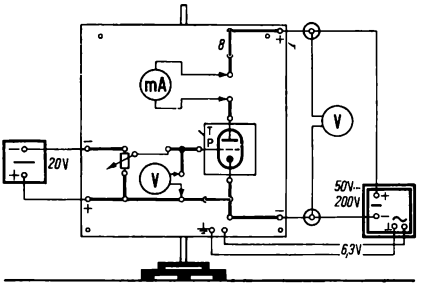


Abb. 5.2.11./3
Aufbau mit HF-Satz

Schalterstellungen verändert man mit Hilfe des Spannungsteilers die Gitterspannung, beginnend bei etwa 15 V, in Stufen von je 1 V. Die dazugehörigen Anodenstromstärken werden in ein U_g-I_a-Koordinatensystem eingetragen. Man erhält Punkte einer Röhrenkennlinie (Abb. 5.2.11./2). Die Meßreihe ist abzubrechen, wenn die für den benutzten Röhrentyp zulässige maximale Anodenstromstärke erreicht ist. (Für die Röhre EL 83 ist $I_{a\,max} = 70$ mA.)
Aus den aufgenommenen Kennlinien werden für die Röhren die Begriffe der Steilheit, des Innenwiderstandes und des Durchgriffs entwickelt.
Es ist

die Steilheit $$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

für $$U_a = \text{konst.},$$

der Durchgriff $$D = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g},$$

der innere Widerstand $$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Bemerkungen

1. Mit zunehmender Anodenstromstärke sinkt die Anodenspannung ab, so daß die Steilheit der Kennlinie etwas zu gering ausfällt. Im Unterricht ist dieser Mangel jedoch nicht von Bedeutung.
2. Die Kennlinien moderner Elektronenröhren weisen keinen oberen Knick auf, da die Emissionsfähigkeit ihrer Katoden nicht voll ausgenutzt werden kann, ohne daß die Röhre zerstört wird. Zur Aufnahme einer vollständigen Kennlinie muß man die Heizspannung auf etwa 3 V herabsetzen.
3. Mit Teilen aus den SEG-Sätzen kann die Kennlinie auch im Schülerexperiment aufgenommen werden.

5.2.12. Die Triode als Verstärkerröhre

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ; 6 V ~ ; 40 V ~ ; 200 V — zu Versuch 2)
2. Röhrenbrett mit Triode (EC 92 oder EL 83)
3. Kopfhörer

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 3., außerdem

4. Kondensator (0,1 μF)
5. Widerstand (500 kΩ)
6. Widerstand (200 Ω)
7. Elektrolytkondensator (50 μF)
8. Lautsprecher
9. Transformator aus Aufbauteilen der SEG Elektrik und Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik (1000 Wdg./3000 Wdg.)
10. Katodenstrahloszillograf

Methodische Hinweise

1. Der Versuch 2 wirkt im Unterricht durch den Lautsprecher eindrucksvoller. Eine genaue Erläuterung der Eingangskopplung und der Katodenkombination kann nur in Arbeitsgemeinschaften gegeben werden. Hier kann er auch als Schülerexperiment ausgeführt werden ($U_B = 40$ V).
2. Die Triode wird in Verbindung mit der Fotozelle in V 5.2.15. in einem Gleichstromverstärker und in V 5.2.16. in einem Wechselstromverstärker demonstriert.

Versuch 1

Nach dem Schaltplan in Abbildung 5.2.12./1 ist in den Anodenkreis der Triode ein Kopfhörer als Arbeitswiderstand geschaltet. An Gitter und Katode legt man eine Wechselspannung von 6 V. Im Kopfhörer ist ein lauter Brummton zu hören. Zum Nachweis der Verstärkung schließt man den Kopfhörer direkt an die Wechselspannung von 6 V. So brummt er nur sehr leise.
An Stelle der Wechselspannungsquelle kann man einen zweiten Kopfhörer als Mikrofon anschließen.

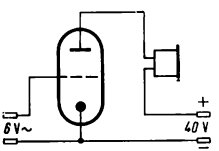


Abb. 5.2.12./1
Schaltung zum Nachweis der Verstärkung

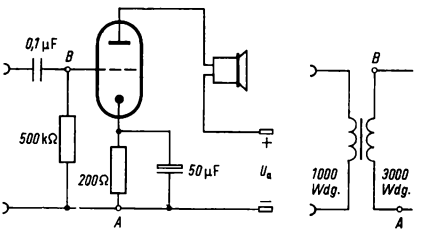


Abb. 5.2.12./2 Schaltung einer Verstärkerstufe

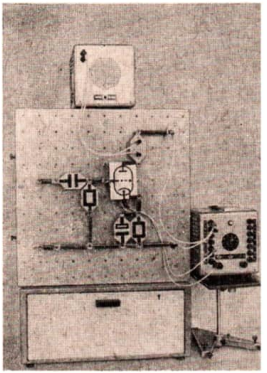


Abb. 5.2.12./3
Aufbau mit dem Tafelschaltgerät

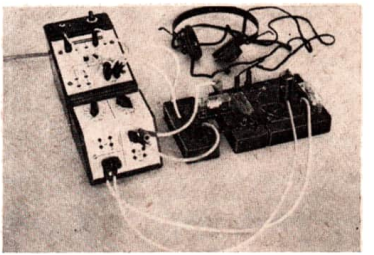


Abb. 5.2.12./4 Aufbau
mit dem SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

Versuch 2

Die Schaltung einer Verstärkerstufe nach Abbildung 5.2.12./2 bis 5.2.12./4 entspricht der technisch üblichen Form. Der Eingang kann wahlweise mit Gitterkondensator und Gitterableitwiderstand oder mit Eingangstransformator gestaltet werden. Eine negative Gittervorspannung wird durch den Katodenwiderstand erzeugt, der durch einen Elektrolytkondensator für den Anodenwechselstrom überbrückt ist. Als Arbeitswiderstand ist ein hochohmiger Lautsprecher eingesetzt.
An den Eingang kann man verschiedene Wechselspannungsquellen legen, z. B. 2 V ~; 50 Hz, Tonfrequenzgenerator, Kopfhörer als Mikrofon, Kristallmikrofon mit Vorverstärker, Kohlekörnermikrofon mit Gleichspannungsquelle und Arbeitswiderstand. Um die Verstärkung nachzuweisen, verbindet man den Lautsprecher jeweils direkt mit der Eingangsquelle.
Die Verstärkung ist auch nachzuweisen, indem man die Amplituden der Wechselspannungen an Eingang und Ausgang im Oszillografenbild vergleicht.

Bemerkungen

1. Der Versuch 1 ist als Schülerexperiment durchzuführen und soll nur das Prinzip der Verstärkung zeigen.
2. Für Arbeitsgemeinschaften sind weitere Untersuchungen zu empfehlen:

— Sperren der Röhre bei fehlendem Gitterableitwiderstand
— Messen der negativen Gittervorspannung mit Röhrenvoltmeter
— Verzerrung bei fehlender Katodenkombination. (Im Schülerexperiment bei $U_a = 40$ V nicht deutlich zu beobachten.)

5.2.13. Nachweis des Hallwachs-Effekts

Zu Variante a

1. Bogenlampe mit Vorwiderstand
2. Zinkplatte
3. Holtzsche Klemme
4. Elektroskop
5. PVC-Stab mit Wollappen oder Glasstab mit Seidenlappen oder Influenzmaschine
6. Quecksilber
7. Quecksilberbrett

Methodischer Hinweis

Der Hallwachs-Effekt ist als Vorversuch zu den folgenden Versuchen mit Fotozellen zu werten. Er zeigt im Prinzip, wie Elektronen durch Lichtenergie eine Metalloberfläche verlassen können und führt damit die Erkenntnisse aus V 5.2.1. bis 5.2.4. weiter.

Vorbemerkung

Am deutlichsten kann man den Hallwachs-Effekt nachweisen, wenn man eine frisch amalgamierte Zinkplatte verwendet. Dazu wird die Platte erst blank geschmirgelt. Dann verreibt man bei offenem Fenster über einem Quecksilberbrett einen Tropfen Quecksilber mit einem sauberen Lappen auf der Platte, so daß eine gleichmäßige Amalgamschicht entsteht.

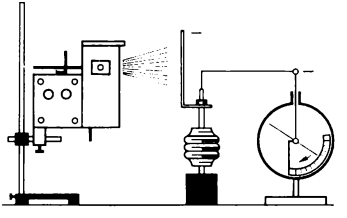


Abb. 5.2.13./1
Versuchsanordnung zum Nachweis des Hallwachs-Effekts

Variante a: Bestrahlung mit UV-Licht

In der Versuchsanordnung nach Abbildung 5.2.13./1 wird die Zinkplatte durch einen geriebenen PVC-Stab negativ aufgeladen. Bei Bestrahlen mit dem Licht einer Bogenlampe verliert sich die Ladung; der Ausschalg des Elektroskops geht zurück. Durch den UV-Anteil des Bogenlampenlichtes werden Elektronen von der Platte abgelöst. Bei positivem Aufladen durch einen geriebenen Glasstab tritt keine Entladung ein.

Bemerkung

Notfalls genügt es, die Platte unmittelbar vor dem Versuch zu schmirgeln.

5.2.14. Nachweis des Fotostroms in einer Fotozelle

Zu Versuch 1

1. Vakuumfotozelle
2. Strommesser mit Meßverstärker (2 μA)
3. Physikleuchte

Zu Versuch 2

4. gasgefüllte Fotozelle
5. Widerstand (500 kΩ)
6. Strommesser (50 μA)
7. Stromversorgungsgerät (100 V —)

Methodischer Hinweis

Die Versuche zeigen in einfachster Form die technische Nutzung des Hallwachs-Effektes in der Fotozelle. Sie sind als Vorversuche zu V 5.2.15. und V 5.2.16. durchzuführen.

Versuch 1: Vakuumfotozelle

Der Meßverstärker wird kompensiert und die Vakuumfotozelle angeschlossen. Bei Beleuchtung steigt die Stromstärke des Fotostroms deutlich an (Abb. 5.2.14./1).

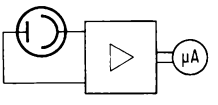


Abb. 5.2.14./1 Nachweis des Fotostroms einer Vakuumfotozelle

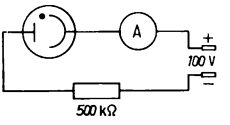


Abb. 5.2.14./2 Nachweis des Fotostroms einer gasgefüllten Fotozelle

Versuch 2: Gasgefüllte Fotozelle

Die gasgefüllte Fotozelle benötigt eine Anodenspannung von etwa 100 V und liefert dadurch größere Fotoströme. Zum Schutz der Fotozelle wird sie mit einem Widerstand in Reihe geschaltet. Die Anodenspannung darf 140 V nicht überschreiten, da sonst in der Fotozelle eine Glimmentladung eintritt.
Die Schwankungen der Fotostromstärke sind bereits festzustellen, wenn man die Fotozelle mit der Hand gegen die Raumbeleuchtung abschirmt (Abb. 5.2.14./2).

Netzspannung

5.2.15. Anwendung der Fotozelle in Sicherungs-, Alarm- und Zählanlagen

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 140 V — ; 20 V — ; 6 V ~)
2. gasgefüllte Fotozelle
3. Röhrenbrett mit Triode (EL 83)
4. Schichtwiderstand (500 kΩ)
5. Relais
6. Physikleuchte
7. 2 Glühlampen (6 V)
8. elektrische Klingel
9. elektrisches Zählwerk

Methodische Hinweise

1. Die Triode wird hier in einem Gleichstromverstärker benutzt.
2. Die Versuche veranschaulichen die Wirkungsweise von Alarmanlagen für Tresor- und Bankräume, von Schaltautomaten für Rolltreppen und für Straßenbeleuchtungen, von Lichtschranken zum Schutze der Arbeiter an hydraulischen Pressen und dgl. Die diesen Versuchen zugrunde liegenden Naturgesetze bilden auch die Grundlage für die Steuerungs- und Regelungsvorgänge vieler Automaten, z. B. bei Sortiermaschinen, Kopier- und Schweißautomaten usw. Auch bei der Zeitmessung, z. B. bei sportlichen Wettkämpfen, werden Lichtschranken benutzt.
3. Vorrichtungen nach Art von Versuch 3 dienen in der Produktion beispielsweise zum Zählen von Werkstücken. Auch die Besucherzahlen von Ausstellungen o. dgl. werden oft auf diese Weise ermittelt.

Versuch 1: Modell einer Feuermeldeanlage

In der Vorbereitung wird die Schaltung nach dem Schaltplan (Abb. 5.2.15./1) ohne den Arbeitsstromkreis des Relais aufgebaut. Anodenspannung und Gittervorspannung müssen so aufeinander abgestimmt werden, daß das Relais bei Lichteinfall anzieht und bei Verdunkelung auch sicher wieder abfällt. Falls die Anodenspannung am Stromversorgungsgerät nur stufenweise einstellbar ist, kann es notwendig werden, durch einen als Spannungsteiler geschalteten Gleitwiderstand die Anodenspannung auf den günstigsten Wert einzustellen. Sie darf 140 V nicht überschreiten, da sonst die Fotozelle zerstört wird. In den Arbeitsstromkreis des Relais schaltet man an den Ruhekontakt eine grüne Glühlampe zur Anzeige der Betriebsbereitschaft der Alarmanlage und an den Arbeitskontakt eine Klingel (Abb. 5.2.15./2).
Der Versuch wird in einem völlig oder teilweise verdunkelten Raum durchgeführt. Schaltet man die Deckenbeleuchtung ein oder beleuchtet man die Fotozelle mit einem brennenden Streichholz, so ertönt die Alarmklingel. Als Anzeigegerät kann statt der Klingel auch eine zweite Kleinspannungsglühlampe dienen, doch ist dann der Versuch nicht so wirkungsvoll.

Versuch 2: Modell einer Alarmanlage mit Lichtschranke

In Abänderung des Versuchs 1 wird der Klingelstromkreis an die Ruhestromkontakte des Relais angeschlossen (Abb. 5.2.15./3). Eine Physikleuchte wird an einem Stativ befestigt und in einem Abstand von etwa 1 m so aufgestellt, daß ihr gebündeltes Licht auf die Fotozelle fällt. Dabei fließt eine große Anodenstromstärke durch die Relaiswicklung, der Anker wird angezogen, und der Klingelstromkreis ist geöffnet. Unterbricht man den Lichtstrom, z. B. durch Dazwischenhalten der Hand, so wird die Anodenstromstärke kleiner und die Alarmklingel ertönt.

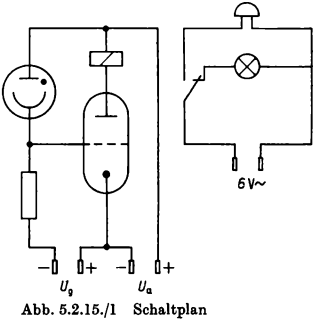


Abb. 5.2.15./1 Schaltplan

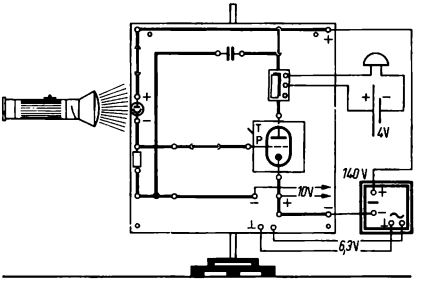


Abb. 5.2.15./2
Modell einer auf Licht reagierenden Alarmanlage

Versuch 3: Modell einer Lichtschranke mit Zählwerk

In Abänderung des Versuchs 2 wird die Klingel durch ein elektrisches Zählwerk ersetzt (Abb. 5.2.15./4). Durchbricht man die Lichtschranke wiederholt, so springt das Zählwerk jeweils um eine Stelle weiter und zählt damit die Unterbrechungen.

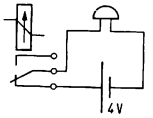


Abb. 5.2.15./3
Klingelsstromkreis
an den Ruhestromkontakten des Relais

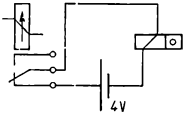


Abb. 5.2.15./4
Zählwerkstromkreis an den
Ruhestromkontakten des Relais

Netzspannung

5.2.16. Modellversuch zum Tonfilm

1. Stromversorgungsgerät (6,3 V ~ ; 140 V —)
2. Physikleuchte
3. Röhrenbrett mit Triode
4. Fotozelle
5. Elektrolytkondensator (50 μF)
6. Kondensator (10 nF)
7. Widerstand (5 MΩ)
8. Widerstand (500 kΩ)
9. Widerstand (150 Ω)
10. Lautsprecher
11. Loch- oder Schlitzscheibe

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch zeigt modellmäßig einen Teil der Vorgänge bei der Tonwiedergabe des Tonfilms. Die Lichtimpulse werden mit Hilfe der Fotozelle in Stromstöße umgewandelt, die über einen Wechselstromverstärker dem Lautsprecher zugeführt werden.
2. Das Lichtstrahlenbündel einer Physikleuchte wird durch eine rotierende Lochscheibe in kurze Lichtimpulse zerhackt. Hierfür kann man die in der Akustik

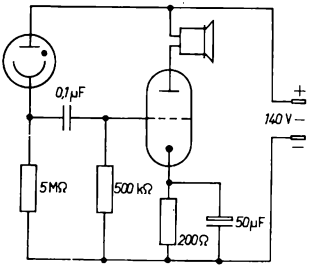


Abb. 5.2.16./1 Schaltplan des Fotoverstärkers

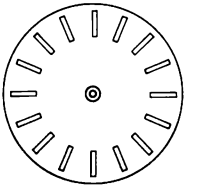


Abb. 5.2.16./2 Schlitzscheibe

verwendete Sirenenscheibe benutzen. Der Sprossenschrift des Tonfilmes entspricht jedoch besser eine Scheibe mit radialen Schlitzen, wie man sie für stroboskopische Zwecke gebraucht (Abb. 5.2.16./1).

3. Im 10. Teil der Physikalischen Schulversuche wird in V 3.4.1. ein entsprechender Verstärker beschrieben.

Versuchsanordnung

Mit dem Röhrenbrett, der Triode und den übrigen Schaltelementen wird die Schaltung hergestellt (Abb. 5.2.16./1). Dabei ist auf richtige Polung der Fotozelle zu achten. Die erforderlichen Spannungen, einschließlich der Heizspannung, werden dem Stromversorgungsgerät entnommen. Die Anodenspannung darf 140 V nicht überschreiten, da sonst die Fotozelle zerstört werden kann.

Versuch

Die Lochscheibe (Abb. 5.2.16./2) wird auf den Lagerzapfen gesteckt, an einem Stativ befestigt und dicht vor die Fotozelle gestellt. Der Kondensor der Physikleuchte wird so eingestellt, daß ein konvergentes Lichtbündel entsteht. Man ju-

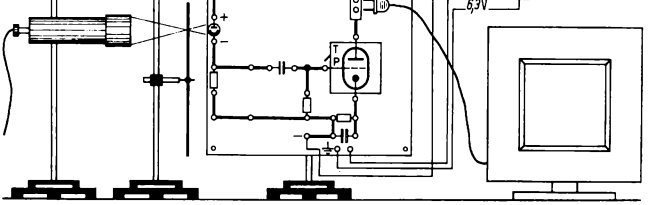


Abb. 5.2.16./3 Versuchsanordnung zur Tonwiedergabe beim Tonfilm

stiert die Leuchte so, daß die Einengung des Bündels auf die Lochreihe der Scheibe trifft. Setzt man die Scheibe in Rotation, so ist im Lautsprecher ein Ton zu hören, dessen Höhe von der Drehzahl abhängt (Abb. 5.2.16./3).

5.3. Leitungsvorgänge in festen Körpern und ihren Grenzschichten

5.3.1. Eigenleitung in Halbleitern [SE]

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (12 V —)
2. Heißleiterwiderstand
3. Spannungsmesser (20 V —)
4. Strommesser (10 mA —)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem
5. Becherglas (200 ml)
6. Maschinenöl
7. Thermometer (200 °C)
8. Stativheizplatte

Zu Versuch 3

Geräte 1., 3., 4., außerdem
9. Fotowiderstand
10. Physikleuchte

Methodische Hinweise

1. Das Ziel der Versuche liegt in der Gewinnung der Erkenntnis, daß durch Energiezufuhr in Halbleitern Ladungsträger frei werden und die Leitfähigkeit der Halbleiter wächst.
2. Die Versuche 1 und 3 zeigen diese Tatsache qualitativ für Wärme- und Lichtenergie. Der Versuch 2 ermöglicht die quantitative Erfassung der Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur.
3. Die Versuche 1 und 3 sind gut zur Problemstellung geeignet.

Versuch 1: Verhalten eines Halbleiters bei Temperaturerhöhung

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.1./1. Schon durch das Anfassen des Heißleiters mit den Fingern verringert sich sein Widerstand, und die Stromstärke wächst. Besser ist der Vorgang zu beobachten, wenn man ein brennendes Streichholz an den Heißleiter heranbringt.

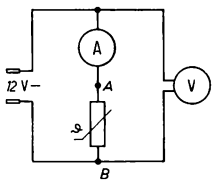


Abb. 5.3.1./1
Schaltplan zur Untersuchung eines Heißleiters

Versuch 2: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Halbleiters

Der Heißleiter wird in ein Becherglas mit etwa 50 ml Maschinenöl gebracht. Das Öl wird auf der Stativheizplatte langsam erwärmt. Zugehörige Werte von Stromstärke, Spannung und Temperatur werden in einer Tabelle erfaßt. Die Widerstände werden errechnet und ein Temperatur-Widerstandsdiagramm gezeichnet (Abb. 5.3.1./2).

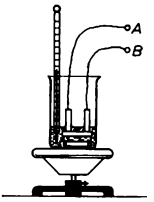


Abb. 5.3.1./2
Versuchsanordnung mit Teilen des SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

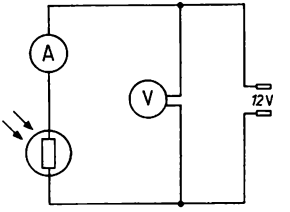


Abb. 5.3.1./3
Schaltplan zur Untersuchung eines Fotowiderstandes

Versuch 3: Wirkungsweise eines Fotowiderstandes

Nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.1./3 wird ein Stromkreis geschaltet. Bei Beleuchtung des Fotowiderstandes mit der Physikleuchte sinkt sein Widerstand, und die Stromstärke wächst.

Bemerkung zu Versuch 2

An Stelle von Öl kann man destilliertes Wasser verwenden. Mit Öl erreicht man Temperaturen über 100 °C. Als Behelfsmittel für den Heißleiter ist eine Bleistiftmine geeignet.

5.3.2. Durchlaß- und Sperrichtung an Halbleiterdioden [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Halbleiterdiode oder Selengleichrichter
3. Spannungsmesser (10 V —)
4. Strommesser (50 mA —)
5. Glühlampe (6 V; 0,05 A)

Methodische Hinweise

1. Ziel der Versuche ist es, das Verhalten von pn-Übergangszonen bei unterschiedlicher Polung zu untersuchen.
2. Der Spannungsmesser sollte in jedem Falle eingesetzt werden, um auch bei der Polung in Sperrichtung die Spannung anzuzeigen.
3. Die Versuche können auch vor der theoretischen Erklärung der Vorgänge zur Problemstellung durchgeführt werden.

Versuch

Die Schaltung wird nach dem Schaltbild in Abbildung 5.3.1./1 mit Schülergeräten oder Demonstrationsgeräten aufgebaut. Als Halbleiterdioden werden Germanium- oder Siliziumflächendioden ($I_{max} = 1$ A) empfohlen oder Selengleichrichter. Bei Punktkontaktdioden muß man auf die Anzeige durch die Glühlampe verzichten

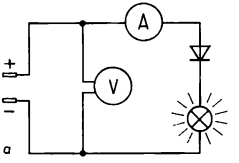


Abb. 5.3.2./1
Schaltung der Dioden
a) in Durchlaßrichtung,
b) in Sperrichtung

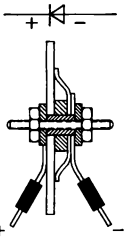


Abb. 5.3.2./2 Querschnitt und Schaltzeichen einer Selen-Gleichrichterzelle. Die Polung entspricht der Sperrichtung.

und einen entsprechenden Widerstand einsetzen, der den Strom auf die für die Diode zulässige Höchststromstärke begrenzt, z.B. $U = 6$ V, $I_{max} = 20$ mA, $R = 300\ \Omega$.
Die Spannung wird zunächst in Durchlaßrichtung angelegt (Abb. 5.3.2./1a). Die Lampe leuchtet, der Strommesser zeigt die Stromstärke des Durchlaßstroms. Dann werden die Anschlüsse an der Diode vertauscht, oder diese wird umgekehrt eingesetzt (Abb. 5.3.2./1b). Der Spannungsmesser zeigt die anliegende Spannung, die Lampe leuchtet nicht, der Strommesser zeigt den Sperrstrom, dessen Stromstärke meist kleiner als 1 mA ist.

Bemerkung

Es ist unzweckmäßig, die Spannungsquelle umzupolen, da dann viele Meßgerätetypen umgekehrt angeschlossen werden müßten.

5.3.3. Aufnahme der Kennlinie von Halbleitergleichrichtern [SE]

1. Stromversorgungsgerät (20 V —)
2. Drehwiderstand (50 Ω; 50 W)
3. Halbleitergleichrichter (1 A; 70 V)
4. Spannungsmesser (1 V; 25 V)
5. Strommesser (1 A — ; 250 μA)

Methodische Hinweise

1. Das Verhalten von Halbleiterdioden soll quantitativ erfaßt werden, nachdem es mit V 5.3.2. eingeführt ist.
2. Der Vergleich, besonders des Sperrverhaltens mit einer Röhrendiode, ist von Interesse.
3. Vergleiche V 5.2.8.!

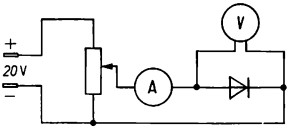


Abb. 5.3.3./1
Schaltung für Aufnahme
der Durchlaßkennlinie

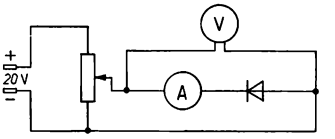


Abb. 5.3.3./2
Schaltung für Aufnahme
der Sperrkennlinie

Versuch

In der Schaltung nach dem Schaltplan (Abb. 5.3.3./1) übernimmt der im Diodenstromkreis liegende Teil des Spannungsteilers zugleich die Funktion eines Schutzwiderstandes für die Diode. Da die Diode in Durchlaßrichtung einen sehr kleinen Widerstand hat, müssen die Meßwerte für eine spannungsrichtige Schaltung eingesetzt werden.
Vor dem Einschalten stellt man den Spannungsteiler so, daß keine Spannung an der Diode liegt. Nach dem Einschalten erhöht man die Spannung stufenweise um etwa 0,005 V, bis etwa 0,5 V die höchstzulässige Stromstärke der Diode erreicht ist. Die zugeordneten Werte von Spannung und Stromstärke werden in einer Meßtabelle erfaßt und in einem Diagramm dargestellt.
Die Sperrkennlinie ist aufzunehmen, indem man die Meßgeräte nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.3./2 für stromrichtige Messung schaltet, da die Diode jetzt einen großen Widerstand besitzt. Der Strommesser muß einen Meßbereich von 250 µA haben. Die Spannung wird stufenweise um 2 V bis etwa 20 V erhöht.

Bemerkungen

1. Bei Dioden kleinerer Höchststromstärke ist ein Drehwiderstand mit größerem Widerstand zu verwenden.
2. Dioden für eine Höchststromstärke von 1 A und mehr müssen auf ein Kühlblech montiert sein.

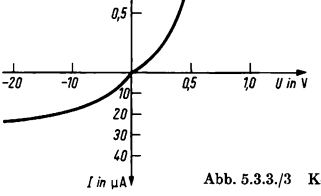


Abb. 5.3.3./3 Kennlinie einer Ge-Diode

5.3.4. Gleichrichterwirkung an Ge- bzw. Si-Flächengleichrichtern

1. Stromversorgungsgerät (120 ~ ; 20 V ~)
2. Flächengleichrichter oder Selengleichrichter
3. Glimmlampenschwenkstab oder Glimmlampenoszillograf oder Katodenstrahloszillograf
4. Spannungsmesser (50 V -- ; Nullpunktmittellage)
5. Strommesser (0,5 A — ; Nullpunktmittellage)
6. Gleitwiderstand (1300 Ω)
7. Drehspiegel
8. 2 Gleitwiderstände (110 Ω ... 300 Ω)

Methodische Hinweise

1. Die Versuche erweitern die Kenntnisse der Schüler aus den vorangehenden Versuchen, indem das Verhalten von Halbleiterdioden im Wechselstromkreis untersucht wird.
2. Versuche zur Glättung des pulsierenden Gleichstroms können analog zu den Versuchen mit Röhrendioden V 5.2.9. und V 5.2.10. durchgeführt werden.
3. Die erworbenen Kenntnisse sind durch V 5.3.5. zu überprüfen.

Variante a: Nachweis mit Glimmlampen

Der Versuch ist nur mit Gleichrichtern möglich, die für eine Spannung von über 110 V verwendbar sind. Wird die Schaltung nach Abb. 5.3.4./1 vorgenommen, so zeigt die Glimmlampe am Schwenkstab oder im Drehspiegel das Bild des pulsierenden Gleichstroms (Vorwiderstand 500 kΩ).

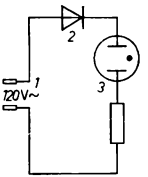


Abb. 5.3.4./1 Nachweis der Gleichrichterwirkung durch eine Glimmlampe

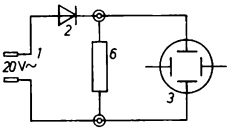


Abb. 5.3.4./2 Nachweis der Gleichrichterwirkung durch den Katodenstrahloszillografen

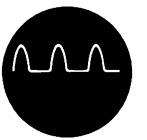


Abb. 5.3.4./3 Oszillogramm des pulsierenden Gleichstroms

Variante b: Nachweis mit Katodenstrahloszillografen

Hierbei können auch andere Typen von Flächengleichrichtern mit kleineren Sperrspannungen verwendet werden. Bei einer Schaltung nach Abbildung 5.3.4/2 ist im Oszillografen die Kurve des pulsierenden Gleichstroms zu sehen (Abb. 5.3.4/3). Der Betrag der angelegten Wechselspannung richtet sich nach dem Typ des Gleichrichters.

Variante c: Nachweis mit Meßgeräten

Falls kein Katodenstrahloszillograf zur Verfügung steht, ist es möglich, mit Meßgeräten die Gleichrichterwirkung zu zeigen. Mit einer der Anordnungen nach

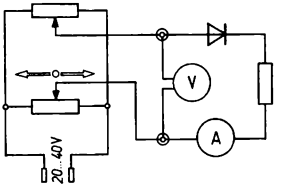


Abb. 5.3.4./4
Nachweis der Gleichrichterwirkung durch Meßgeräte

V 4.1.1. oder nach V 4.3.1. erzeugt man einen Wechselstrom kleiner Frequenz (Abb. 5.3.4./4) und richtet ihn gleich.
Der Spannungsmesser zeigt die Wechselspannung an, der Strommesser zeigt immer nur während einer Halbperiode eine Stromstärke an.

Bemerkungen

1. Will man die Frequenz des Wechselstromes konstant halten, so empfiehlt es sich, die Wechselspannung kleiner Frequenz nach V 4.1.1. zu benutzen.
2. Es ist zu beachten, daß entsprechend der Durchlaßrichtung der Dioden für den angeschlossenen Widerstand der Pluspol an der Katode der Diode liegt.
3. Die Variante c ist als Schülerexperiment geeignet.

5.3.5. Black—box—Versuch zur Diode [SE]

1. Stromversorgungsgerät (6 V —)
2. Satz black-box
3. Widerstand (50 Ω)
4. Diode
5. leere Stecker
6. Strommesser (1 A —)
7. Spannungsmesser (6 V)
8. Glühlampe (6 V; 0,5 A)

Methodischer Hinweis

Es kommt darauf an, daß die Schüler mit ihren Kenntnissen systematisch ein unbekanntes Bauelement auf seine Eigenschaften untersuchen lernen und es daran erkennen.
Der Algorithmus der Untersuchung muß vor dem Versuch erarbeitet und eine Tabelle etwa folgender Form aufgestellt werden.

anzulegende Spannung	Strom in dem Widerstand	Strom in der Unterbrechung	Strom in der Diode	in dem unbekannten Bauelement 1.	2.	3.
+ —	x	—	x			
			oder			
— +	x	—	x			
~	x	—	x			

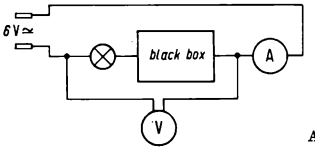


Abb. 5.3.5./1 Prüfstromkreis

Versuch

Die Schüler erhalten in 3 black-box numeriert Widerstand, Diode und leeren Stecker. Es ist ein Prüfstromkreis nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.5./1 aufzubauen. Das rationellste Verfahren der Prüfung erfolgt so, daß alle Schaltelemente zunächst an Gleichspannung in einer Polung, dann in der umgekehrten Polung und schließlich mit Wechselspannung geprüft werden.

Bemerkung

Die Aufgabe kann schwieriger gestaltet werden, indem man je eine black-box mit Kondensator und Drosselspule hinzufügt und die Glühlampe in der Schaltung fortläßt. Dann müssen die Stromstärken beachtet und der Meßbereich des Strommessers jeweils vom Bereich 1 A bis 1 mA stufenweise heruntergeschaltet werden, bis ein ablesbarer Ausschlag auftritt.

Netzspannung

5.3.6. Zweiweggleichrichtung mit zwei Dioden

1. Stromversorgungsgerät (200 V ~ ; 40 V ~)
2. U-Kern, geblättert
3. I-Kern, geblättert
4. Grundbrett mit Spannvorrichtung
5. 2 Spulen (750/1500 Wdg.)
6. 2 Dioden
7. Glimmlichtoszillograf oder Katodenstrahloszillograf oder Spannungs- und Strommesser oder Lautsprecher oder Kopfhörer

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ergänzt die Kenntnisse über technische Nutzungsmöglichkeiten von Dioden zum Aufbau von Netzgleichrichtern. Er sollte nur in Arbeitsgemeinschaften durchgeführt werden.
2. Bei Schülerexperimenten kann man nicht mit Glimmlampen arbeiten, weil die zulässige Höchstspannung 42 V ist.

Versuch

Ein Transformator wird auf geschlossenem Eisenkern aus zwei Spulen (1500/750 Wdg.) aufgebaut und nach Abbildung 5.3.6./1 geschaltet. Die primäre Wechselspannung kann etwa den doppelten Betrag der Sperrspannung der Gleichrichter haben.
Die Nachweismöglichkeiten der Gleichspannung sind V 5.3.4. zu entnehmen. Als weitere Möglichkeit ergibt sich hier die Verwendung eines hochohmigen Laut-

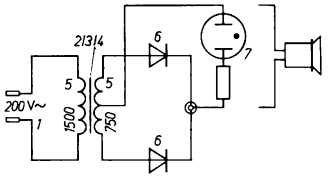
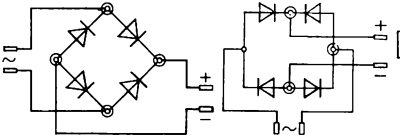


Abb. 5.3.6./1
Doppelweggleichrichtung
aus zwei Ge-Gleichrichtern



Abb. 5.3.6./2
Oszillogramm
des pulsierenden Gleichstroms

sprechers. Er ist in Abbildung 5.3.6./1 an Stelle der Glimmlampe einzusetzen. Sein Ton ist höher, als wenn man ihn direkt an die Wechselspannung anschließt. Durch den pulsierenden Gleichstrom schwingt er mit der doppelten Frequenz der Wechselspannung. Möglichkeiten der Glättung sind in V 5.2.9. und V 5.2.10. beschrieben.



Graetzschaltung | *Brückenschaltung* | *Auf gemeinsamer Achse*

Abb. 5.2.6./3
Graetz-Schaltung von vier Ge-Gleichrichtern zu einem Zweiweggleichrichter

Abb. 5.3.6./4
Brückenschaltung von vier Ge-Gleichrichtern zu einem Zweiweggleichrichter

Abb. 5.3.6./5
Schaltung von vier Ge-Gleichrichtern auf gemeinsamer Achse zu einem Zweiweggleichrichter

Bemerkungen

1. Stehen 4 Ge-Dioden oder 4 Ge-Flächengleichrichter zur Verfügung, so kann man sie zu einer Zweiweggleichrichtung nach der Graetz-Schaltung anordnen. Es bieten sich dazu verschiedene Möglichkeiten, die in den Abbildungen 5.3.6/3. bis 5.3.6./5 dargestellt sind. In den $\pm$ -Zweig lassen sich wieder die gleichen Nachweisgeräte, wie sie oben erwähnt wurden, einbauen.
2. Die in der Technik, insbesondere für kleinere Spannungen, häufig verwendeten Trockengleichrichter, die Selen- und die Kupferoxydulgleichrichter, werden vorzugsweise nach Abb. 5.3.6./5 mit gemeinsamer Achse zusammengeschaltet.

5.3.7. Untersuchung der Stromkreise am Transistor [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Transistor (100 mW ... 200 mw)
3. Drehwiderstand (100 Ω)
4. Drehwiderstand (1 kΩ)
5. Widerstand (1 kΩ)
6. Widerstand (5 kΩ)
7. 5 Vielfachmeßgeräte

Methodische Hinweise

1. Nachdem der innere Aufbau des Transistors erklärt ist, unterstützen die drei Teilversuche die Erklärung der Wirkungsweise. Die Versuche 1 und 2 zeigen im Transistor das von der Diode bekannte Verhalten von pn-Übergangszonen in Durchlaß- und Sperrichtung.
   Im Versuch 3 wird die für den Transistor typische Einwirkung des Emitterstromes auf den Basis-Kollektor-Übergang deutlich.
2. Bei diesem methodischen Vorgehen darf man keinesfalls behaupten, ein Transistor bestehe aus zwei gegeneinander geschalteten Dioden. Entscheidend ist, daß diese beiden Dioden in der Basis eine gemeinsame dünnschichtige Elektrode besitzen.

Versuchsanordnung

Im Demonstrationsversuch ist es zweckmäßig, die Drehwiderstände und Schutzwiderstände mit Teilen des SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik am Stromversorgungsgerät aufzubauen, so daß auf der Schaltplatte nur die wesentlichen Teile nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.7./1 zu sehen sind.

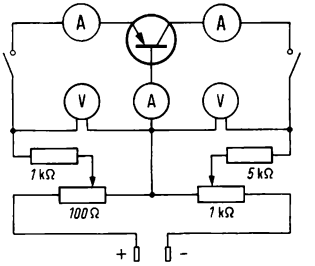


Abb. 5.3.7./1
Schaltplan zur Untersuchung der Stromkreise an einem Transistor

Versuch 1: Untersuchung des Emitterstromkreises

Der Spannungsteiler wird vor dem Einschalten so eingestellt, daß der Spannungsmesser keine Spannung anzeigt. Der Schalter wird geschlossen und die Spannung langsam heraufgesetzt. An einem p-n-p-Transistor fließt ein Emitterstrom, wenn der Pluspol am Emitter liegt. Die Emitterstromstärke darf 2 mA bis 3 mA nicht übersteigen, damit der Transistor nicht zerstört wird. Legt man den Minuspol der Spannungsquelle an den Emitter, so ist der Emitterstromkreis eines p-n-p-Transistors in Sperrichtung gepolt. Bei n-p-n-Transistoren liegen die Verhältnisse umgekehrt.

Versuch 2: Untersuchung des Kollektorstromkreises

Es wird analog zu Versuch 1 verfahren. Der Basis-Kollektor-Übergang ist in Sperrichtung geschaltet. Den Nachweis, daß er sich wie eine Diode verhält, kann man durch Umpolen der Spannungsquelle geben.

Versuch 3: Einwirkung des Emitterstromes auf den Kollektorstrom

Die Schalter bleiben zunächst geöffnet, und die Emitter- und die Kollektorspannung werden auf Null eingestellt. Dann wird der Kollektorkreis geschlossen und die Kollektorspannung auf 4 V erhöht. Es fließt kein Kollektorstrom. Nun schließt man den Emitterkreis und setzt langsam die Emitterspannung herauf. Mit dem Emitterstrom fließt jetzt der Kollektorstrom, dessen Stromstärke etwas kleiner als die des Emitterstroms ist. Die Stromstärke des Basisstromes ist sehr klein. Ihr Beitrag ist die Differenz aus Emitter- und Kollektorstromstärke.

Bemerkungen

1. Die Widerstände von 1 kΩ und 5 kΩ dienen der Strombegrenzung und der Stabilisierung der Transistoren. Man kann sie zur Vereinfachung der Schaltung fortlassen, muß aber beim Einstellen der Spannungen genau darauf achten, daß die Stromstärken nicht zu groß werden. Durch Erwärmen des Transistors können die Stromstärken ansteigen, ohne daß man die Spannung verändert.
2. Der Versuchsaufbau ermöglicht es, einzelne Kennlinien oder ein Kennlinienfeld für die Basisschaltung eines Transistors aufzunehmen.

5.3.8. Spannungsverstärkung am Transistor in Basisschaltung

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Transistor (100 mW ... 200 mW)
3. Drehwiderstand (100 Ω)
4. 2 Strommesser (1 mA; 10 mA)
5. 2 Spannungsmesser (1 V; 10 V)
6. Glühlampe (6 V; 0,05 A)
7. Widerstand (5 kΩ)
8. Widerstand (1 kΩ)

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 2., außerdem

9. Kohlekörnermikrofon
10. Eingangsübertrager (1000 Wdg./500 Wdg.)
11. Lautsprecher oder Kopfhörer

Methodischer Hinweis

Diese Versuche schließen sich unmittelbar an V 5.3.7. an. Versuch 1 soll prinzipiell zeigen, wie die Spannungsverstärkung möglich ist und wie ein Transistor als elektronischer Schalter arbeiten kann. Mit Versuch 2 wird die einfachste Form eines Verstärkers demonstriert.

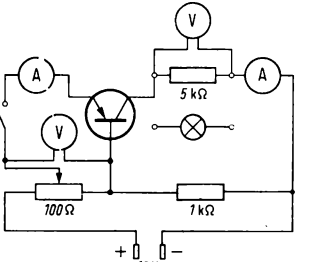


Abb. 5.3.8./1
Nachweis der Spannungsverstärkung

Versuch 1: Nachweis der Spannungsverstärkung durch Meßgeräte

In der nach Abbildung 5.3.8./1 gestalteten Schaltung wird die Emitterspannung auf Null eingestellt. Der Kollektorstromkreis und danach der Emitterstromkreis werden geschlossen. Ändert man die Emitterspannung von 0 auf 0,5 V, so tritt am Arbeitswiderstand eine Spannungsänderung von etwa 5 V auf. Es ist demnach eine etwa 10fache Spannungsverstärkung zu verzeichnen. Da die Kollektor- und die Emitterstromstärke nahezu gleich groß sind, besteht auch eine entsprechende Leistungsverstärkung. Es ist zu beachten, daß zum Steuern eines Transistors immer eine Leistung erforderlich ist.

Bemerkung

Man kann den Arbeitswiderstand durch eine Kleinspannungsglühlampe (6 V; 0,05 A) ersetzen. Die Emitterspannung wird auf etwa 0,2 V eingestellt. Durch Betätigung des Schalters im Emitterstromkreis kann man die Lampe im Kollektorstromkreis ein- und ausschalten. Dieser Versuch zeigt im Prinzip die Möglichkeit, den Transistor für Schaltzwecke zu verwenden. Die Basisschaltung ist jedoch ungünstig, da über die Schaltleitungen im Emitterkreis auch der Strom des Kollektorkreises fließt. Der Versuch 1 eignet sich auch als Schülerexperiment.

Versuch 2: Verstärkerwirkung des Transistors in Basisschaltung

Nach Abbildung 5.3.8./2 wird ein Kohlekörnermikrofon über einen Transformator aus Aufbauteilen an einen hochohmigen Lautsprecher angeschlossen. Klopft man auf das Mikrofon, so ist im Lautsprecher kaum etwas zu hören.
Nach Abbildung 5.3.8./3 wird eine Verstärkerstufe mit einem Transistor in Basisschaltung zwischen den Transformator und den Lautsprecher geschaltet. Der Spannungsteiler wird so eingestellt, daß der Emitter eine positive Vorspannung von etwa 1 V erhält. Die Mikrofonwechselspannung steuert den Emitterstrom und damit den Kollektorstrom. Infolge der Verstärkerwirkung des Transistors ergibt sich am Lautsprecher eine größere Lautstärke als bei der Schaltung nach Abbildung 5.3.8./2.

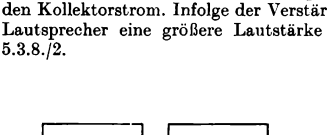


Abb. 5.3.8./2
Verbindung Mikrofon-Lautsprecher ohne Verstärkung

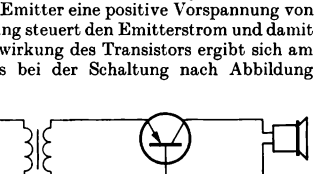


Abb. 5.3.8./3
Nachweis der Verstärkerwirkung eines Transistors

Bemerkung

Anstelle des Kohlekörnermikrofons kann man auch ein anderes Mikrofon mit Vorverstärker einsetzen. Es ist möglich, als Mikrofon einen zweiten Lautsprecher ohne den Transformator in den Emitterstromkreis zu legen.

5.3.9. Stromverstärkung am Transistor in Emitterschaltung

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (4 V — ; 12 V —)
2. Transistor (100 mW ... 200 mW)
3. Drehwiderstände (100 Ω; 1 kΩ; 10 kΩ)
4. Widerstände (1 kΩ; 10 kΩ)
5. 2 Strommesser (1 mA; 50 mA)
6. 2 Spannungsmesser (5 V; 10 V)

Zu Versuch 2

Geräte 1. und 2., außerdem

7. Widerstände (5 kΩ; 20 kΩ; 200 kΩ)
8. Elektrolytkondensator (20 μF)
9. Lautsprecher oder Kopfhörer
10. Mikrofon oder Kopfhörer als Mikrofon

Methodischer Hinweis

Ausgehend von der allgemeinen Untersuchung der Stromkreise am Transistor nach V 5.3.7. wird hier prinzipiell die Möglichkeit der Steuerung des Kollektorstroms durch den Basisstrom und die Stromverstärkung in der Emitterschaltung gezeigt. In Versuch 2 folgt dann die Anwendung in einer einfachen Verstärkerschaltung.

Versuch 1: Nachweis der Stromverstärkung am Transistor

Die Schaltung wird nach Abbildung 5.3.9./1 aufgebaut. Eine Veränderung der Basisstromstärke I_B im Bereich kleiner als 1 mA mit Hilfe des Widerstandes von 10 kΩ hat eine Änderung des Kollektorstromes I_C bis zu 30 mA zur Folge.
Beim Einstellen der Basisstromstärke muß man sehr vorsichtig sein. Durch Erwärmen des Transistors kann die Kollektorstromstärke auf unzulässig hohe Werte ansteigen.
Es ist möglich, mit der angegebenen Schaltung einzelne Kennlinien oder das Kennlinienfeld des Transistors in Emitterschaltung aufzunehmen.
Die Schaltung kann nach Abbildung 5.3.9./2 geändert werden. Die Basisspannung U_{BE} wird durch die Spannungsteilerschaltung aus dem Festwiderstand (10 kΩ) und dem verstellbaren Widerstand (10 kΩ) gewonnen.
Ein Verändern der Basisspannung hat eine Änderung der Basisstromstärke bis zu 1 mA zur Folge. Dadurch ändert sich wiederum die Kollektorstromstärke bis zu 30 mA.

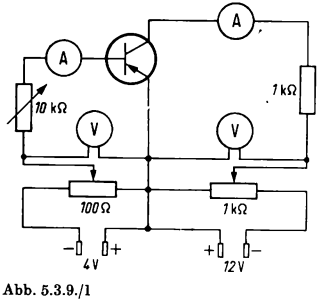


Abb. 5.3.9./1
Schaltplan zum Nachweis der Stromverstärkung und zur Kennlinienaufnahme

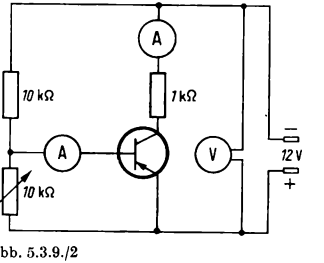


Abb. 5.3.9./2
Stromverstärkung in Emitterschaltung

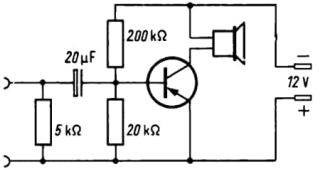


Abb. 5.3.9./3
Einstufiger Verstärker in Emitterschaltung

Versuch 2: Verstärkerwirkung eines Transistors in Emitterschaltung

Durch direkten Anschluß des Mikrofons an den Lautsprecher wird zunächst gezeigt, daß der Lautsprecher kaum einen Ton von sich gibt (vgl. V 5.3.8.).
Das Mikrofon wird dann über einen Transformator oder über einen Kondensator (Abb. 5.3.9./3) an eine Verstärkerstufe mit einem Transistor in Emitterschaltung angeschlossen. Am Lautsprecher ergibt sich eine größere Lautstärke als vorher.

Bemerkung

Der Versuch 1 eignet sich auch als Schülerexperiment.

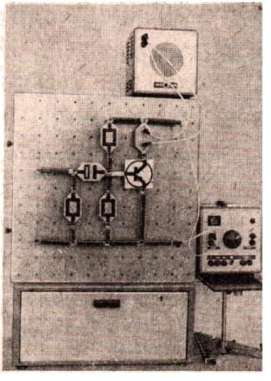


Abb. 5.3.9./4
Aufbau mit dem Tafelschaltgerät

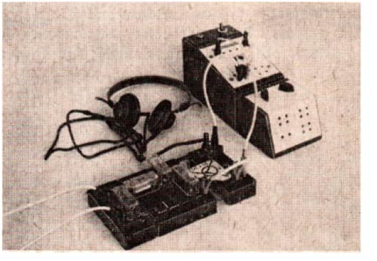


Abb. 5.3.9./5 Aufbau
mit dem SEG Halbleiter-Hochfrequenz-Elektronik

5.3.10. Transistor in Emitterschaltung als Schalter

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgerät (12 —; 6 V ~)
2. Transistor (100 mW ... 200 mW)
3. Relais
4. Glühlampe (6 V) oder Klingel
5. Kurzzeitschalter
6. Widerstände (5 kΩ; 10 kΩ)
7. Elektrolytkondensatoren (50 μF; 100 μF)

Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4., außerdem

8. Fotowiderstand
9. Widerstand (5 kΩ)
10. Physikleuchte

Zu Versuch 3

Geräte 1. bis 4., 10., außerdem

11. Fotodiode
12. Widerstände (20 kΩ; 500 kΩ)

Methodischer Hinweis

Es sollen verschiedene Möglichkeiten erläutert werden, wie die Basisspannung erzeugt und beeinflußt werden kann, um den Kollektorstrom zu steuern. Dabei werden gleichzeitig technische Anwendungen von Fotowiderstand und Fotodiode demonstriert. Die Versuche eignen sich für Arbeitsgemeinschaften.

Versuch 1: Kondensator als Basisspannungsquelle — Zeitschalter

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.10./1. Der Arbeitsstromkreis des Relais kann wie in V 5.2.15. verschiedenartig mit Glühlampe oder Klingel gestaltet werden. Durch Betätigung des Kurzzeitschalters wird der Kondensator aufgeladen. Er liefert den Emitter-Basisstrom und entlädt sich dadurch. Das Relais zieht solange an, wie die Kollektorstromstärke durch den Basisstrom einen hinreichenden Wert hat. Durch Vergrößerung der Kapazität des Kondensators oder des Widerstandes wird die Haltezeit des Relais verlängert.

Versuch 2: Erzeugung der Basisspannung mit Hilfe eines Fotowiderstandes — Lichtschranke

In der Schaltung nach Abbildung 5.3.10./2 wächst bei Beleuchtung des Fotowiderstandes die Stromstärke durch die beiden Widerstände, so daß die Spannung am

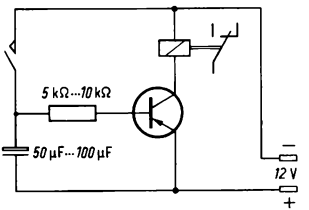


Abb. 5.3.10./1 Zeitschalter

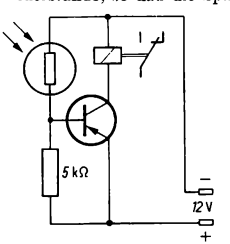


Abb. 5.3.10./2
Lichtschrankenschalter mit Fotowiderstand

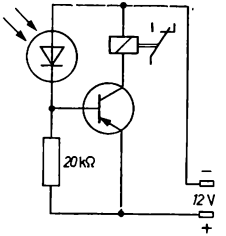


Abb. 5.3.10./3
Fotodiode in Sperrichtung als Fotowiderstand

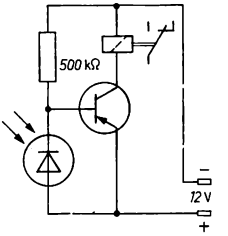


Abb. 5.3.10./4
Fotodiode als Basisspannungsquelle

Basiswiderstand (5 kΩ) größer wird. Damit wachsen die Basisstromstärke und entsprechend die Kollektorstromstärke. Das Relais zieht an. Bei Abdunklung der Beleuchtung fällt es wieder ab.
Der Versuch soll am besten im halbdunklen Raum ausgeführt werden. Die Schaltung kann so empfindlich sein, daß helles Tageslicht oder die Raumbeleuchtung wirksam wird.

Versuch 3: Erzeugung der Basisspannung mit Hilfe einer Fotodiode

Die Schaltung in Abbildung 5.3.10./3 entspricht voll dem Versuch 2. Die Fotodiode, in Sperrichtung geschaltet, erhält durch Beleuchtung einen geringeren Sperrwiderstand.
In der Schaltung nach Abbildung 5.3.10./4 arbeitet die Fotodiode als aktives Bauelement. Sie liefert bei Beleuchtung eine Spannung. Diese Spannung kann man in einem Vorversuch direkt messen, indem man die Fotodiode an einen Spannungsmesser (100 mV) anschließt und beleuchtet.
Die Versuchsdurchführung erfolgt wie bei Versuch 2. An Stelle der Fotodiode kann auch ein Halbleiterfotoelement verwendet werden, z.B. aus einem Belichtungsmesser.

Bemerkungen

1. Für diese Schaltungen müssen Transistoren mit großem Stromverstärkungsfaktor ausgesucht werden.
2. Bei der Erprobung sollte man die Kollektorstromstärke durch einen Strommesser überwachen. Die Schaltung in Versuch 1 ist unstabilisiert. Bei zu langer Betätigung des Schalters kann eine Aufheizung und Zerstörung des Transistors eintreten.
3. Für den Aufbau funktionssicherer Schaltungen durch Arbeitsgemeinschaften sind zweistufige Ausführungen zu empfehlen, wie sie in der Fachliteratur beschrieben werden.

5.3.11. Nachweis des thermoelektrischen Effektes

1. Strommesser oder Spiegelgalvanometer (1 mA)
2. Kupferdraht
3. Konstantdraht
4. 2 Holtzsche Klemmen
5. Kerze
6. Thermobügel mit Kompaßnadel
7. Bunsenbrenner

Methodischer Hinweis

Diese Versuche sind im Unterricht unter dem Aspekt von Vorgängen an Grenzschichten und unter dem Aspekt der direkten Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie zu behandeln. Außerdem erläutern sie die Möglichkeit der elektrischen Messung einer nichtelektrischen Größe (Temperatur).

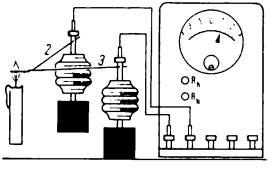


Abb. 5.3.11./1 Behelfsmäßiges Thermoelement mit Galvanometer

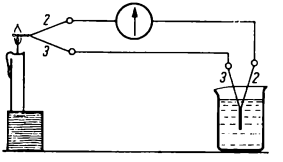


Abb. 5.3.11./2 Thermoelement mit zwei Berührungsstellen

Variante a: Verwendung eines behelfsmäßigen Thermoelements

Zum Nachweis des Thermostromes stellt man ein einfaches Thermoelement aus einem Kupfer- und einem Konstantandraht her, indem man je ein Ende der Drähte miteinander verdrillt und verlötet. Die freien Enden werden an Holtzschen Klemmen befestigt und mit dem Strommesser verbunden (Abb. 5.3.11./1). Erwärmt man die Berührungsstelle der beiden Drähte mit einer Kerzenflamme, so zeigt der Strommesser eine Stromstärke an. Dieser Versuch kann auch diadurch abgeändert und erweitert werden, daß man ein Thermoelement mit zwe Lötstellen verwendet, von denen man die eine mit Wasser oder Eis in einem Becherglas kühlt und die andere erwärmt (Abb. 5.3.11./2). Beim Vertauschen der Flamme und des Becherglases zeigt der Ausschlag des Strommessers die Umkehrung der Richtung des Thermostromes an. Nach Anbringen einer Teilung in Celsiusgraden kann diese Anordnung auch zu Temperaturmessungen verwendet werden.

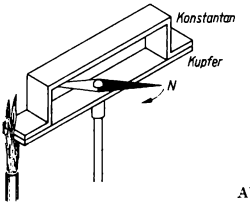


Abb. 5.3.11./3 Thermobügel

Variante b: Verwendung eines Thermobügels mit Kompaßnadel

Der Thermobügel wird in der Nord-Süd-Richtung ausgerichtet, so daß die Kompaßnadel in die Richtung des Bügels einspielt. Erhitzt man die eine Verbindungsstelle der beiden Metalle mit einer Bunsenflamme, so zeigt die Magnetnadel durch Abweichen nach einer Seite an, daß im Bügel eine Spannung vorhanden ist und somit ein Strom fließt (Abb. 5.3.11./3).
Nach welcher Seite die Magnetnadel abweicht, wird dadurch bestimmt, aus welchen beiden Metallen der Bügel besteht. Die Richtung des Stromes kann mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel festgestellt und aus der thermoelektrischen Spannungsreihe hergeleitet werden.

5.3.12. Nachweis von Wärmestrahlung mit Hilfe einer Thermosäule

Zu Variante a

1. Thermosäule auf Stativ
2. Strommesser mit Meßverstärker (2 μA) oder Spiegelgalvanometer
3. Kerze

Zu Variante b

Geräte 1., 2., 3.

Zu Variante c

Geräte 1., 2., 3., außerdem
4. Stromversorgungsgerät
5. Glühwendel
6. 2 Holtzsche Klemmen
7. großer Metallhohlspiegel
8. weiße Pappe

Zu Variante d

Geräte 1., 2. 3., außerdem
9. Infrarotstrahler

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 5.3.11.!

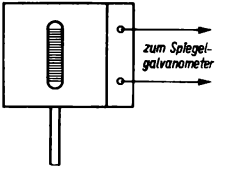


Abb. 5.3.12./1 Thermosäule

Vorbemerkung

Eine Thermosäule besteht aus einer Vielzahl hintereinandergeschalteter Thermoelemente, wobei die Lötstellen abwechselnd vor und hinter einer Platte aus Isolierstoff angeordnet sind. Das Gerät ist mit einem Kästchen verkleidet. Die Wärmestrahlen können durch einen Schlitz auf die Lötstellen der einen Seite fallen. Zur Vermeidung von Verlusten durch Reflexion sind diese Lötstellen geschwärzt. Die Thermosäule ist ein empfindliches Gerät zum Nachweis von Wärmestrahlen, das zweckmäßig in Verbindung mit einem Strommesser mit Meßverstärker oder einem Spiegelgalvanometer zu verwenden ist (Abb. 5.3.12./1).
Zum Gelingen der Versuche ist es unbedingt nötig, daß störende Wärmeströmung im Raum vermieden wird. Die Fenster sind deshalb während des Versuches geschlossen zu halten.

Variante a: Wärmestrahlung einer Flamme

Nähert man der Thermosäule die Flamme einer Kerze oder eines Streichholzes, so zeigt das Galvanometer einen deutlichen Ausschlag, der bei Annäherung der Flamme wächst.

Variante b: Abstrahlung der Körperwärme

Auch die geringe Wärmestrahlung, die vom menschlichen Körper ausgeht, kann durch Annähern der Hand an die Thermosäule nachgewiesen werden. Das Galvanometer zeigt sogar einen Ausschlag, wenn man in 1 m ... 2 m Entfernung vor der Thermosäule sein Jackett öffnet.

Variante c: Gebündelte Wärmestrahlen

Mehrere Meter von der Thermosäule entfernt wird ein Hohlspiegel aufgestellt. Zwischen zwei Holtzschen Klemmen befestigt man eine Glühwendel und bringt sie etwa in den Brennpunkt des Spiegels. Sie wird zur Rotglut gebracht. Im verdunkelten Raum justiert man den Spiegel so, daß das Bild der Wendel auf eine weiße Pappscheibe projiziert wird, die man vor den Schlitz der Thermosäule stellt. Beim Entfernen der Pappe wird die Wärmestrahlung angezeigt.

Variante d: Infrarotstrahler

Als Wärmequelle kann auch ein Infrarotstrahler mit Reflektor benutzt werden. Man richtet das Strahlenbündel aus einer Entfernung von mehreren Metern auf die Thermosäule.

Bemerkung

Mit geringerer Empfindlichkeit kann man auch ein Meßgerät ohne Meßverstärker (50 μA) verwenden.

5.3.13. Thermoelektrischer Magnet

1. Thermoelement mit Wägestück(5 kg)
2. Becherglas mit Wasser und Eis

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist gut zur Wiederholung geeignet, aber man kann ihn auch bei der Einführung zur Problemstellung vorführen.

Versuch

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 5.3.13./1 zusammengestellt. Zunächst hält man das Wägestück noch mit der Hand gegen den Thermobügel. Nach wenigen Sekunden ist der Thermostrom bereits so stark, daß die magnetische Kraft das Wägestück zu tragen vermag.
Es ist darauf zu achten, daß die innige Berührung der beiden Eisenteile gewährleistet ist; denn schon eine dünne Rostschicht kann zum Mißlingen des Versuches führen.

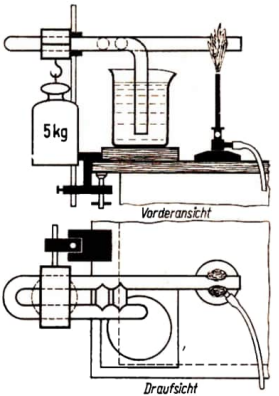


Abb. 5.3.13./1 Thermomagnet

Bemerkung

Bei anderen Ausführungen des Gerätes erfolgt eine Durchflußkühlung über Schlauchanschluß von der Wasserleitung her. Es ist eine Sicherung gegen das Herabfallen des Wägestückes angebracht.

5.3.14. Stromstärke-Spannung-Kennlinie von Fotowiderständen

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Fotowiderstand im Handapparat
3. Spannungsmesser (10 V —)
4. Strommesser (2 mA —)
5. Drehwiderstand (50 Ω)
6. Physikleuchte
7. optische Bank

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften und fakultative Lehrgänge bestimmt.
2. Der Versuch soll quantitativ die funktionale Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei konstanter Beleuchtungsstärke zeigen.
3. Nimmt man die Stromstärke-Spannung-Kennlinie für mehrere Beleuchtungsstärken auf, kann aus dem Kennlinienfeld das Verhalten des Widerstandes bei konstanter Spannung und unterschiedlichen Beleuchtungsstärken ermittelt werden.
4. Die aus dem Kennlinienfeld gewonnene Aussage über die Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke kann durch V 5.3.15. bestätigt

Versuch

Die Versuchsanordnung wird nach dem Schaltplan in Abbildung 5.3.14./1 mit Schüler- oder Demonstrationsgeräten auf eine optische Bank gebaut.
Die Spannung wird von 0 beginnend in Stufen von 1 V erhöht und die entsprechende Stromstärke abgelesen. Unterschiedliche Beleuchtungsstärken erhält man durch die Veränderung des Abstandes zwischen Lichtquelle und Fotowiderstand. Nach dem Abstandsgesetz ist

$$E = \frac{I_L}{r^2} \cos \alpha ,$$

wobei E die Beleuchtungsstärke, I_L die Lichtintensität, r der Abstand von der Lampe und α der Einstrahlwinkel ist.
Für einen Abstand von 10 cm (gemessen von der Lichtaustrittsöffnung der Leuchte bis zum lichtempfindlichen Bauelement) wurde für die Physikleuchte (12 V; 50 W) der optischen Bank eine Beleuchtungsstärke von 8000 lx und für die Experimentierleuchte zum SEG Optik eine von 200 lx gemessen.
Als Versuchsergebnis kann man ein Kennlinienfeld nach Abbildung 5.3.14./2 erhalten.

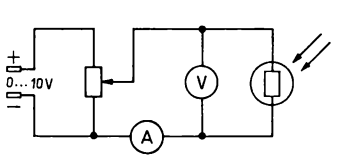


Abb. 5.3.14./1
Schaltplan für die Aufnahme der Kennlinie eines Fotowiderstandes

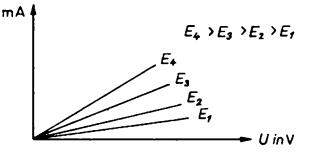


Abb. 5.3.14./2
I-U-Kennlinienfeld eines Fotowiderstandes

Bemerkungen

1. Verändert man die Beleuchtungsstärke nach dem Abstandsgesetz, so ist darauf zu achten, daß der Einstrahlwinkel $\varphi = 0°$ ($\cos \varphi = 1$) ist. Das erreicht man durch ein paralleles Lichtbündel (Linse von der Optikleuchte aus dem SEG entfernen) und ein genaues Ausrichten von Leuchte und lichtempfindlichem Bauelement.
2. Für diesen Versuch eignen sich sehr gut als Lichtquelle die Halogenlampen (55 W) von Autoscheinwerfern, die mit der zugehörigen Fassung in ein Gehäuse zu montieren sind.
3. Die Kennlinie kann auch mit dem Oszillografen dargestellt werden.
4. Das lichtempfindliche Bauelement kann auf eine Grundplatte montiert und in den Blendrahmen mit Klemmvorrichtung oder den Handapparat aus dem SEG Optik gesteckt werden.

5.3.15. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotowiderstand

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Fotowiderstand im Handapparat
3. Spannungsmesser (10 V —)
4. Strommesser (50 μA)
5. Physikleuchte
6. optische Bank

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften und fakultative Lehrgänge bestimmt.
2. Werden für die Beleuchtungsstärke die im V 5.3.14. angegebenen Richtwerte benutzt, kann nach dem Abstandsgesetz die Veränderung in bezug zur Ausgangsbeleuchtungsstärke errechnet werden.

Versuch

Der Versuchsaufbau wird nach der Versuchsanordnung in Abbildung 5.3.15./1 mit Schüler- oder Demonstrationsgeräten aufgebaut. Die Beleuchtungsstärke wird verändert und die entsprechende Fotostromstärke abgelesen.

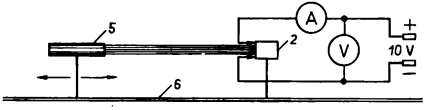


Abb. 5.3.15./1
Versuchsanordnung zur Aufnahme der Kennlinie

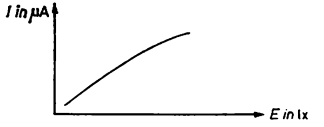


Abb. 5.3.15./2
Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotowiderstand

Bemerkung

Siehe Bemerkungen 1., 2. und 4. zu V 5.3.14.

5.3.16. Stromstärke-Spannung-Kennlinie von Fotodioden

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Fotodiode (z. B. SP 101) im Handapparat
3. Spannungsmesser (10 V —)
4. Strommesser (50 μA)
5. Drehwiderstand (50 Ω)
6. Physikleuchte
7. optische Bank

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften und fakultative Lehrgänge bestimmt.
2. Der Versuch soll quantitativ die funktionale Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei konstanter Beleuchtungsstärke zeigen.
3. Nimmt man die Stromstärke-Spannung-Kennlinien für mehrere Beleuchtungsstärken auf, kann aus dem Kennlinienfeld die Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke bei konstanter Spannung ermittelt werden.
4. Die ermittelte Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einer Fotodiode kann experimentell durch V 5.3.17. untersucht werden.
5. Die Kennlinie der Fotodiode sollte mit der Kennlinie einer Halbleitergleichrichterdiode verglichen werden.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach dem Schaltplan (Abb. 5.3.16./1). Es ist besonders darauf zu achten, daß Leuchte und Fotodiode genau ausgerichtet werden. Die Diode wird in Sperrichtung geschaltet. Der mit einer Fahne gekennzeichnete Anschluß ist die Anode. Die Spannung wird über ein Potentiometer von 0 bis 10 V eingestellt. Es ist darauf zu achten, daß — wie im Schaltplan angegeben — stromrichtig gemessen wird. Die Änderung der Beleuchtungsstärke nimmt man vor, wie im V 5.3.14. vorgeschlagen.
Die Kennlinie einer Fotodiode für verschiedene Beleuchtungsstärken zeigt Abbildung 5.3.16/2.

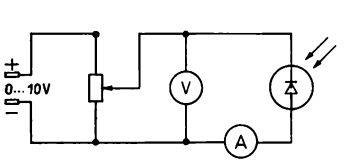


Abb. 5.3.16./1
Schaltplan für die Aufnahme der Kennlinie einer Fotodiode

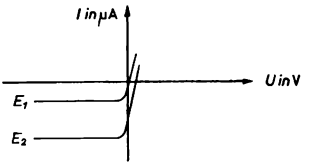


Abb. 5.3.16./2
I-U-Kennlinie einer Fotodiode

Bemerkungen

1. Siehe Bemerkungen 1., 2. und 4. zu V 5.3.14.
2. Die Kennlinie läßt sich auch oszillografisch darstellen. Dazu kann der Schaltplan nach Abbildung 5.3.16/3 benutzt werden. Dabei ist zu beachten, daß bei der oszillografischen Aufnahme die Achsen vertauscht sind.

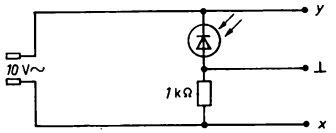


Abb. 5.3.16./3
Schaltplan zur oszillografischen Aufnahme der Kennlinie

5.3.17. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einer Fotodiode

1. Stromversorgungsgerät (10 V —)
2. Fotodiode (z.B. SP 101) im Handapparat
3. Spannungsmesser (10 V —)
4. Strommesser (50 μA)
5. Physikleuchte
6. optische Bank

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften und fakultative Lehrgänge bestimmt.
2. Mit dem Versuch soll quantitativ die funktionale Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei konstanter Sperrspannung nachgewiesen werden. Die Fotodiode wird dabei als passives Bauelement betrieben.
3. Siehe auch MH V 5.3.15.

Versuch

Der Versuchsaufbau wird nach Abbildung 5.3.15./1 aufgebaut. Anstelle des Fotowiderstandes ist die Fotodiode zu benutzen. Die Änderung der Beleuchtungsstärke nimmt man vor, wie im V 5.3.14. vorgeschlagen.

Bemerkung

Siehe Bemerkungen 1., 2. und 4. zu V 5.3.14.

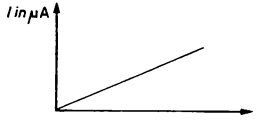


Abb. 5.3.17./1
Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einer Fotodiode

5.3.18. Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotoelement

1. Fotoelement im Handapparat
2. Strommesser (50 μA)
3. Physikleuchte
4. optische Bank

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften und fakultative Lehrgänge bestimmt.
2. Bei der Aufnahme der Abhängigkeit der Stromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotoelement kann auch die Abhängigkeit vom Lastwiderstand gezeigt werden, indem die Kennlinie bei unterschiedlichen Lastwiderständen, z.B. 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, ermittelt wird.
3. Siehe auch MH V 5.3.15.

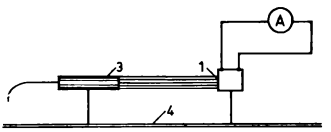


Abb. 5.3.18./1
Versuchsanordnung zur Aufnahme der Kennlinie

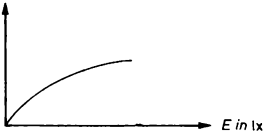


Abb. 5.3.18./2
Abhängigkeit der Fotostromstärke von der Beleuchtungsstärke bei einem Fotoelement

Versuch

Der Versuchsaufbau wird nach Abbildung 5.3.18./1 vorgenommen. Die Beleuchtungsstärke wird geändert und die entsprechende Fotostromstärke abgelesen.

Bemerkung

Siehe Bemerkungen 1., 2. und 4. zu V 5.3.14.

5.3.19. Spannung-Temperatur-Kennlinie von Thermopaaren

1. Draht (Eisen, Konstantan, Kupfer, Nickel, Nickelchrom)
2. 2 Bechergläser
3. 2 Thermometer
4. Rührer
5. Spannungsmesser (10 mV —)
6. 2 Holtzsche Klemmen
7. Bunsenbrenner
8. Eis, Wasser oder Öl

Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann im fakultativen Physiklehrgang „Elektrische Messung nichtelektrischer Größen" eingesetzt werden.
2. Der aufgenommene Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung kann zur Eichung einer Meßanordnung benutzt werden.

Versuch

Das Thermoelement wird, wie im V 5.3.11. angegeben, hergestellt. Von folgenden Thermopaaren

— Eisen-Konstantan,
— Nickel-Nickelchrom,
— Kupfer-Konstantan

kann die Spannung-Temperatur-Kennlinie aufgenommen werden. Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 5.3.19/1 aufgebaut. Die eine Verbindungsstelle des Thermoelements wird auf 0 °C gehalten, die andere wird bis auf 100 °C (bei Wasser) bzw. bis auf 180 °C (bei Öl) erhöht.
Als Versuchsergebnis erhält man Kennlinien nach Abbildung 5.3.19./2.

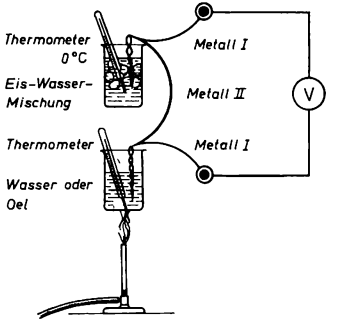


Abb. 5.3.19./1
Versuchsanordnung mit Thermoelementen

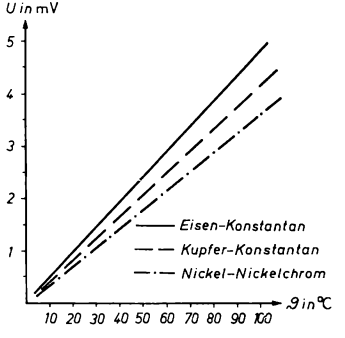


Abb. 5.3.19./2
Kennlinien von Thermopaaren

Abreißversuch 82
Akkumulator 244
Alarmanlage 282
Amplitudenglimmlampe 227
Anionen 242
Aragoscheibe 132
Arbeitskontakt 59
Asynchronmotor 178
Außenpolmaschine 171

Barkhausen-Geräusch 34
Basisschaltung 295
Bogenentladung 262
Braunsches Elektrometer 259
Brückenschaltung 104

Curie-Punkt 38

Deklination 24
Diamagnetismus 19
Dreheisenmeßwerk 63
Drehfeld 177
Drehspulmeßwerk 64
Drehstromgenerator 167, 170
Drehstrommotor 167, 178
Drehzahlregelung 155
Dreieckschaltung 172
Dreileitersystem 178
Dreiphasenwechselspannung 168
Drosselspule 200
Duodiode 275

Edison-Effekt 164
Effekt, thermoelektrischer 301
Effektivgrößen 226
Einweggleichrichter 273
Eisenkern 134
elektrische Klingel 60
Elektrolyse 245
Elektromagnet 55
elektromagnetische Induktion 87
Emitterschaltung 297
Emitterstromkreis 294
Energieübertragung 89
Erdfeld 24
Erdmagnetimus 72
Erregerfeld, homogenes 95

Fallklappe 58
Faradaysche Konstante 251
Feldlinien, magnetische 28, 42, 67
Fernleitung 88, 118
Flächengleichrichter 290
Fotodiode 300
Fotoelement 308
Fotostrom 282
Fotowiderstand 304
Fotozelle 282
Frequenz 187
Funkenentladung 262
Funkeninduktor 89, 128

Galvanoskop 53
Gasentladungsröhre 263
Geißlersche Röhre 109
Generator, magnetoelektrischer 145
Generator-Motor-Modell 137
Gleichstrom 124
Gleichstromgenerator 147
Gleichstrommotor 154
Glimmlichtoszillograf 190
Graetz-Schaltung 293

Halbleiter 286
Halbleiterdiode 187
Halbleitergleichrichter 188
Hallwachs-Effekt 281
Hauptschlußmotor 157
Heißleiter 186
homogenes Erregerfeld 95
Horizontalintensität 71
Hörnerblitzableiter 108
Hydroxid-Ionen 242
Hysteresisschleife 35

Indifferente Zone 20
Induktion, elektromagnetische 87
—, magnetische 73 ff.
Induktionsläufer 143
Induktionsofen 120
Induktionsspannung 89 ff.
induktiver Widerstand 199
Induktivität 201
Influenz, magnetische 30
Innenpolmaschine 151, 171
Ionenwanderung 239
Ionisation 260

Kapazitiver Widerstand 207
Kationen 242
Katodenstrahlen 265
Katodenstrahloszillograf 35
Klingel, elektrische 60
Knallgascoulombmeter 249
Kohlebogenlampe 110
Kollektorstromkreis 294
Kommunator 161
Kondensator 207
Koronaentladung 261
Kupfercoulombmeter 263

Leidener Flasche 128
Leistungsmesser 66
Leiter, stromdurchflossener 39 ff.

Leiterschleife, stromdurchflossene 46
Lenzsches Gesetz 102
Leuchtstoffröhre 89, 128
Lichtschranke 284
Lorentzkraft 73ff..

Magnete, drehbare 140
Magneteisenstein 17
magnetelektrischer Generator 145
Magnetflußänderung 87
magnetische Feldlinien 28, 42
magnetische Feldstärke 67
magnetische Induktion 73ff.
magnetische Influenz 30
Magnetisierung 31
Magnetismus, remanenter 37
Magnetnadel, drehbare 142
Magnetometer 68
Magnetpol 22
Marschkompaß 53
Maximalwert 227
Meßwandler 121
Metall-Ionen 242
Mikrofon 61
Mohrsche Waage 246
Morseapparat 57

Nebenschlußgenerator 152
Nebenschlußmotor 154

Örstedtscher Versuch 39
Ohmscher Widerstand 198

Parallelresonanz 224
Parallelschwingkreis 225
Paramagnetismus 19
Permeabilität, relative 82ff.
Phasenspannung 176
Phasenverschiebung 217
Phasenwinkel 11
Polreagenzpapier 243
Primärspule 106ff.
Punktschweißen 119

Reihenresonanz 224
Reihenschlußgenerator 152
Relais 59
relative Permeabilität 82ff.
remanenter Magnetismus 37
Resonanzkreis 223
Röhrenbrett 237
Ruhekontakt 59

Säurerest 242
Scheinleistung 32
Schleifenoszillograf 188
Sekundärspule 106ff.
Selbstinduktion 89, 124ff.
Sinuskurve 148
Spannung 174
Spannungsverstärkung 195
Sparschaltung 117
Spitzenentladung 162
Spule, stromdurchflossene 48ff.
Staubfiguren 195
Stern-Dreieck-Schalter 181
Sternschaltung 172
stromdurchflossene Leiter 39ff.
stromdurchflossene Leiterschleife 46
stromdurchflossene Spule 48ff.
Stromverstärkung 197
Synchronmotor 180

Tachometer 133
Telefon 61
thermoelektrischer Effekt 301
Thermoelement 230, 301
Thermomagnet 302
Thermopaar 309
Thermosäule 302
Thomsonscher Ringversuch 104
Tonfilm 284
Transformator 88, 104ff.
Transistor 194
Transistorfassung 237
Triode 177

Umspannen 107ff.

Verbundmotor 157
Verstärkerröhre 179
Vierleitersystem 176

Wagnerscher Hammer 60, 124
Waltenhofensches Pendel 89, 130
Wärmestrahlung 301
Wasserstoff-Ionen 242
Wasserzersetzungsgerät 252
Wechselspannungskurve 147
Wechselstrom 104, 184
Wechselstromgenerator 145
Wechselstrommeßgerät 229
Wechselstromsynchronmotor 159
Wechselstromwiderstand 198
Wechselstromzähler 135
Weidezaungerät 123
Weißsche Bezirke 34
Widerstand, induktiver 199
—, kapazitiver 207
—, Ohmscher 198
Wirbelströme 89, 131ff.
Wirkleistung 230
Wirkungsgrad 114

Zählanlage 282
Zone, indifferente 20
Zündanlage 122
Zungenfrequenzmesser 194
Zweiweggleichrichter 230
Zweiweggleichrichtung 175

Quellennachweis der Abbildungen

Brunstein, W., Greifswald, 1.2.1./2, 1.3.1./1, 1.3.5./2, 1.3.6./2, 1.3.9./2, 2.1.4./1, 2.1.8./3, 2.2.5./3, 2.2.11./1, 2.2.12./1, 2.4.5./2, 3.1.1./3, 3.1.1./4, 3.1.2./1, 3.1.3./2, 3.1.6./1, 3.1.6./3, 4.0.5./1, 4.0.5./2, 4.0.5./3, 4.1.5./3, 4.3.4./2, 5.0.4./2, 5.2.5./1, 5.2.5./3, 5.2.5./4, 5.2.5./5, 5.2.6./2, 5.2.9./4, 5.2.10./3, 5.2.10./4, 5.2.12./3, 5.2.12./4, 5.3.9./4, 5.3.9./5; VWV Archiv 3.2.3./3, 3.2.7./3, 5.2.5./2