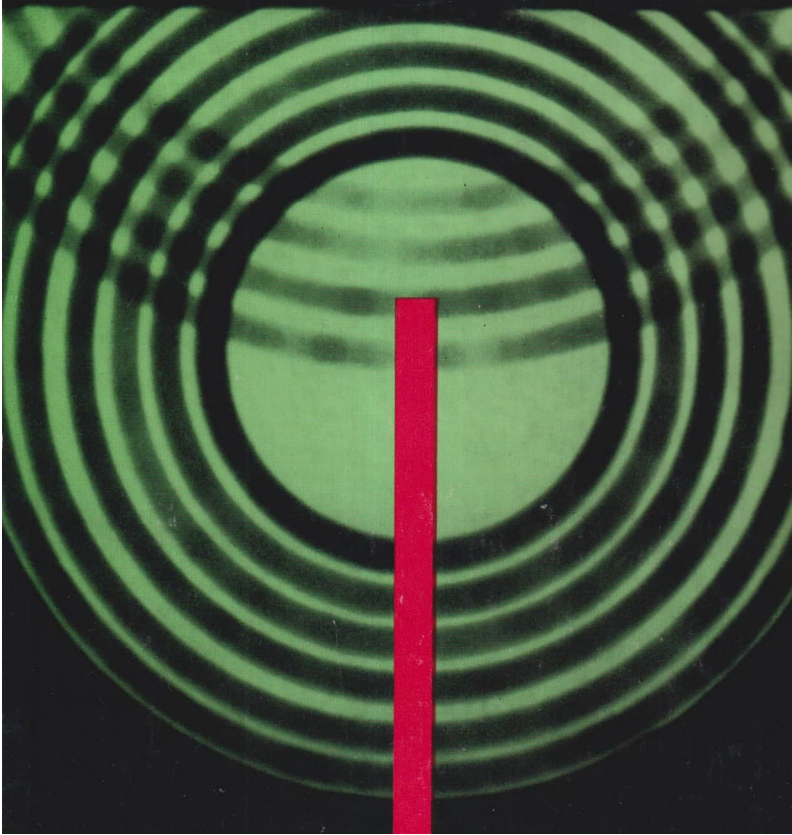


Physikalische Schulversuche

10

Wellenlehre



Physikalische Schulversuche

Zehnter Teil
Wellenlehre

Herausgegeben von Georg Sprockhoff

6. Auflage



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1982

Verfaßt von

Wolfgang Brunstein: 1.0*, V 1.1.5.*, V 1.1.9.*, V 1.2.10., V 2.2.6., V 2.2.12., 3.0., V 3.1.1., V 3.1.13., V 3.1.14., V 3.1.17. bis 3.1.21., V 3.2.1.*, V 3.2.4.*, V 3.2.6.*, V 3.2.7.*, V 3.3.8., V 3.3.9., V 3.4.1.*

Eberhard Eichler: 3.1.(V 3.1.1., V 3.1.13., V 3.1.14., 3.1.17. bis 3.1.21.)

Josef Fischer: 1.0.*, V 1.1.10., 2.0.*, V 2.2.9.

Gerhard Heise: 1.3.*

Dr. Otto Joachimi: 1.1. (V 1.1.5., V 1.1.9., V 1.1.10.)

Dr. Lothar König: 3.4. (V 3.4.1.)

Helmut Menschel: 3.3. (V 3.3.8., V 3.3.9.)

Dr. Bernhard Raabe: V 3.2.13.* bis 3.2.15.*

Helmut Roth: 1.2. (V 1.2.10.), 2.1., 2.2., (V 2.2.6., V 2.2.9., V 2.2.12.), 2.3.

Georg Sprockhoff: 1.0.*, V 1.1.9.*, 1.3.*, 2.0.*

Konrad Weber: 3.2.* (V 3.2.1., V 3.2.4., V 3.2.6., V 3.2.7.)

Die „Methodischen Hinweise“ verfaßte Wolfgang Brunstein.

Neben den Namen der Autoren sind die Nummern der von ihnen verfaßten Abschnitte und die Nummern einzelner Versuchsbeschreibungen verzeichnet, an denen sie entweder allein oder — durch einen Stern gekennzeichnet — zusammen mit einem zweiten Autor gearbeitet haben. Sofern hinter der Abschnittsnummer eine Versuchsnummer in Klammern steht, wurde die Beschreibung ganz oder teilweise von einem anderen Autor geliefert.

Durchgesehen von Dr. Bernhard Raabe

6. Auflage

Ausgabe 1967

Lizenz-Nr. 203 · 1000/81 (BN 022168-6)

LSV 0644

Redaktion: Willi Wörstenfeld

Einband: Manfred Behrendt

Zeichnungen: Heinrich Linkwitz

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“ 5820 Bad Langensalza

Schrift: 9/10 p Extended Monotype

Redaktionsschluß: 1. 12. 1980

Bestellnummer: 707 8294

DDR 12,20 M

Inhalt

Einleitung	9
1. Mechanische Wellen	11
1.0. Methodische Bemerkungen	11
1.1. Wellen an langgestreckten elastischen Körpern	12
1.1.1. Ausbreitung einer transversalen Wellenbewegung an einem Schlauch	12
1.1.2. Ausbreitung einer longitudinalen Wellenbewegung in einer Drahtwendel	13
1.1.3. Reflexion einer transversalen und einer longitudinalen Welle	14
1.1.4. Stehende rotierende Wellen — Drehwellen	16
1.1.5. Demonstration stehender Wellen mit einem Faden	17
1.1.6. Stehende Transversalwellen in einem stromdurchflossenen Draht	19
1.1.7. Stehende Longitudinalwellen in stroboskopischer Beleuchtung	20
1.1.8. Versuche mit einem Torsionswellengerät nach Julius	21
1.1.9. Modellversuche zur Polarisation von Wellen	24
1.1.10. Projektion von Wellenerscheinungen (Modellversuch)	27
1.2. Oberflächenwellen	30
1.2.0. Allgemeines über Wasserwellengeräte	30
1.2.0.1. Wasserwellengerät der Lehrmittelindustrie	30
1.2.0.2. Hinweise zum Selbstbau von Wasserwellengeräten	31
1.2.0.3. Hinweise zur Arbeit mit Wasserwellengeräten	35
1.2.1. Erzeugen von Wellengruppen und fortschreitenden Wellen	36
1.2.2. Überlagerung von Kreiswellen — Huygens-Fresnelsches Prinzip	37
1.2.3. Versuche zur Wellenausbreitung nach dem Huygensschen Prinzip	39
1.2.4. Versuche zur Reflexion von Oberflächenwellen	41
1.2.5. Versuche zur Geschwindigkeit von Oberflächenwellen	43
1.2.6. Versuche zur Brechung von Oberflächenwellen	44
1.2.7. Die Beugung von Oberflächenwellen	46
1.2.8. Stehende Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen	47
1.2.9. Versuche zum Dopplereffekt bei Oberflächenwellen	48
1.2.10. Erzeugen modellmäßiger Interferenzbilder durch Diapositive oder Folien	49
1.3. Schallwellen	52
1.3.1. Schallerzeugung durch schwingende feste Körper	52
1.3.2. Schallerzeugung durch periodische Luftstöße — Abhängigkeit der Tonhöhe von der Frequenz	54

1.3.3.	Aufzeichnen der Schwingungen einer Stimmgabel	55
1.3.4.	Aufzeichnen der Schwingungsformen von Saiten	57
1.3.5.	Aufzeichnen verschiedener Schwingungsformen durch einen Katodenstrahl- oszillografen	57
1.3.6.	Nachweis von Schallwellen durch sensitive Flammen	59
1.3.7.	Versuch zur Schallausbreitung in der Luft	60
1.3.8.	Die Luft als Träger der Schallausbreitung	60
1.3.9.	Leitung des Schalles in verschiedenen Stoffen	61
1.3.10.	Leitung des Schalles in festen Stoffen — Das Fadentelefon	62
1.3.11.	Leitung des Schalles in festen Stoffen — Übertragung der Schwingungen eines Stahlstabes durch Bindfaden	63
1.3.12.	Bestimmen der Schallgeschwindigkeit in Luft	63
1.3.13.	Bestimmen der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe Lissajousscher Figuren	64
1.3.14.	Reflexion des Schalles durch einen ebenen Spiegel	66
1.3.15.	Freihandversuch zur Reflexion des Schalles	67
1.3.16.	Die Abhängigkeit der Tonhöhe einer Saite von ihrer Beschaffenheit	68
1.3.17.	Stehende Wellen an Saiten — Obertöne	69
1.3.18.	Offene und gedackte Pfeifen	70
1.3.19.	Resonanzversuche mit Stimmgabeln	71
1.3.20.	Erregen eines Stabes zu longitudinalen Schwingungen	74
1.3.21.	Chladnische Klangfiguren an Platten	75
1.3.22.	Schwebungen durch Überlagerung der Töne zweier Stimmgabeln	77
1.3.23.	Die Kundtsche Röhre — Bestimmen der Schallgeschwindigkeit in Metall- und Glasstäben	78
1.3.24.	Die Glühdrahröhre als Kundtsche Röhre	80
1.3.25.	Die Interferenz von Schallwellen einer Stimmgabel	81
1.3.26.	Versuche mit der Interferenzröhre	82
1.3.27.	Der Doppler-Effekt	84
1.3.28.	Das Richtungshören	85
2.	Lichtwellen	87
2.0.	Methodische Bemerkungen	87
2.1.	Interferenz durch Reflexion und Brechung	89
2.1.1.	Interferenzversuch nach Lloyd	89
2.1.2.	Interferenzversuch mit dem Doppelspiegel nach Fresnel	92
2.1.3.	Interferenzversuch nach Pohl	95
2.1.4.	Interferenz durch Reflexion an einer Keilplatte (Luftkeil)	97
2.1.5.	Die Newtonschen Ringe	99
2.1.6.	Newtonsche Ringe an einer rotierenden Seifenlamelle	101
2.1.7.	Farben dünner Blättchen	103
2.1.8.	Interferenzversuch mit dem Biprisma nach Fresnel	104
2.1.9.	Die Queteletschen Ringe	105
2.1.10.	Einfache Interferometermodelle für subjektive Beobachtung	106
2.2.	Interferenz durch Beugung	109
2.2.1.	Beugung des Lichtes an einem schmalen Hindernis	109
2.2.2.	Beugung des Lichtes an einem Doppelspalt	110
2.2.3.	Beugung des Lichtes an mehreren äquidistanten Spalten	112
2.2.4.	Die experimentelle Untersuchung der Beugung des Lichtes an einem optischen Strichgitter	115

2.2.5.	Bestimmung der Lichtwellenlänge durch Beugung unter Verwendung eines Doppelkeilspaltes	118
2.2.6.	Bestimmung von Frequenzen des sichtbaren Lichtes und von Gitterkonstanten bei Verwendung von Strichgittern	119
2.2.7.	Erzeugung eines Beugungsspektrums durch ein Transmissionsgitter	122
2.2.8.	Verwendung eines Schulspektralapparates als Gitterspektralapparat	123
2.2.9.	Wellenlängenbestimmung des Lichtes mit einem Transmissionsgitter	124
2.2.10.	Der Gebrauch des Gitterspektralapparates zur Spektralanalyse	126
2.2.11.	Beugung des Lichtes an einem Reflexionsgitter	126
2.2.12.	Ermittlung der Wellenlänge durch Beugung am Reflexionsgitter	130
2.2.13.	Beugung des Lichtes an einem Kreuz- oder Punktgitter	131
2.2.14.	Beugung des Lichtes an einem schmalen Spalt	133
2.2.15.	Beugung des Lichtes an einer kreisförmigen Öffnung.	134
2.2.16.	Beugung des Lichtes am Schirmrand	135
2.3.	Polarisation von Lichtwellen — Elektro- und magneto-optische Effekte	137
2.3.1.	Nachweis der Polarisierbarkeit von Licht	137
2.3.2.	Nachweis der Polarisation des Lichtes durch einen Analysator	138
2.3.3.	Polarisation des Lichtes durch Reflexion und Brechung	140
2.3.4.	Polarisation durch Doppelbrechung	142
2.3.5.	Chromatische Polarisation	144
2.3.6.	Elektrische Doppelbrechung — Kerr-Effekt	146
2.3.7.	Interferenz im konvergenten, polarisierten Licht	147
2.3.8.	Drehung der Polarisationssebene durch eine Quarzplatte	148
2.3.9.	Drehung der Polarisationssebene durch Zuckerlösung	149
2.3.10.	Magnetische Drehung der Polarisationssebene — Faraday-Effekt	150
2.3.11.	Versuche zur Spannungsdoppelbrechung	152
3.	Hertzische Wellen	156
3.0.	Methodische Bemerkungen	156
3.1.	Elektrische Schwingungen	169
3.1.1.	Erzeugen von gedämpften Schwingungen	169
3.1.2.	Erzeugen von gedämpften Schwingungen durch die Kippschwingungen eines Oszillografen	169
3.1.3.	Einfluß eines Dämpfungswiderstandes auf gedämpfte Schwingungen	171
3.1.4.	Resonanz eines Schwingkreises mit technischem Wechselstrom	172
3.1.5.	Demonstration der Kopplungsarten	173
3.1.6.	Erregen eines Schwingkreises mit Hilfe eines Teslatransformators	174
3.1.7.	Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Röhrengenerator in Rückkopplungsschaltung	175
3.1.8.	Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Transistorgenerator in Rückkopplungsschaltung	178
3.1.9.	Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Röhrengenerator in Dreipunktschaltung (Hartley-Schaltung)	179
3.1.10.	Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Transistorgenerator in Dreipunktschaltung	180
3.1.11.	Nachweisen von hochfrequenten elektrischen Schwingungen	181
3.1.12.	Aufnahme der Resonanzkurve eines Schwingkreises	183
3.1.13.	Bestimmen der Frequenz durch Vergleich mit einer bekannten Frequenz	184
3.1.14.	Frequenzmessung durch Bestimmen des kapazitiven Widerstandes	186
3.1.15.	Erzeugen von Kippschwingungen mit Hilfe einer Glimmlampe	188

3.1.16.	Erzeugen von Rechteckimpulsen durch einen astabilen Multivibrator in Röhrenschialtung	189
3.1.17.	Der astabile Multivibrator mit Transistoren	190
3.1.18.	Erzeugen harmonischer Schwingungen durch R-C-Phasenschieberkette	192
3.1.19.	Der monostabile Multivibrator	193
3.1.20.	Der bistabile Multivibrator	194
3.1.21.	Der Schmitt-Trigger zur Umformung einer harmonischen Schwingung in eine Rechteckschwingung	195
3.2.	Die Ausbreitung Hertzscher Wellen	196
3.2.1.	Aufbau und Betrieb von UHF-Generatoren	196
3.2.2.	Nachweis der UHF-Schwingungen durch einen induktiv gekoppelten Schwingkreis	199
3.2.3.	Einfluß von Leitern und Isolatoren auf das elektromagnetische Feld	200
3.2.4.	Elektrische Wellen auf einem geschlossenen Lechersystem	201
3.2.5.	Elektrische Wellen auf einem halboffenen Lechersystem	205
3.2.6.	Schwingungen im Dipol	206
3.2.7.	Abstrahlung Hertzscher Wellen von einem Dipol	208
3.2.8.	Abstrahlung Hertzscher Wellen durch einen Teslatransformator	209
3.2.9.	Funkensender und Empfänger für Dezimeterwellen	210
3.2.10.	Untersuchung des elektromagnetischen Feldes des Dipols	212
3.2.11.	Ausbreitung Hertzscher Wellen in verschiedenen Medien	213
3.2.12.	Nachweis der Polarisierung der Hertzischen Wellen	214
3.2.13.	Reflexion Hertzscher Wellen	216
3.2.14.	Brechung Hertzscher Wellen	218
3.2.15.	Interferenz Hertzscher Wellen	220
3.3.	Die drahtlose Nachrichtenübermittlung	221
3.3.1.	Unmodulierter Tastfunk — Hochfrequenzempfang	221
3.3.2.	Unmodulierter Tastfunk — Erzeugen eines Schwebungstones	223
3.3.3.	Überlagerung von Hochfrequenzschwingungen mit einer 50-Hz-Wechselspannung	225
3.3.4.	Amplitudenmodulation einer hochfrequenten Trägerschwingung mit einer 50-Hz-Wechselspannung	225
3.3.5.	Amplitudenmodulation einer hochfrequenten Trägerschwingung durch Tonfrequenzen	228
3.3.6.	Amplitudenmodulierter Transistorsender	229
3.3.7.	Modellversuch zur drahtlosen Übermittlung von Meßwerten	230
3.3.8.	Modellversuch zur Frequenzmodulation — Modulation tonfrequenter Schwingungen	231
3.3.9.	Umsetzen einer Frequenzmodulation in eine Amplitudenmodulation	233
3.3.10.	Modellversuch zur Gleichrichtung im Empfänger	234
3.3.11.	Diodenempfänger für Sprechfunksendungen	235
3.3.12.	Audionempfänger	237
3.3.13.	Transistor-Audion mit Transistor-Verstärker	240
3.3.14.	Antennenkopplung	242
3.4.	Fernsehen	243
3.4.1.	Modellversuch zum Fernsehen mit der Nipkow-Scheibe	243
3.4.2.	Bauanleitung für die Montage der Teilschaltungen zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe	246
3.4.3.	Grundlagenversuche zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe	251
3.4.4.	Varianten zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe	255
Register		259

Einleitung

Der 10. Teil umfaßt alle Versuche zur Wellenlehre im weitesten Sinne des Wortes und stellt dadurch eine Verbindung zwischen fast allen Teilen der Physik her. Er beginnt mit ganz einfachen Wellenerscheinungen, die wegen ihrer betonten Einfachheit heute schon beinahe als trivial erscheinen. Die rein mechanischen Wellen in linearen elastischen Medien werden an ihrem einfachsten Beispiel, den Seilwellen, erläutert. Von diesen schreitet das Buch zu den Oberflächenwellen in der Grenzschicht zweier Medien, die als Wasserwellen jedem vertraut sind. Es führt weiter zu den Schallwellen. Wenn es sich in den beiden erstgenannten Gebieten vorwiegend um transversale Wellen handelt, die auch rein phänomenologisch von den Schülern als Wellen angesprochen werden, so begegnen ihnen in den Schallwellen zum ersten Male longitudinale Wellen. Auf das Gebiet der Ultraschallwellen wird nicht eingegangen. Mit den optischen Wellen lernen die Schüler ein neues Gebiet kennen, nämlich die nichtstofflichen Wellen. Das Beobachten von Interferenz- und Beugungserscheinungen zeigt den Wellencharakter des Lichtes. Die Polarisation bringt Klarheit darüber, daß die Lichtwellen transversale Wellen sind. Die schon von Maxwell 1871 vermutete elektromagnetische Natur der Lichtwellen fand ihre Bestätigung nach der Entdeckung elektromagnetischer Wellen durch Heinrich Hertz im Jahre 1889. Diesen Hertzischen Wellen ist das 3. Kapitel des Buches gewidmet; ihre Entdeckung ist eine der genialsten Taten der Experimentalphysik. Sie wird in den Versuchen des Abschnittes 3.3. gewürdigt. Auf folgende Eigenarten des Buches, die bei seiner Anlage berücksichtigt wurden, sei noch einmal hingewiesen:

1. Das Buch will ausschließlich der Durchführung von Versuchen dienen und kein Lehrbuch sein. Es vermeidet daher die Herleitung physikalischer Zusammenhänge und setzt die Kenntnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten bei seinen Lesern voraus.
2. Jede Versuchsbeschreibung ist in sich abgeschlossen und mit einer laufenden Nummer versehen. Diese besteht aus drei durch Punkte getrennte Zahlen. Die erste Zahl gibt das Kapitel, die zweite den Abschnitt, die dritte den Versuch an. Wird auf einen Versuch im Buch hingewiesen, so wird der Versuchsnummer das Zeichen V vorangesetzt, z.B. V 3.1.12. Auf Versuche aus anderen Teilbänden der „*Physikalischen Schulversuche*“ wird hingewiesen durch Angaben wie z. B. siehe 9. Teil, V 1.1.8.
3. Jedes Kapitel des Buches wird durch einen Abschnitt „*Methodische Bemerkungen*“ eingeleitet, die sich aber lediglich auf die in dem betreffenden Kapitel stehenden Versuche beziehen. Hinweise auf „*Methodische Bemerkungen*“ erfolgen durch das Zeichen MB, zum Beispiel MB 3.0.1.

4. Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit einer Aufzählung sämtlicher zum Versuch verwendeter Geräte. Sie sind mit laufenden Nummern versehen, die auch in den Abbildungen wiederkehren, wenn kenntlich gemacht werden soll, an welcher Stelle die Teile eingesetzt werden.
Die für den mechanischen Aufbau verwendeten Teile des Stativmaterials und Verbindungsleitungen sind nicht in den Gerätelisten enthalten, weil es selbstverständlich erscheint, daß dieses Material in ausreichender Menge zur Verfügung stehen muß und für die gleiche Versuchsanordnung jeweils verschiedene Varianten möglich sind. Stativteile sind nur dann erwähnt, wenn sie zweckentfremdet, z. B. als Dipole, eingesetzt werden.
5. Die in den Gerätelisten angegebenen Gerätedaten sind bis auf wenige Ausnahmen, die besonders genannt werden, nicht als verbindlich zu betrachten. Ihre Angaben dienen zur Orientierung. Die Geräte können durch andere gleichartige ersetzt werden.
6. Das hinter einem Gerät stehende Zeichen \textcircled{S} bedeutet, daß das Gerät zur Selbstherstellung empfohlen wird.
7. Sämtliche Längen in den Zeichnungen werden den Normen entsprechend in Millimetern angegeben.
8. Den Versuchsbeschreibungen sind in den meisten Fällen „*Methodische Hinweise*“ vorangestellt, die dem Leser Hinweise geben über den Zweck des Versuchs bzw. wo und wie der Versuch eingesetzt werden kann.
9. Zusätzliche Ausführungen, die über die eigentlichen Versuchsbeschreibungen hinausgehen, erscheinen unter der Überschrift „Bemerkungen“.
10. Versuche, die sich für Schülerexperimente, Arbeitsgemeinschaften, Schulpraktika oder für größere Hausversuche eignen, werden durch das in der Versuchsüberschrift beigefügte Zeichen [SE] gekennzeichnet. Selbstverständlich können diese Versuche auch als Demonstrationsversuche durchgeführt werden.
11. Auf Gefahrenmomente wird durch besondere Marken hingewiesen, die hinter den Überschriften angebracht sind. Diese Gefahren erwachsen vorwiegend aus höheren elektrischen Spannungen. Bei dieser Gelegenheit sei auch auf die gesetzlichen Vorschriften für den Betrieb funktstörender Erzeugnisse, die in MB 3.0.1. erwähnt werden, ausdrücklich hingewiesen.

1. Mechanische Wellen

1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.1. Das erste Kapitel beschäftigt sich mit den Wellen in der stofflichen Materie, und zwar der erste Abschnitt mit *Wellen an langgestreckten elastischen Körpern*. Der Prototyp dieser Wellen sind die Seilwellen. An Stelle des Seils können auch ein Schlauch, eine lange Drahtwendel oder ein gespannter Faden treten. Die Versuche mit den Seilwellen zählen zu den klassischen Versuchen der Wellenlehre; sie dienen von jeher zur Einführung in dieses Stoffgebiet. Die Entwicklung der Begriffe der *transversalen* und der *longitudinalen Welle* sowie der *stehenden Wellen* wird an ihnen durchgeführt. Die früher üblichen Wellenmaschinen werden nicht behandelt, da bei ihnen Wellen im eigentlichen Sinne kaum auftreten. Es fehlt bei ihnen nämlich die Kopplung zwischen den schwingenden Körpern. Diese — meist handelt es sich um bifilar aufgehängte Pendel — werden nacheinander angestoßen und geraten in Schwingungen, so daß zwar das Bild einer Welle entsteht, eine solche aber in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist. Anders liegt der Fall bei den Geräten, die zum Veranschaulichen von Longitudinalwellen in einer Drahtwendel dienen, wie es dem V 1.1.7. zugrunde liegt. Zum Erzeugen von Transversalwellen ist das Torsionswellengerät nach Julius geeignet. Es wird in V 1.1.8. beschrieben. Bei ihm durchläuft eine Welle in vertikaler Richtung eine Reihe parallel übereinanderliegender Holzleisten, die senkrecht untereinander an zwei Bindfäden befestigt und durch sie gekoppelt sind.

V 1.1.10. beschreibt Geräte, die mit Hilfe eines Projektionsapparates im Lichtbild Wellenerscheinungen hervorrufen können. Auch bei ihnen ist eine eigentliche Welle nicht vorhanden, doch haben die Versuche ganz den Charakter von Modellversuchen und lassen das Entstehen einer Welle aus Schwingungen deutlich erkennen. Ein Vorzug der Geräte ist die Möglichkeit, die Schwingungen und Wellenbewegungen beliebig langsam vorführen zu können. Bei der Ausbreitung von Raumwellen stimmt die Schwingungsrichtung nicht ganz mit der Ausbreitungsrichtung überein, was jedoch für das Verstehen des Vorgangs nicht von Bedeutung ist.

1.0.2. Mit dem zweiten Abschnitt, der die *Oberflächenwellen*, insbesondere die *Wasserwellen*, zum Gegenstand hat, wendet sich das Buch den Erscheinungen zu, die eigentlich der Ursprung des Begriffs „Welle“ sind. Es werden in erster Linie die Wasserwellen dazu herangezogen, Wellenerscheinungen zu studieren, und sie werden immer wieder als Analogon für optische Wellen und für Hertzsche Wellen genutzt. Wenn man die Analogiebetrachtungen zu weit treibt, besteht darin für die Wellenoptik aber eine gewisse Gefahr, da die Schüler zu leicht geneigt sind, die Wasserwellen als Modell für alle anderen Wellenerscheinungen zu betrachten. Wasserwellen werden im allgemeinen kontinuierlich mechanisch erregt, während die elektromagnetischen Lichtwellen diskontinuierlich aus den Änderungen der

Energieniveaus von Elektronen in der Atomhülle entstehen. So ist es erheblich schwieriger, bei Lichtwellen die für die Interferenz notwendige Kohärenz der Wellen zu erreichen.

Ungeachtet dieser Schwierigkeiten werden die Wasserwellen oder allgemeiner die Flüssigkeitswellen im Unterricht stets ihre Bedeutung als Analogon von Wellenvorgängen behalten, da sie den Vorzug großer Anschaulichkeit haben. Pflicht des Lehrers allerdings ist es, seine Schüler auf die zu anderen Wellenerscheinungen bestehenden Unterschiede hinzuweisen und sie vor Fehlschlüssen zu bewahren.

1.0.3. Obwohl nach unseren Lehrplänen das Gebiet der Akustik nicht als gesonderte Stoffeinheit behandelt wird, bringt der dritte Abschnitt eine Reihe von Versuchen zur Akustik. Diese können zum größten Teil bei der Behandlung der mechanischen Wellen im Unterricht vorgeführt werden, oder sie stellen Analogien zu anderen Gebieten, wie Hertzsche Wellen oder Atomphysik, dar. Daneben ist es möglich, die Versuche zur Akustik in Arbeitsgemeinschaften einzusetzen.

Die ersten fünf Versuche befassen sich mit der Schallerzeugung, d. h., es wird demonstriert, daß Schwingungen zur Ausbreitung von Schallwellen führen. V 1.3.6. bis 1.3.11. zeigen die Ausbreitung von Schallwellen in verschiedenen Medien. V 1.3.12., 1.3.13., 1.3.18., 1.3.23., 1.3.24. und 1.3.26. sind für die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Luft geeignet, V 1.3.20 und 1.3.23 für die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in festen Stoffen.

Die Versuchsbeschreibungen dieses Abschnitts beschränken sich im allgemeinen auf die Verwendung einfacher Mittel. Es bleibt dem Experimentator überlassen, besonders in den höheren Klassen für einige Versuche andere Geräte seiner Lehrmittelsammlung, z. B. Tongeneratoren, Mikrofone, Verstärker, Katodenstrahloszillografen, Zähldekaden u. a. m., einzusetzen. Man sollte sich nicht davor scheuen, den Katodenstrahloszillografen auch schon in den unteren Klassen zu benutzen. Die Schüler arbeiten ja auch schon mit komplizierten Meßgeräten, ohne deren Aufbau und Wirkungsweise exakt zu kennen.

1.1. Wellen an langgestreckten elastischen Körpern

1.1.1. Ausbreitung einer transversalen Wellenbewegung an einem Schlauch

1. Gummischlauch (Länge etwa 4 m)
2. Hakenkörper (50 g)

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch dient dazu, in einfachster Weise das Fortschreiten einer Welle zu demonstrieren. Er ist als Einführungsversuch zum Begriff Transversalwelle geeignet.

Versuch

Ein Schlauch wird auf dem Experimentiertisch der Länge nach ausgelegt. Ein Ende läßt man ein Stück über den Tischrand hängen und beschwert es mit einem Hakenkörper (Abb. 1.1.1./1).

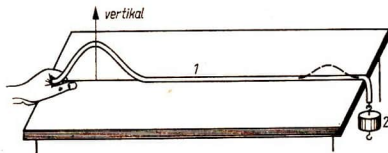


Abb. 1.1.1./1
Ausbildung eines Wellenberges
an einem Schlauch

Indem man das andere Ende mit der Hand einmal schnell auf und abwärts bewegt, erzeugt man einen Wellenberg, der mit abnehmender Amplitude über die ganze Länge des Schlauches läuft.

Führt man dasselbe zweimal hintereinander durch, so laufen zwei Wellenberge in gleichbleibendem Abstand hintereinander durch, bilden aber noch keine Welle.

Dann wird das Ende des Schlauches in raschem, gleichmäßigem Rhythmus horizontal hin und her bewegt. Es kommt eine fortschreitende Wellenbewegung zustande, deren Amplitude infolge der Reibung auf der Tischplatte stetig abnimmt. Durch diese Dämpfung tritt keine Reflexion ein (Abb. 1.1.1./2).

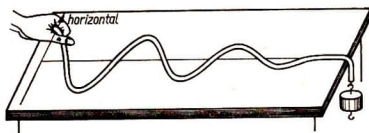


Abb. 1.1.1./2
Fortschreitende Seilwelle

Bemerkungen

1. An Stelle des Schlauches kann ein Seil verwendet werden.
2. Ein Haken kann nach Abbildung 1.1.1./3 an dem Schlauch befestigt werden. Man steckt einen Nagel durch einen passenden, durchbohrten Gummistopfen und biegt ihn zu einer Öse. Der Stopfen wird in das Schlauchende eingeklebt. Zur Sicherung kann man das Schlauchende mit Draht umwickeln.

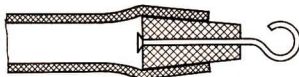


Abb. 1.1.1./3
Befestigung einer Öse am Schlauch

1.1.2. Ausbreitung einer longitudinalen Wellenbewegung in einer Drahtwendel

1. Bindfaden
2. Bienenwachs
3. Drahtwendel (\varnothing etwa 50 mm, \textcircled{S})
50 m Draht mit Durchmesser 0,6 mm; Länge der Wendel 2 m ... 3 m)
4. Brett (750 mm \times 100 mm \times 5 mm)

Methodischer Hinweis

Mit diesem Versuch kann der Begriff Longitudinalwelle eingeführt werden.

Versuch

Durch eine Drahtwendel mit einem Durchmesser von 50 mm ... 60 mm wird ein dünner, gewachster Bindfaden gezogen, der horizontal ausgespannt wird. Die Wendel wird an einem Ende in ihrer Längsrichtung leicht angestoßen, wodurch eine Verdichtung der ersten Drahtwindungen hervorgerufen wird. Diese Verdichtung läuft bis zum anderen Ende weiter. Hinter der Verdichtung verbleibt die Wendel in ihrem Ausgangszustand.

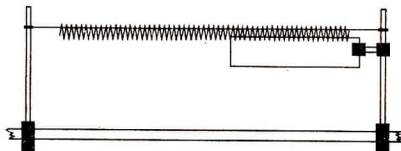


Abb. 1.1.2./1
Entstehung einer longitudinalen Welle

Darauf klemmt man an einen Stativstab ein etwa 75 cm langes schmales Brett (4), das die Wendel schräg von unten leicht berührt. Nahe ihrem Anfang steckt man ein Stäbchen durch die Wendel und erteilt ihr mit seiner Hilfe aufeinanderfolgende Impulse in der Längsrichtung. Die entstehenden Verdichtungen und Verdünnungen laufen in gleichen Abständen hintereinander durch die Wendel und bilden einen longitudinalen Wellenzug, der wegen der Reibung auf dem Brett gedämpft wird, so daß keine Reflexion eintritt.

Bemerkung

Von der Unterrichtsmittelindustrie wird eine lange Schraubenfeder angeboten, die zur Durchführung des Versuchs vorzüglich geeignet ist.

1.1.3. Reflexion einer transversalen und einer longitudinalen Welle

Zu Versuch 1

1. Gummischlauch (nach V 1.1.1.)
oder Seil
2. dicker Bindfaden (Länge 2 m)
3. feiner, trockener Sand
4. Gummistopfen

Zu Versuch 2

5. Drahtwendel (nach V 1.1.2.)
6. Zwirnfaden

Methodischer Hinweis

Der Versuch klärt in anschaulicher Weise die Erscheinungen bei der Reflexion am festen und losen Ende. Das Ergebnis des Versuches kann gedanklich auf die Reflexion räumlicher Wellen an den Trennschichten zwischen wellenmäßig dichten zu

wellenmäßig dünnen Medien (und umgekehrt) übertragen werden, wobei sich die Regel über den Phasensprung von einer halben Wellenlänge formulieren läßt.

Versuchsvorbereitung

Der 3 m ... 4 m lange Schlauch wird mit feinem, trockenem Sand gefüllt. Das offene Ende wird mit einem Gummistopfen verschlossen. An der Öse befestigt man einen etwa 2 m langen Bindfaden.

Versuch 1: Reflexion eines transversalen Impulses

Das freie Ende des Bindfadens wird an einem Wandhaken befestigt. Man faßt das Ende des Schlauches und hält ihn so, daß der Bindfaden und der Schlauch nur mäßig gespannt sind. Der nicht vermeidbare Durchhang ist bedeutungslos. Dann schlägt man von unten mit einer Holzleiste etwa 15 cm von der Hand entfernt gegen den Schlauch. Die hervorgerufene Ausbiegung nach oben durchläuft den Schlauch bis zur Anknüpfstelle des Bindfadens. Durch die Reflexion *am freien Ende* läuft eine Ausbiegung nach oben zurück (Abb. 1.1.3./1). Die Sandfüllung verzögert die Bewegung.

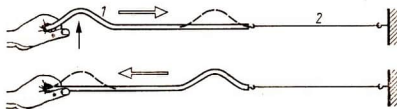


Abb. 1.1.3./1
Reflexion einer Seilwelle
am freien Ende

Der Schlauch wird dann mittels der Öse direkt an dem Wandhaken befestigt. Man verfährt ebenso wie vorhin. Durch die Reflexion *am festen Ende* läuft eine Ausbiegung nach unten zurück (Abb. 1.1.3./2).

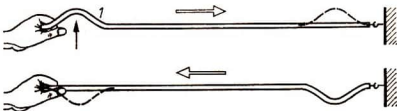


Abb. 1.1.3./2
Reflexion einer Seilwelle
am festen Ende

Versuch 2: Reflexion eines longitudinalen Impulses

Die Drahtwendel wird wie bei V 1.1.2. aufgehängt. Man stößt die erste Windung etwa 2 cm auf die Wendel zu. Dadurch entsteht eine Verdichtung, die die ganze Wendel durchläuft. Am freien Ende schwingt die Wendel frei aus. Dabei entsteht ein Impuls, der sich als Verdünnung nach rückwärts so ausbreitet, als ob an dem freien Ende gezogen worden wäre. Man erkennt den reflektierten Impuls besonders deutlich an dem angestoßenen Ende, indem dieses in der Stoßrichtung zuckt.

Zur Reflexion am festen Ende befestigt man die letzte Windung der Wendel am Stativ und wiederholt den vorigen Versuch. Der Impuls wirkt am festen Ende jetzt so, als ob dieses gestoßen würde. Dadurch kommt der reflektierte Impuls am angestoßenen Ende zum Stoß entgegengesetzt gerichtet an.

Bemerkungen

1. Der Versuch ist nach der ersten Reflexion am festen Ende abzubrechen, da die folgenden Reflexionen von der Bewegung in dem Bindfaden beeinflusst werden.
2. Zu große Spannung ist zu vermeiden, da sonst die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu groß wird.
3. Besonders gut gelingen diese Versuche, wenn man die Windungen der Wendel mit durchbohrten Bleikugeln beschwert. Die Anschaulichkeit kann durch eine Schattenprojektion wesentlich verbessert werden.

1.1.4. Stehende rotierende Wellen — Drehwellen

Geräte wie zu V 1.1.3.

Methodische Hinweise

1. Eine Reihe von Ausbreitungseigenschaften der Welle läßt sich anhand von stehenden Wellen besonders leicht demonstrieren. Hier wird die Möglichkeit, solche Wellen zu erzeugen, beschrieben.
2. Vergleiche auch V 1.1.5.!

Variante a: Stehende Drehwellen zwischen zwei festen Enden

Der Schlauch wird wie in V 1.1.3. mit Sand gefüllt und an einem Ende an einem Wandhaken befestigt. Das andere Schlauchende wird so gehalten, daß der Schlauch ziemlich schlaff durchhängt. Führt man mit der Hand kleine Kreisbewegungen in einer vertikalen Ebene aus, so entstehen Drehschwingungen, die eine stehende Welle ausbilden. Die günstigste Frequenz der Schwingungen und die zum Versuch erforderliche Schlauchspannung muß man durch Probieren selbst finden. Die stehenden Wellen umfassen ein gerades Vielfaches einer Viertelwellenlänge (Abb. 1.1.4./1a bis c).

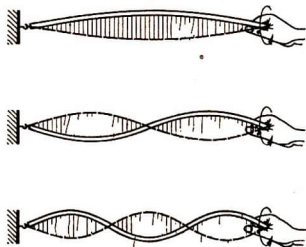


Abb. 1.1.4./1 Stehende rotierende Wellen zwischen zwei festen Enden (λ = Wellenlänge, l = Länge des Schlauches):

- a) verhältnismäßig langsames Kreisen des Schlauchendes. Ein Knoten an jedem Ende und ein Bauch in der Mitte $l = \frac{2}{4} \lambda$, Schlauchlänge 3 m,
- b) etwas schnelleres Kreisen des Schlauchendes. Drei Knoten und 2 dazwischenliegende Bäuche $l = \frac{4}{4} \lambda$, Schlauchlänge 3 m ... 3,5 m,
- c) schnelles Kreisen des Schlauchendes. Vier Knoten und drei Bäuche $l = \frac{6}{4} \lambda$, Schlauchlänge 3,5 m ... 4 m

Variante b: Stehende Drehwellen zwischen einem festen und einem freien Ende

Man befestigt den Schlauch mit einem Bindfaden wie in V 1.1.3., Versuch 1, und faßt den Schlauch etwa 3 m von der Verknüpfungsstelle. Führt man bei geringer

Spannung des Schlauches mit der Hand Kreisbewegungen aus, so bilden sich stehende Drehwellen, bei denen am Verknüpfungspunkt des Schlauches und des Bindfadens immer ein Bauch liegt (Abb. 1.1.4./2). Sie umfassen ein ungerades Vielfaches der Viertelwellenlänge. In der Abbildung finden sich die Bilder der beiden häufigsten Fälle dieser Art.

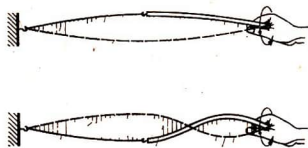


Abb. 1.1.4./2 Stehende rotierende Welle zwischen einem festen und einem freien Ende:

a) langsames Kreisen des festgehaltenen Schlauchendes. Ein Knoten und ein Bauch

$$l = \frac{1}{4} \lambda, \text{ Schlauchlänge } 3 \text{ m,}$$

b) etwas schnelleres Kreisen des Schlauchendes. Zwei Knoten und zwei Bäuche

$$l = \frac{3}{4} \lambda, \text{ Schlauchlänge } 3 \text{ m}$$

1.1.5. Demonstration stehender Wellen mit einem Faden

Zu Variante a

- | | |
|--|---------------------|
| 1. Weißer Wollfaden oder weiß umspinnener Gummifaden | 3. Anschlaghammer |
| 2. Stimmgabel (128 Hz) mit seitlicher Befestigungsschraube | 4. Federkraftmesser |

Zu Variante b

- | | |
|---------------------------------|--|
| Geräte 1. u. 4., außerdem | 9. Blattfeder mit Schaft und Steckbuchse |
| 5. Stromversorgungsgerät (8 V—) | 10. Klemmenstange |
| 6. Schalter | 11. Kontaktschraubenträger mit Kontaktschraube |
| 7. Spule (500 Wdg.) | |
| 8. I-Kern, geblättert | |

Zu Variante c

- | | |
|--|---|
| Geräte 1. u. 4. bis 6., außerdem | 13. Schiebewiderstand (300 Ω) |
| 12. Elektromotor (Experimentiermotor oder Nebenschlußmotor aus Aufbauteilen) | 14. Mitnehmerscheibe mit leichtbeweglicher Öse aus Draht $\text{\textcircled{S}}$ |

Methodischer Hinweis

Siehe V 1.1.4.!

Versuchs anordnung

Ein weißer Wollfaden oder ein weiß umspinnener Gummifaden mit einer Länge von etwa 2,20 m wird mittels der Befestigungsschraube an die Stimmgabel ge-

klemmt (Abb. 1.1.5./1). Der Faden wird horizontal gespannt, indem man sein anderes Ende um eine Rolle nach oben führt und an einem Kraftmesser befestigt. Durch Verschieben des Kraftmessers kann man die Spannung des Fadens ändern.

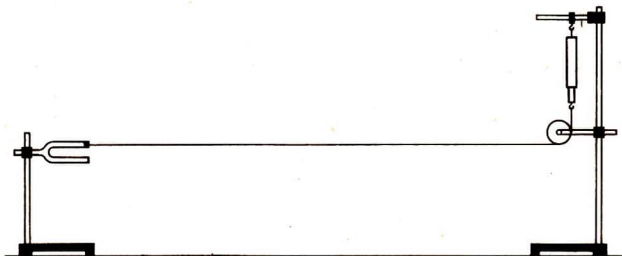


Abb. 1.1.5./1 Erzeugen stehender Wellen durch eine Stimmgabel

Variante a

Nach dem Erregen der Stimmgabel mit einem Anschlaghammer wird eines der Stative langsam in Richtung des Fadens verschoben. Sobald Resonanz zwischen den Schwingungen der Stimmgabel und den Oberschwingungen des Fadens vorhanden ist, treten stehende Wellen auf.

Variante b

Man kann den Versuch auch mit Hilfe eines Wagnerschen Hammers ausführen, den man aus Aufbauteilen zusammenstellt (Abb. 1.1.5./2). Über den Wagnerschen Hammer siehe 9. Teil, V 1.3.6. Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.1.5./1, der Wollfaden wird an die Blattfeder geknüpft.

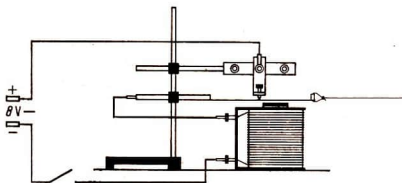


Abb. 1.1.5./2
Wagnerscher Hammer

Variante c

Man kann stehende Wellen auf einem Gummifaden auch durch einen Elektromotor erzeugen (Abb. 1.1.5./3). Man versieht zu diesem Zweck den Elektromotor mit einer Mitnehmerscheibe, in die exzentrisch eine leicht drehbare Öse eingesetzt wird. An diese Öse knüpft man das Fadenende. Auf diese Weise wird eine Drillung des Gummi-

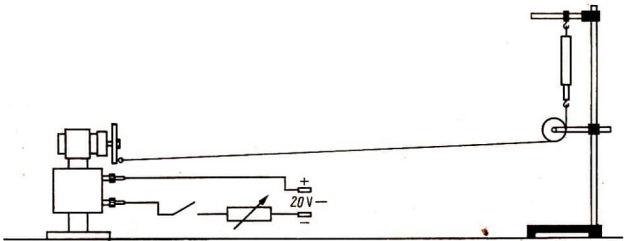


Abb. 1.1.5./3 Erzeugen rotierender Wellen durch einen Elektromotor

fadens verhindert. Der Gummifaden wird wie bei den vorangehenden Versuchen schwach gespannt und der Motor eingeschaltet. Es bilden sich stehende, spindel-förmige Wellen am Gummifaden aus, wenn die Drehzahl des Motors mit der Eigenfrequenz des Gummifadens übereinstimmt. Das erreicht man durch Veränderung der Fadenspannung oder der Drehzahl des Motors.

1.1.6. Stehende Transversalwellen in einem stromdurchflossenen Draht

- | | |
|--|-------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (20 V ~) | 5. Hufeisenmagnet |
| 2. 2 Holzsche Klemmen | 6. Holzunterlagen |
| 3. Kupferdraht (\varnothing 0,2 mm; Länge 120 cm) | 7. Schalter |
| 4. Schiebewiderstand (11 Ω ; 2,8 A) | |

Methodischer Hinweis

Die Versuchsanordnung ergibt ein sehr eindrucksvolles Bild der stehenden Welle. Es ist jedoch zu beachten, daß der eingespannte Kupferdraht leicht reißt.

Versuch

Ein etwa 120 cm langer und 0,2 mm dicker Kupferdraht wird zwischen zwei Holz-schen Klemmen ausgespannt und über einen Schiebewiderstand und einen Schalter an eine Wechselspannung von 20 V angeschlossen (Abb. 1.1.6./1). Ungefähr in der

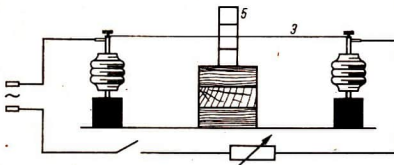


Abb. 1.1.6./1
Ausbildung stehender Transversalwellen an einem strom-durchflossenen Draht

Mitte des Drahtes wird auf Holzunterlagen ein Hufeisenpermanentmagnet so aufgestellt, daß der Draht in dem Zwischenraum zwischen den Polen hängt. Bei voll eingeschaltetem Widerstand wird der Stromkreis geschlossen und dann die Stromstärke so eingestellt, daß sich stehende Wellen bilden. Indem man eine Holtzsche Klemme entsprechend verschiebt, gleicht man die Längenzunahme des Drahtes durch die Erwärmung aus und kann den Draht so spannen, daß verschiedene Anzahlen von Schwingungsknoten entstehen. Man kann die Stromstärke so erhöhen, daß der Draht an den Knoten zum Glühen kommt, während die Schwingungsbäuche durch die heftige Bewegung des Drahtes so stark gekühlt werden, daß sie nicht glühen. Die Stromstärke und die Drahtspannung sind dabei sehr vorsichtig einzustellen, da sich der Draht trotz größerer Stromstärke infolge der wachsenden Amplitude abkühlt und verkürzt. So kann er leicht in einem der glühenden Schwingungsknoten reißen.

1.1.7. Stehende Longitudinalwellen in stroboskopischer Beleuchtung

- | | |
|--|---|
| 1. Optische Bank | 7. Stimmgabel ($\nu = 128 \text{ Hz}$) |
| 2. Physikleuchte mit Transformator | 8. Anschlaghammer |
| 3. Stromversorgungsgerät | 9. stroboskopische Lochscheibe mit Motor |
| 4. Doppelkondensator | 10. Projektionsschirm |
| 5. Bikonvexlinse ($f = 100 \text{ mm}$) | 11. Schiebewiderstand (1300 Ω ; 0,7 A) |
| 6. Schraubenfeder aus Stahl (Länge 300 mm; Durchmesser 25 mm; Drahtdurchmesser 0,4 mm) | 12. Schalter |

Methodischer Hinweis

Hier wird durch den stroboskopischen Effekt ein scheinbar ruhiges Bild der stehenden Welle sichtbar.

Versuchsanordnung

Die Schraubenfeder wird nach Abbildung 1.1.7./1 zwischen einem Ring mit Haken und einer Stimmgabel befestigt. Auf einer optischen Bank wird eine Projektionseinrichtung zusammengestellt und das mittlere Stück der Schraubenfeder in das konvergente Lichtbündel des Kondensators gesetzt (Abb. 1.1.7./2). Dicht hinter die

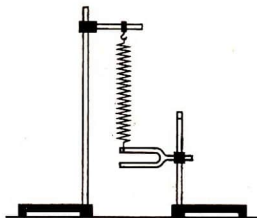


Abb. 1.1.7./1
Vertikale Anordnung der Schraubenfeder

Projektionslinse wird die stroboskopische Lochscheibe gestellt, so daß der Strahlengang durch einen Ausschnitt der Lochscheibe hindurchgeht und die Drahtwendel auf dem Projektionsschirm abgebildet wird.

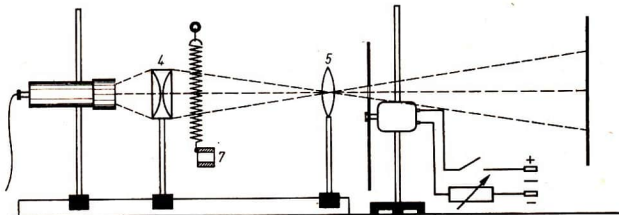


Abb. 1.1.7./2 Nachweis der Bewegung der Drahtwindungen bei einer stehenden longitudinalen Welle

Versuch

Die Stimmgabel wird durch den Anschlaghammer in Schwingungen versetzt. Die Knoten der stehenden longitudinalen Welle werden scharf und die dazwischenliegenden Bäuche verschwommen abgebildet. Darauf wird die Lochscheibe in Rotation versetzt und ihre Drehzahl durch den Schiebewiderstand so eingestellt, daß der stroboskopische Effekt auftritt und die Schwingungen langsam sichtbar werden. Die Windungen zu beiden Seiten eines Knotens bewegen sich in entgegengesetzter Richtung. In der Nähe der Knoten kommt es abwechselnd zu Verdichtungen und Verdünnungen.

Bemerkung

Man geht zweckmäßig von der maximalen Drehgeschwindigkeit der Lochscheibe aus und verringert sie langsam, bis der stroboskopische Effekt erreicht ist.

1.1.8. Versuche mit einem Torsionswellengerät nach Julius

1. 31 Holzleisten (300 mm × 20 mm × 10 mm)
2. Schnur (Länge 6 m; \varnothing 1 mm)
3. Schnur (Länge 800 mm; \varnothing 1 mm)
4. 4 kleine Metallringe (Vorhangringe)
5. Wägestücke (2 × 0,5 kg; 1 kg; 2 kg)
6. 30 Blechstreifen (50 mm × 10 mm)
7. 30 Manipermhaftsteine
8. Holzstifte, Alleskleber
9. 31 quadratische weiße Scheiben aus Karton, Plast oder Blech

Methodische Hinweise

1. Obgleich die Unterrichtsmittelindustrie ein Gerät nach Julius anbietet, wird hier der Selbstbau des Gerätes beschrieben, weil es noch einige Möglichkeiten mehr als das industrielle Gerät bietet: variable Aufhängung am oberen Ende, Darstellung verschiedener Medien.
2. Im Gerät werden eigentlich Torsionsschwingungen der einzelnen Stäbe erzeugt. Der Anblick der Stirnseiten der Stäbe ergibt aber das Bild der Transversalwelle.
3. Das Gerät eignet sich sehr gut, alle Grundbegriffe der Welle einzuführen.

Herstellung des Gerätes

31 Holzleisten von den gegebenen Ausmaßen werden nach Abbildung 1.1.8./1 für die Aufnahme der Schnüre durchbohrt. Die Befestigung der Schnüre und der Ringe an den beiden Endleisten erfolgt nach Abbildung 1.1.8./2. Man keilt die Schnüre mit Holzstiften fest, die man mit Alleskleber bestrichen hat. Der Zwischenraum zwischen zwei Leisten beträgt 40 mm.



Abb. 1.1.8./1
Anbringen der Bohrungen in einer Leiste

Mit den oberen Ringen kann die Leistenreihe an zwei von einem hohen Stativ getragene Ringe mit Haken gehängt werden; das obere Ende wird dadurch festgelegt (Abb. 1.1.8./3a). Soll es frei sein, so wird es mit Hilfe einer Schnur aufgehängt (Abb. 1.1.8./3b). An die vom Stativ abgewandten Stirnflächen der Leisten klebt man kleine weiße, quadratische Scheiben und wendet diese Seite der Anordnung den Schülern zu (Abb. 1.1.8./3c). Man gibt der Leistenreihe eine Spannung, indem man Wägestücke anhängt (0,5 kg ... 1 kg).

Versuche

Mit Hilfe des Juliusschen Gerätes können Torsionswellen erzeugt werden, die aber im Erscheinungsbild durchaus den Eindruck transversaler Wellen machen. Auf folgende Versuche sei besonders hingewiesen:

1. Ausbreitung transversaler Wellen und Reflexion am festen Ende

Man dreht die unterste Leiste mit der Hand um etwa 90° und wieder in die Ausgangslage zurück. Dieser Impuls durchläuft infolge der Kopplung durch die Schnüre das Wellengerät und erreicht das obere feste Ende. Er wird unter Phasenwechsel reflektiert und kehrt mit entgegengesetzter Phase zurück.

2. Ausbreitung transversaler Wellen und Reflexion am freien Ende

Wird die oberste Leiste freigegeben und der untersten Leiste ein Drehimpuls wie bei 1. erteilt, so sieht man, daß am losen Ende eine Reflexion ohne Phasenumkehr stattfindet.

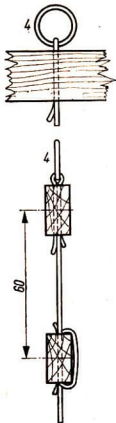
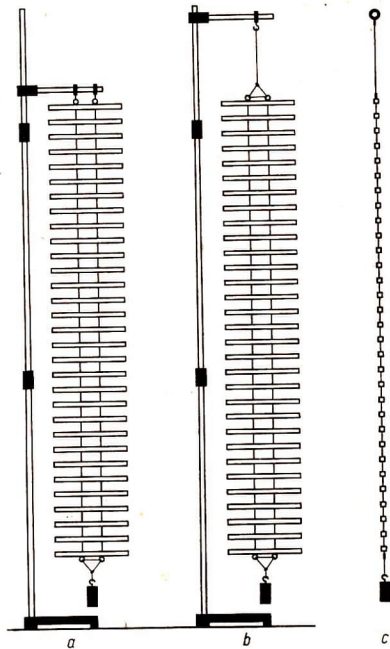


Abb. 1.1.8./2
Befestigen der Schnüre in
den Bohrungen

Abb. 1.1.8./3
Das fertige Wellengerät,
aufgehängt an
a) einem festen Ende,
b) einem freien Ende,
c) Blick auf die Stirnseiten
der Leisten



3. Erregung stehender Wellen mit Reflexion am festen oder am freien Ende

Dreht man die unterste Leiste rhythmisch hin und her und wählt dabei eine passende Frequenz, so entsteht durch Reflexion am oberen Ende eine stehende Transversalwelle. Man kann mit Reflexion am festen oder losen Ende arbeiten.

4. Ausbreitung einer transversalen Welle im inhomogenen Medium

Um den Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes modellmäßig zu zeigen, vergrößert man bei den oberen oder den unteren 15 Leisten das Trägheitsmoment. Dazu dienen Reiter aus Eisenblech mit Manipierstücken nach Abbildung 1.1.8./4. Auf die Leisten wird an jedes Ende ein Reiter gesetzt.

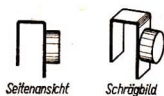


Abb. 1.1.8./4 Reiter zum Anhängen an die Leisten

5) Einfluß der Schnurspannung auf die Wellenlänge

Die Schnurspannung kann man durch Austauschen der Wägestücke verändern. Dadurch wird die Wellenlänge beeinflusst.

1.1.9. Modellversuche zur Polarisation von Wellen

Zu Variante a

1. Gummischlauch (Länge 3 m ... 4 m, nach V 1.1.1.)
2. Bindfaden

Zu Variante b

3. 4 Stativstäbe (500 mm)
4. 4 Holzklötze (S)

Zu Variante c

5. 2 quadratische Tafeln (4 mm × 140 mm × 140 mm) aus Sperrholz oder Preßspan mit je einem 100 mm langen, 3 mm breiten Schlitz (S)

Methodische Hinweise

1. Diese Versuche sind in erster Linie als Modellversuche für die Polarisation von Lichtwellen und Hertzschen Wellen zu betrachten.
2. Variante a und b sind gleichwertig, wobei die Wellen von Hand erzeugt werden. Sie sind zur Einführung gut verständlich.
3. Variante c erfordert erhöhten apparativen Aufwand. Dafür kann man an den stehenden Wellen den Vorgang ihrer Polarisation dauernd beobachten.

Freihandversuche zur Polarisation

Variante a

Ein 3 m ... 4 m langer Schlauch wird an einem Ende festgehakt. In der Nähe seiner Mitte knotet man um ihn einen Bindfaden mit zwei 500 mm langen Enden. Diese Enden werden von zwei Schülern in entgegengesetzter Richtung straff gehalten. Am freien Ende des Schlauches werden Drehwellen erzeugt. Hinter dem Knoten schwingt der Schlauch in einer Schwingungsebene, die zu den Bindfäden senkrecht steht (Abb. 1.1.9./1a).

Nun verschiebt man den Bindfaden zum Ende des ersten Drittels des Schlauches und knotet einen zweiten Bindfaden in der gleichen Weise an das Ende des zweiten Drittels. Es werden wieder Drehwellen erregt. Sie werden durch den ersten Bindfaden in Transversalwellen verwandelt, d. h., der Bindfaden wirkt als Polarisator. Wird der zweite Bindfaden parallel zu dem ersten gehalten, so schwingt der ganze Schlauch, wenn auch im letzten Drittel mit geringerer Amplitude (Abb. 1.1.9./1b). Wird der zweite Bindfaden dagegen so gedreht, daß er senkrecht zu dem ersten

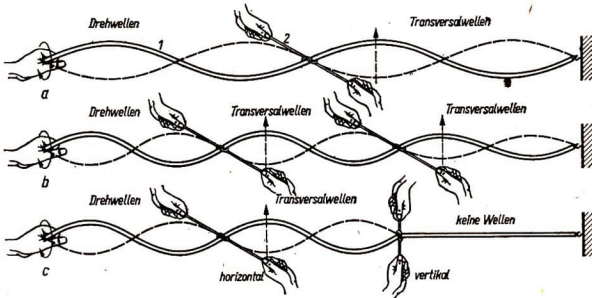


Abb. 1.1.9./1 Polarisation von Drehwellen:
a) Polarisator, b) und c) Polarisator und Analysator

steht, so kann die Transversalwelle diese Stelle nicht durchlaufen. Das dritte Schlauchstück bleibt in Ruhe (Abb. 1.1.9./1c). Der zweite Bindfaden dient als Analysator.

Variante b

Man kann den Versuch auch durchführen, indem zwei Schüler je zwei Stativstäbe ergreifen, so daß die beiden Stäbe in einem Abstand von etwa 1 cm parallel laufen. Als Hilfsmittel dazu kann man sich vier Holzklötze anfertigen mit je zwei Bohrungen vom Durchmesser der Stativstäbe und einem dem Schlauch entsprechenden Abstand. Es ist darauf zu achten, daß der Schlauch nur in einer Ebene schwingt. Es lassen sich folgende Versuche damit ausführen:

1. Modell des Polarisators — Einsatz eines Stangenpaares

Ein Stangenpaar wird etwa in die Mitte des Schlauches gebracht.

Die Stangen werden parallel zur Schwingungsebene der anlaufenden Welle gebracht. Die Wellen passieren ungehindert.

Die Stangen werden unter einem Winkel von 90° zur Schwingungsebene der anlaufenden Welle gehalten. Der Schlauch bleibt hinter dem Stangenpaar in Ruhe. Ein Polarisator läßt Wellen, die unter 90° zu seiner Durchlaßrichtung schwingen, nicht hindurch.

Die Stangen werden in einem Winkel von 45° zur Schwingungsebene der anlaufenden Welle gehalten. Hinter dem Stangenpaar liegt die Schwingungsebene parallel zu den Stangen. Die Schwingungsebene wird in die Durchlaßrichtung gedreht, d. h., nur die zu den Stangen parallele Komponente wird hindurchgelassen.

2. Zusammenwirken von Polarisator und Analysator — Einsatz von zwei Stangenpaaren

Die Stangenpaare werden von den Schülern so gehalten, daß drei etwa gleich große Abschnitte auf dem Schlauch entstehen (Abb. 1.1.9./2). Das erste Stangenpaar

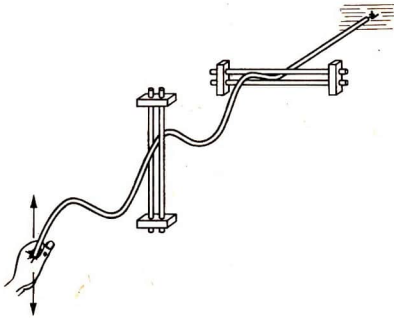


Abb. 1.1.9./2
Polarisation einer Seilwelle durch
parallele Stativstäbe

dient als Polarisator. Es dreht die Schwingungsebene einer anlaufenden Welle in seine Durchlaßrichtung.

Das zweite Stangenpaar wird als Analysator eingesetzt. Bei Parallelstellung zum Polarisator passieren die Wellen ungehindert. Bei senkrechter Stellung zum Polarisator läuft die Welle durch den Analysator nicht hindurch (Abb. 1.1.9./2).

Bei einer Stellung des Analysators in einem schiefen Winkel zum Polarisator erfolgt eine erneute Drehung der Schwingungsebene am Analysator. Diese Versuche können bei verschiedenen Stellungen des Polarisators wiederholt werden.

Variante c: Modellversuch am Gummifaden

Man stellt aus den angegebenen Geräten eine ähnliche Versuchsanordnung wie in Abbildung 1.1.5./3 von V 1.1.5. zusammen und erzeugt durch einen kleinen Elektromotor stehende Drehwellen (Abb. 1.1.9./3). Bei stillstehendem Motor schiebt man von der Seite her die Schlitztafeln ein, so daß der Gummifaden durch die Schlitz hindurchläuft. Es ist darauf zu achten, daß die Tafeln kurz vor einen Knoten gestellt werden. Liegen die Schlitz parallel zueinander, so laufen die am

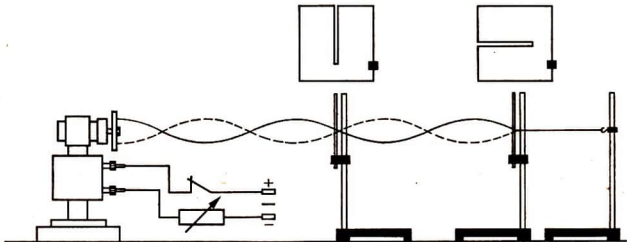


Abb. 1.1.9./3 Erzeugen polarisierter Wellen an einem Gummifaden

ersten Schlitz aus den Drehwellen entstandenen Transversalwellen über den ganzen Gummifaden hin. Sind die Schlitzte dagegen gekreuzt, so werden die Transversalwellen am zweiten Schlitz ausgelöscht. Die letzte Fadenstrecke bleibt in Ruhe.

Bemerkung

Man kann die gleichen Versuche wie unter b auch mit einem Wagnerschen Hammer ausführen (s. V 1.1.5.b). Polarisator und Analysator werden aus je zwei Fahrradspenchen gefertigt, die in einem Abstand von etwa 2 mm durch entsprechende Bohrungen in Holzklötze gesteckt werden. Sie werden an einem Stativ befestigt, so daß Winkel und Höhe leicht zu verstellen sind.

1.1.10. Projektion von Wellenerscheinungen (Modellversuch)

Zu Variante a

1. Gerät zur Projektion von Wellenerscheinungen \textcircled{a} , bestehend aus zwei Rähmchen und drei Schablonen nach Abbildung 1.1.10./1
2. Kleinbildprojektor

Zu Variante b

3. Gerät zur Projektion von Transversalwellen \textcircled{b} , bestehend aus einer schraubenförmigen Folge von Holzkugeln nach Abbildung 1.1.10./2

Methodische Hinweise

1. Die Modelle zeigen in der Form sich wellenförmig bewegender Licht- oder Schattenpunkte, wie eine Welle aus einzelnen schwingenden Elementen zusammengesetzt ist.

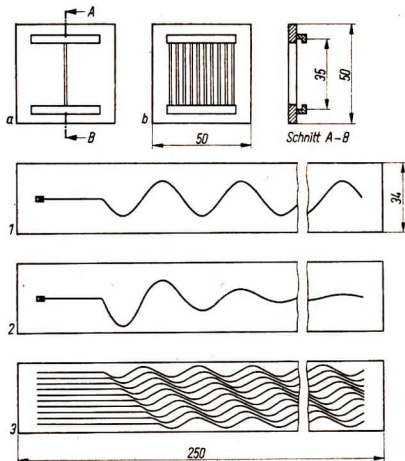


Abb 1.1.10./1
Gerät zur Projektion
von Wellenerscheinungen

2. Bei langsamer Bewegung haben die Einzelelemente in der Beobachtung den Vorrang, bei schneller Bewegung die Welle.

Anfertigung des Modells zur Variante a

Die beiden Rähmchen werden nach den Maßen der Abbildung aus 3 mm dickem Hartpapier hergestellt. Die Spalte sägt man mit der Laubsäge aus. Auf den Rähmchen befestigt man je zwei Führungsleisten, die aus Hartpapier oder Blech gefertigt sein können. Für die Schablonen wird Hartpapier von 1 mm Dicke verwendet. Die Kurven werden mit einer Laubsäge ausgesägt.

Vorbemerkung

Das Gerät dient zur Veranschaulichung von Schwingungs- und Wellenvorgängen. Es beruht darauf, daß eine Schablone mit einer oder mehreren lichtdurchlässigen Kurven vor einer Blende mit einem oder mehreren Spalten vorbeigezogen wird. So entsteht ein bewegliches Diaskopbild, das mit einem Bildwerfer projiziert wird. Die einzelnen Teile des Gerätes sind in der Abbildung 1.1.10./1 wiedergegeben. Sie können verschieden kombiniert werden.

Versuch 1: Projektion einer harmonischen und einer gedämpften Schwingung

Es werden das Rähmchen a und die Schablone 1 verwendet. In der Projektion ist ein Lichtfleck zu sehen, der in vertikaler Richtung schwingt. Werden das Rähmchen a und die Schablone 2 benutzt, so vollführt der Lichtfleck in der Projektion gedämpfte Schwingungen

Versuch 2: Projektion einer Transversalwelle

Man verwendet das Rähmchen b und die Schablone 1. Die Schablone wird von rechts in die Führungsleisten des Rähmchens eingeführt und langsam nach links geschoben. Steht der geradlinige Teil der lichtdurchlässigen Kurve vor der Reihe der Spalte, so ist in der Projektion eine geradlinige Reihe von Lichtflecken zu sehen. Sie veranschaulicht eine Reihe miteinander gekoppelter schwingungsfähiger Teilchen. Bei der Bewegung der Schablone beginnt in der Projektion der linke Lichtfleck zu schwingen. Ihm folgen der Reihe nach die anderen. Es entsteht das Bild einer Transversalwelle. Man erkennt deutlich, daß die einzelnen Lichtflecke nur vertikale Schwingungen um eine Mittellage ausführen, während die Wellenberge und Wellentäler von links nach rechts wandern. Werden das Rähmchen b und die Schablone 2 verwendet, so entsteht die abklingende Transversalwelle.

Versuch 3: Projektion einer Longitudinalwelle

Zum Versuch benutzt man das Rähmchen a und die Schablone 3. Stehen die geradlinigen Teile der lichtdurchlässigen Kurven vor dem Spalt, so ist in der Projektion eine Reihe von Lichtflecken zu sehen. Die Abstände zwischen ihnen sind gleich. Bewegt man die Schablone, so beginnt der erste Lichtfleck am Anfang der Reihe zu schwingen. Ihm folgen der Reihe nach der zweite, der dritte usw. Es entsteht eine Longitudinalwelle. Man erkennt, daß die einzelnen Lichtflecke nur Schwingungen um ihre Mittellage vollführen, während die Verdünnungen und Verdichtungen die Reihe durchlaufen.

Versuch 4: Projektion einer Raumwelle

Man verwendet das Rähmchen b und die Schablone 3.

Stehen die geradlinigen Teile der Kurven vor der Reihe der Spalte, so sind die Lichtflecke in der Projektion regelmäßig in der Form eines Gitters angeordnet. Dies entspricht der Anordnung der schwingungsfähigen Teilchen im Ruhezustand. Bewegt man die Schablone, so schwingen die Lichtflecke um Mittellagen, und es entstehen Wellenfronten (Verdichtungen und Verdünnungen), die in diagonaler Richtung über die Bildfläche wandern. Dieser Vorgang entspricht etwa der Ausbreitung von Raumwellen, z. B. der Ausbreitung von Schallwellen.

Bemerkungen

1. Die angegebenen Rähmchen lassen sich nicht ohne weiteres in jeden Dia-Wechselschieber so einsetzen, daß man die Schablonenstreifen in den Führungsleisten vorbeiziehen kann. In solchem Fall muß man den Dia-Wechselschieber durch eine zweckentsprechende Halterung ersetzen, die selbst zu bauen ist.
2. Die in Abbildung 1.1.10./1 dargestellten Teile des Gerätes werden von der Unterrichtsmittelindustrie in entsprechender Größe als Folien für den Tageslichtschreibprojektor hergestellt.

Herstellung des Modells zu Variante b

Zwei kreisförmige Scheiben aus Sperrholz oder Metall mit einem Durchmesser von 200 mm erhalten eine Mittelbohrung und wenige Millimeter vom Umfang entfernt 12 kleine Bohrungen in gleichen Abständen. Beide Scheiben werden im Abstand von 600 mm auf einem axialen Metallstab befestigt und auf einem Gestell drehbar gelagert (Antrieb durch Handkurbel oder Experimentiermotor). Durch die kleinen Bohrungen in der Nähe des Umfangs wird Schnur von einer Scheibe zur anderen gezogen. Auf jede dieser 12 Schnüre werden je 2 Holzkugeln aufgefädelt. Die Kugeln werden schraubenförmig verteilt und mit Holzstäbchen auf der Schnur befestigt (Abb. 1.1.10./2).

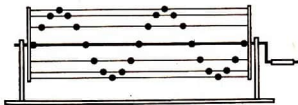


Abb. 1.1.10./2 Gerät zur Demonstration fortschreitender Transversalwellen

Versuch

Das Modell wird etwa 2 m vor einer Projektionswand aufgestellt und in gleichförmige Rotation versetzt. Die Bewegung der Holzkugeln wird mit dem Licht eines Bildwerfers auf die Wand projiziert.

Die Schatten der Holzkugeln veranschaulichen eine fortschreitende Transversalwelle.

Demonstriert werden können:

- Die harmonische Schwingung die Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung;
- das Fortschreiten der Phase, der Berge und Täler.

- Während einer Schwingungsdauer rückt die Phase (Berg, Tal) um die Strecke „1 Wellenlänge“ vorwärts, woraus sich die Grundgleichung der Wellenlehre ergibt.

1.2. Oberflächenwellen

1.2.0. Allgemeines über Wasserwellengeräte

1.2.0.1. Wasserwellengerät der Lehrmittelindustrie

Zur Demonstration der Ausbreitungs- und Überlagerungserscheinungen von Wellen verwendet man häufig die mit geringer Geschwindigkeit fortschreitenden Wellen an Flüssigkeitsoberflächen. Man beobachtet sie mit Hilfe einer Wellenwanne. Alle Konstruktionen gehen im Prinzip auf die Wellenwanne von Young zurück, sie unterscheiden sich lediglich

in der Art der Wellen — Wellengruppen oder dauernd fortschreitende Wellen,
in der Art der Erregung — mechanisch, pneumatisch oder elektromagnetisch,
in der Art der Beleuchtung — Auflicht oder Durchlicht,
in der Art der Abbildung des Wellenfeldes — Schattenwurf oder Projektion,
in der Art der Synchronisation bei intermittierender Beleuchtung.

Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät

WSP 220 vom VEB Polytechnik, Karl-Marx-Stadt

Das WSP 220 ist ein Festgerät mit Aufbaucharakter. Es besteht aus wenigen, leicht zu montierenden und auszuwechselnden Teilen (Abb. 1.2.0./1).

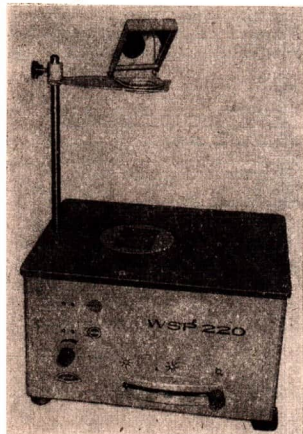


Abb. 1.2.0./1 Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220

Das Gehäuse enthält die gesamte Stromversorgung, die Projektionslampe (12 V/50 W), den Doppelkondensator und die Stroboskopeinrichtung. Die Bedienungselemente sind übersichtlich auf der Frontplatte angeordnet. Eine Einknopfbedienung für die Beleuchtung und Stroboskopeinrichtung erleichtert die Handhabung wesentlich. Die Wellenerregung erfolgt elektromagnetisch mit 50 Hz. Der Erreger wird auf der Deckplatte des Gehäuses festgeklemmt. Er ist verschiebbar und durch eine Stellschraube leicht in der Höhe zu verstellen. Zum Gerät gehört ein Satz Tauchkörper zur Einpol-, Zweipol- und Mehrpolerregung sowie zur Erregung einer geradlinigen Wellenfront.

Das Objektiv mit Spiegel ist an einem 13-mm-Stativstab, der in die Deckplatte des Gehäuses eingeschraubt wird, zu befestigen. Der Spiegel ist in zwei Achsen drehbar. Als Wellenwanne dient eine runde, zum Rand flach auslaufende, justierbare Schale mit Glasboden.

Zum Gerät wird auch ein Zwischenbildhalter mitgeliefert. Er gestattet eine gleichzeitige Projektion des Wellenfeldes und einer gravierten Glasplatte (z. B. mit Winkelteilung), wodurch quantitative Auswertungen der Wellenbilder ermöglicht werden. Zur Demonstration der Ausbreitungs- und Überlagerungserscheinungen dient ein Satz Einsatzkörper für die Wellenwanne. Da das Gerät auch zur Projektion von Strömungsbildern konstruiert wurde, gehört zur vollständigen Ausrüstung noch eine Strömungswanne mit entsprechenden Einsatzkörpern.

1.2.0.2. Hinweise zum Selbstbau von Wasserwellengeräten

Der Selbstbau von Wasserwellengeräten erfordert besondere Sorgfalt für die Abdichtung der Wellenwanne. Am besten klebt man Gas auf Metall oder Kunststoffe mit einem Epoxydharzkleber. Von der Vielzahl der Selbstbauanleitungen für Wellengeräte seien zwei angeführt.

Wasserwellengerät zur Projektion des Wellenfeldes

Das Wasserwellengerät arbeitet mit elektromagnetischer Erregung von 50 Hz. Mit Strom der gleichen Frequenz wird die Lichtquelle (Kohlebogenlampe oder Hg-Dampf Lampe) gespeist, die dadurch eine intermittierende Beleuchtung liefert. Die periodischen Helligkeitsschwankungen der Bogenlampe reichen zum Erzielen des stroboskopischen Effektes überraschend gut aus.

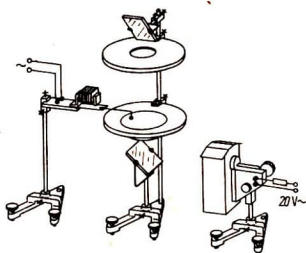


Abb. 1.2.0./2 Wasserwellengerät — Selbstbau

Die Wellenwanne ist für Durchlicht gebaut. Mit Hilfe einer Objektivlinse wird das Wellenfeld über einen Planspiegel auf einer lotrechten Projektionswand abgebildet (Abb. 1.2.0./2). Wellenwanne und Objektivfassung stellt man aus gedrehten Hart-

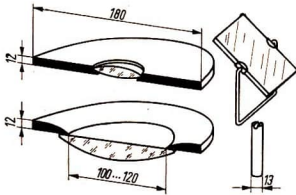


Abb. 1.2.0./3 Wellenwanne und Objektivfassung (Schnittdarstellung), Spiegel mit 13-mm-Stiel

papieringen nach den Abmessungen in Abbildung 1.2.0./3 her. Der Ring für die Wellenwanne wird gebösch. Die Kondensorlinse (gleichzeitig Boden der Wellenwanne) ist eine Plankonvexlinse von mindestens 100 mm Durchmesser und einer Brennweite zwischen 100 mm und 120 mm. Sie wird an den Hartpapierring unter großem Druck gekittet. Man achte auf gut aufgeraute und fettfreie Klebeflächen. Die Objektivlinse mit einer Brennweite von 200 mm und einem Durchmesser von etwa 50 mm kann ebenfalls eingekittet werden. Es genügt aber schon eine Befestigung mit einem Sprengring. Die Projektionseinrichtung wird vervollständigt durch zwei Planspiegel auf Stiel. Es eignen sich dazu ebene Rasierspiegel (70 mm \times 100 mm) mit Metallbügeln zum Aufstellen. Sie werden auf kurze 13-mm-Rundstäbe mit einer Länge von 35 mm bzw. 120 mm aufgelötet.

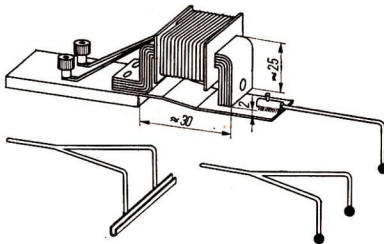


Abb. 1.2.0./4 Behelfsmäßiger Wellenerreger (50 Hz) mit Tauchkörpern

Den Wellenerreger kann man nach Abbildung 1.2.0./4 aus 10 bis 15 alten Transformatorblechen herstellen, die man biegt und zusammennietet. Ein solches Blech dient auch als Schwingzunge; auf deren herausragendes Ende lötet man den durchbohrten Teil eines Bananensteckers mit Stiftschraube. Einen Spulenkörper aus Pappe klebt man um den Kern des Elektromagneten und bewickelt ihn mit Klingeldraht (200 bis 300 Windungen, \varnothing etwa 0,3 mm). Der so fertiggestellte Erreger wird auf einem dicken Hartpapierstück befestigt. Das Brett trägt gleichzeitig die Buchsen für die Stromzuführung. Die Tauchkörper biegt man aus 2 mm bis 2,5 mm dickem, lötbarem Draht. Die eintauchenden Enden des Ein- und Zweipol-

erregers werden mit möglichst großen Lötperlen versehen. An den Erreger für geradlinige Wellen lötet man ein Stück U-förmig gebogenes dünnes Messingblech. Die Einsatzkörper zur Reflexion und Beugung fertigt man aus dünnem Blech, diejenigen für die Brechung aus dickem Fensterglas oder aus glasklarem Piacryl bzw. Polystyrol.

Das Gerät wird unter Verwendung von Teilen des Präzisionsstativs nach Abbildung 1.2.0./2 aufgebaut. Mit den Stellschrauben an den V-förmigen Füßen sind Wellenwanne und Erreger justierbar. Den Strahlengang richtet man so ein, daß das von der Lichtquelle kommende Licht die Wellenwanne über den ersten Planspiegel voll ausleuchtet. Eine etwa 30 mm ... 50 mm über der Wellenwanne liegende Ebene wird durch das Objektiv über den zweiten Planspiegel scharf auf der Projektionswand abgebildet. Anschließend verändert man die Stellung der Lichtquelle so, daß ihr reelles, vom Kondensator erzeugtes Bild im Objektiv entsteht.

Wasserwellengerät für Schattenwurf ohne stroboskopische Beleuchtung

Sehr einfach läßt sich ein Wasserwellengerät ohne stroboskopische Beleuchtung mit pneumatischer Erregung für kleine Frequenzen herstellen (Abb. 1.2.0./5). Als

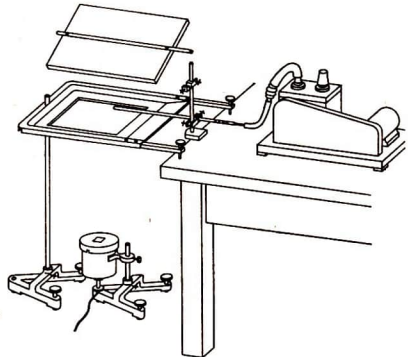


Abb. 1.2.0./5
Wasserwellengerät für Schattenwurf (Selbstbau)

Wellenwanne dient beispielsweise eine Grillpfanne aus Aluminium, die mit einem rechteckigen Bodenausschnitt versehen wurde. Auf die Öffnung wird eine ebene, schlierenfreie Glasplatte aufgeklebt. Zur Justierung werden in die seitlichen Falze Verlängerungsstücke mit Stellschrauben genietet. Außerdem wird in dem Falz an der Stirnseite der Grillpfanne eine 13-mm-Bohrung angebracht (Abb. 1.2.0./6).

Den intermittierenden Luftstrom entnimmt man aus dem Druckstutzen einer Vakuumpumpe und führt ihn über eine Schlauchleitung an ein in das Erregerrohr passendes Glas- oder Metallrohr. Das Erregerrohr ist ein einseitig verschlossenes Metallrohr mit einem Außendurchmesser von etwa 10 mm und einer Länge von 300 mm bis 350 mm. Zur Erregung von Einpolwellen bringt man auf der Mantelfläche des Rohres eine Bohrung mit einem Durchmesser von 1,5 mm an (Abb.

1.2.0./7a). Als Mehrpolderreger zur Erzeugung von linearen Wellenfronten muß es eine ganze Reihe solcher Löcher mit einem Lochabstand von etwa 3 mm besitzen (Abb. 1.2.0./7b). Ein Rohr mit 4 Bohrungen (Abb. 1.2.0./7c) kann als Zweipol-erreger dienen, wenn jeweils zwei der Löcher durch aufgeschnittene, passende Gum- mischlauchstücke verschlossen sind. Am offenen Ende werden die Erregerrohre mit vier durchgehenden Bohrungen mit einem Durchmesser von 6 mm versehen. Die großen Bohrungen dienen zum Einstellen der Amplitude. Der Luftdruck wird

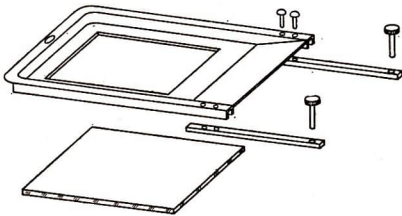


Abb. 1.2.0./6
Selbsterstellung
einer Wellenwanne

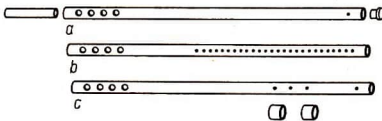


Abb. 1.2.0./7 Erregerrohre

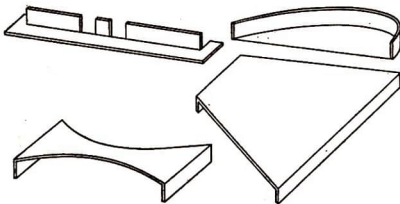


Abb. 1.2.0./8
Einsatzkörper aus thermoplasti-
schem glasklarem Werkstoff

durch Veränderung der Einschubtiefe des Strahlrohres in das Erregerrohr ein- gestellt. Die Erregerfrequenz beträgt beim Verwenden der Vakuumpumpe etwa 5 Hz ... 7 Hz. Wegen dieser geringen Frequenz ist keine stroboskopische Beleuchtung notwendig.

Die Einsatzkörper für die Reflexion, Brechung und Beugung kann man auf sehr einfache Weise durch thermoplastische Verformung von glasklarem Zelluloid, Decelith oder Ekalon herstellen (Abb. 1.2.0./8). Man braucht den thermoplastischen Werkstoff dazu nur an den Biegekanten mit einem elektrisch geheizten Draht zu erwärmen und biegt den Werkstoff nach Erweichung rechtwinklig um.

Der Aufbau des Wasserwellengerätes erfolgt nach Abbildung 1.2.0./5 unter Verwendung von Teilen des Präzisionsstativs über einer Tischkante. Als Lichtquelle eignet sich eine große Projektionslampe (ohne Kondensator) oder eine Quecksilberdampflampe. Durch eine Blende wird ein Lichtbündel so ausgeblendet, daß die Wellenwanne voll durchleuchtet wird. Man kann den Schattenwurf an der Zimmerdecke beobachten; bequemer ist die Beobachtung an einer lotrechten Projektionswand. Dann muß man den Strahlengang durch einen großen, ebenen, schlierenfreien Spiegel ablenken.

1.2.0.3. Hinweise zur Arbeit mit Wasserwellengeräten

Die Justierung der Wellenwanne erfolgt am einfachsten mit einer Dosenlibelle. Damit störende Reflexionen an den Rändern vermieden werden, setzt man dem Wasser einige Tropfen Benetzungsmittel zu. Gut geeignet sind Fit und das ORWO-Netzmittel F 905 in flüssiger Form. Eine zweiprozentige Lösung der genannten Benetzungsmittel setzt die Oberflächenspannung des Wassers so weit herab, daß selbst an senkrechten Wänden der Wellenwanne keine störenden Reflexionen mehr auftreten. Damit sich kein Niederschlag bildet, verwendet man am besten destilliertes Wasser.

Kontrastreiche Projektionsbilder erhält man, wenn der Tauchkörper gerade in die Flüssigkeit eintaucht; während der Schwingung soll die Wasserhaut am Tauchkörper nicht abreißen (Abb. 1.2.0./9). Mehrpolarerregter oder Erreger für lineare Wellenfronten sind parallel zur Wasseroberfläche zu justieren.

Abb. 1.2.0./9 Stellung des Tauchkörpers zur Flüssigkeitsoberfläche

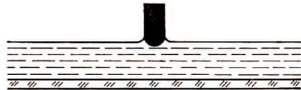
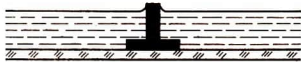


Abb. 1.2.0./10 Günstige Stellung der Reflexionshindernisse in der Wellenwanne



Bei pneumatischer Erregung achte man auf senkrecht auf Auftreffen des intermittierenden Luftstromes auf die Flüssigkeitsoberfläche. Die Entfernung von der Düse zur Oberfläche ist entscheidend für die Erregung; man ermittelt die günstigste Entfernung durch Probieren.

Sehr bedeutsam für das Gelingen einer Reihe von Versuchen mit dem Wasserwellengerät ist die richtige Flüssigkeitstiefe; denn für Oberflächenwellen bestehen Zusammenhänge zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Flüssigkeitstiefe. Die Demonstration der Reflexionserscheinungen von Oberflächenwellen gelingt recht gut, wenn die Höhe der Hindernisse nur wenig größer ist als die Wassertiefe, so daß sich am oberen Rand des benetzten Hindernisses eine Wasserhaut bildet (Abb. 1.2.0./10).

Von ausschlaggebender Bedeutung für das Gelingen aller Versuche zur Demonstration der Brechung mit dem Wasserwellengerät sind das Verhältnis der Flüssigkeitstiefen im Tief- und im Flachwasserbereich der Wellenwanne und die Erregerfrequenz der Wellen. Der Geschwindigkeitsunterschied der Wasserwellen ist um so größer, je geringer die Frequenz der Wellen ist. Das Verhältnis der Flüs-

sigkeitstiefen im Tief- und Flachwasser ist um so günstiger, je höher die Erregerfrequenz ist. Bei Kleinwellenwannen (WSP-220) mit Frequenzen, die größer sind als 20 Hz, wählt man das Verhältnis etwa 10:1, wobei die Flachwassertiefe kleiner sein muß als 1 mm. Bei größeren Wellenwannen mit Erregerfrequenzen zwischen 4 Hz und 10 Hz kann das Verhältnis kleiner sein, die Flachwassertiefen wählt man zwischen 1 mm und 3 mm. Zu geringe Wassertiefen ergeben eine sehr starke Dämpfung der Wellen. Es empfiehlt sich bei der Durchführung von Versuchen zur Brechung, durch langsames Absaugen oder Hinzufügen von Wasser das günstigste Verhältnis einzustellen. Das geschieht am besten bei laufendem Erreger unter ständiger Beobachtung des Projektionsbildes.

Wird das Wellenfeld mit einem Objektiv auf einer Projektionswand abgebildet, so stellt man das Objektiv meist nicht scharf auf die Flüssigkeitsoberfläche, sondern auf eine wenige Zentimeter über der Oberfläche liegende Ebene ein. Die Wellenberge wirken wie kleine Sammellinsen und erzeugen eine Art Zwischenbild der Oberfläche. In dieser Ebene kann man mit einem Zwischenbildhalter Strichzeichnungen auf durchsichtige Unterlagen bringen; diese werden gleichzeitig mit dem Wellenfeld scharf auf der Projektionswand abgebildet.

Entwirft man das Projektions- oder Schattenbild nicht auf einer Projektionswand, sondern auf einer hellen Wandtafel (alte Wandtafel mit heller Farbe mehrmals streichen und anschließend mit Wasserschleifpapier schleifen), so ergibt sich die Möglichkeit, Hilfslinien (Wellenfronten, Wellennormalen, Winkelteilungen usw.) mit farbiger Kreide in das Bild einzuzichnen, und nach abgeschalteter Beleuchtung der Wellenwanne kann das Tafelbild in Ruhe ausgewertet werden.

1.2.1. Erzeugen von Wellengruppen und fortschreitenden Wellen

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Wasserwellengerät | 4. Einpolarerregger |
| 2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt | 5. Erreger für lineare Wellen |
| 3. Tropfpipette | |

Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch empfiehlt sich als Einführungsversuch für die Ausbreitungseigenschaften von Wellen.
2. Die Begriffe Wellenfront und Wellennormale (Ausbreitungsrichtung der Welle) können mit ihm erläutert werden.

Versuch 1: Erregung einer Wellengruppe

Durch einmalige Erregung der Wasseroberfläche erhält man eine vom Erregerzentrum fortschreitende Wellengruppe. Zu diesem Zwecke läßt man aus einer Tropfpipette in größeren zeitlichen Abständen Wassertropfen in der Mitte der Wellenwanne auf die Flüssigkeitsoberfläche auftropfen. Vergleiche dazu Abbildung 1.2.4./1. Dieser Versuch wird ohne stroboskopische Beleuchtung durchgeführt.

Versuch 2: Dauererregung einer fortschreitenden Kreiswelle

Erregt man die Wasseroberfläche periodisch mit einem Einpolarerregger, so kann man eine fortschreitende Kreiswelle auf der Flüssigkeitsoberfläche beobachten (Abb.

1.2.1./1). Für Oberflächenwellen geringer Frequenz (4 Hz ... 8 Hz) ist zur Beobachtung keine stroboskopische Beleuchtung erforderlich. Wellen höherer Frequenz beobachtet man am besten stroboskopisch, wobei man Stillstand oder langsames Fortschreiten der Wellen leicht erreichen kann.

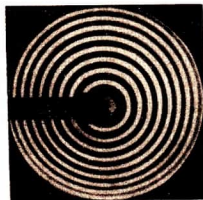


Abb. 1.2.1./1
Kreiswelle auf
einer Flüssigkeitsoberfläche

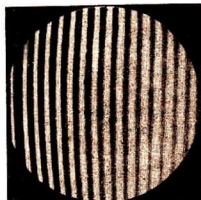


Abb. 1.2.1./2
Lineare Wellen auf
einer Flüssigkeitsoberfläche

Versuch 3: Erregung einer linearen Welle

Lineare Wellen erhält man durch Einsetzen eines dafür geeigneten Erregers (Abb. 1.2.1./2). Die Beobachtung kann wiederum mit oder ohne stroboskopische Beleuchtung erfolgen.

Bemerkung

Steht keine Wellenwanne zur Verfügung, so kann man die Versuche 1 bis 3 auch in einer mit Wasser gefüllten großen Fotoschale ausführen. Blickt man schräg gegen die Wasseroberfläche, so kann man die Wellenerscheinung beobachten. Die Erregung für die Versuche kann von Hand mit einem Holzstab oder mit einem Lineal erfolgen, wobei man entweder einmal oder periodisch eintaucht.

1.2.2. Überlagerung von Kreiswellen — Huygens-Fresnelsches Prinzip

Zu Variante a

1. Wasserwellengerät
2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt

Zu Variante b

4. großes Uhrglas
5. sauberes Quecksilber
6. Quecksilberbrett
7. Schreibstimmgabel mit aufgeschraubtem Zweipolerreger ⑤
8. Physikleuchte ohne Kondensator mit Transformator
9. Projektionswand

3. Zweipolerreger mit veränderlichem Abstand oder zwei Erreger mit verschiedenem Abstand

Zu Variante c

- Geräte 5., 6., 8. und 9. wie bei b, außerdem
10. große Petrischale
 11. 3 Stahlkugeln, \varnothing 5 mm
 12. Spule (500 Wdg.)
 13. I-Kern, geblättert
 14. Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V \sim)
 15. Dreifuß
 16. Unterlegeklötze

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist ein Modellversuch für die Interferenzen bei Licht.
2. Bei kleinerem Abstand der Erregerzentren liegen die Interferenzstreifen weiter auseinander.
3. Die Varianten b und c zeigen interessante Versuche mit Quecksilber.

Variante a: Erregung zweier Kreiswellen durch einen Zweipolerreger

Man justiert den Zweipolerreger in der Mitte der Wellenwanne so, daß beide Tauchkörper gleich tief in die Flüssigkeitsschicht eintauchen. Der Abstand soll dabei mindestens 2 ... 3 Wellenlängen der erzeugten Kreiswellen betragen. Erregt man nunmehr periodisch Wellen, so beobachtet man die Überlagerung der beiden Kreiswellensysteme. Die Interferenzhyperbeln sind dabei gut zu sehen (Abb. 1.2.2./1).

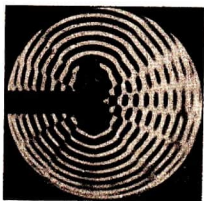


Abb. 1.2.2./1 Interferenz zweier Kreiswellen
a auf einer Flüssigkeitsoberfläche

Durch stroboskopische Beleuchtung kann man stehende Bilder erreichen. Vergrößert man den Abstand der beiden Wellenzentren, indem man den Abstand der beiden Erreger vergrößert, so nimmt die Anzahl der Interferenzhyperbeln zu.

Variante b: Erregung zweier Kreiswellen durch eine Stimmgabel

Auf einem Quecksilberbrett füllt man vorsichtig Quecksilber in ein großes Uhrglas. Zur Erhöhung der Standsicherheit kann man das Uhrglas auf einen Korkring oder eine Petrischale setzen. Man taucht nunmehr eine angeschlagene Schreibstimmgabel, deren Schreibzunge man durch einen gabelförmigen Eisenblechstreifen ersetzt hat (Abb. 1.2.2./2), so in das Quecksilber, daß die beiden Zinken der Gabel nur wenig in

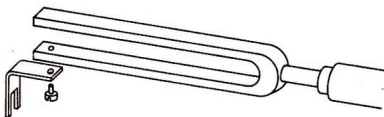


Abb. 1.2.2./2
Gabelförmiger Eisenblechstreifen
für die Schreibstimmgabel

die Flüssigkeit hineinragen. So kann man bei Schrägbeobachtung ein System von Interferenzhyperbeln sehen. Die Erscheinung läßt sich auf einer Projektionswand abbilden. Dazu richtet man die von Stativteilen gehaltene Lichtwurf Lampe so gegen die Quecksilberoberfläche, daß das von ihr reflektierte Licht die Projektionswand trifft.

Variante c: Elektromagnetische Erregung zweier Kreiswellen

Man baut die Versuchsanordnung auf einem Quecksilberbrett auf. Über eine Spule mit I-Kern wird auf einem Dreifuß eine große, mit Quecksilber gefüllte Petrischale gebracht. Die Quecksilberhöhe soll etwa 4 mm ... 6 mm betragen. Durch Unterlegeklötze ordnet man die Spule mit dem I-Kern dicht unter der Mitte der Petrischale an. Auf die Mitte der Quecksilberoberfläche legt man 2 kleine Stahlkugeln mit einem gegenseitigen Abstand von 10 mm ... 20 mm (Abb. 1.2.2./3).

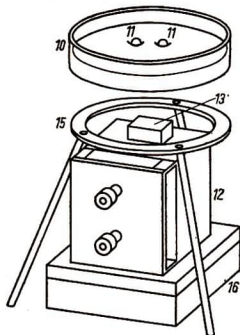


Abb. 1.2.2./3
Erzeugen von Kreiswellen
auf einer Quecksilberoberfläche

Schließt man die Spule an eine Wechselspannung von 6 V ... 12 V an, so beobachtet man auf der Oberfläche ein System von Interferenzhyperbeln. Die Erregung erfolgt durch die magnetische Wirkung der stromdurchflossenen Spule auf die Stahlkugeln. Die Quecksilberoberfläche läßt sich wie in Variante b im Schattenwurf projizieren.

Bemerkungen

1. Die Variante c läßt eine interessante Abänderung zu. Ordnet man drei Stahlkugeln so auf der Quecksilberoberfläche an, daß ihre Verbindungslinien ein stumpfwinkliges Dreieck bilden, so beobachtet man drei einander überlagernde Hyperbelsysteme. Dieser Versuch kann als Modell für das Navigationsverfahren nach dem Decca-System dienen.
2. Variante b kann auch mit Wasser ausgeführt werden.

1.2.3. Versuche zur Wellenausbreitung nach dem Huygensschen Prinzip

1. Wasserwellengerät
2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt
3. Einpolerregger
4. Mehrpolerregger (gegebenenfalls mehrere, mit unterschiedlichem Abstand der Erregerezentren)

5. Erreger für lineare Wellen
6. verschiedene Einsatzkörper:
 - lineares Hindernis mit einer schmalen Öffnung,
 - ringförmiges Hindernis mit einer schmalen Öffnung,
 - lineares Hindernis mit mehreren schmalen Öffnungen (gegebenenfalls mehrere, mit unterschiedlichem Abstand der Öffnungen),
 - ringförmiges Hindernis mit mehreren schmalen Öffnungen

Methodischer Hinweis

Der Versuch soll deutlich machen, daß eine Wellenfront durch Überlagerung von Elementarwellen entsteht.

Versuch 1: Elementarwellen an der schmalen Öffnung eines Hindernisses

Die Bildung der Elementarwellen weist man modellartig in einer Wellenwanne dadurch nach, daß man entweder im Zentrum eines ringförmigen Hindernisses mit schmalen Öffnung mit dem Einpolerregger eine Kreiswelle erzeugt oder eine mit einem linearen Wellenerreger erzeugte, geradlinige Wellenfront senkrecht oder schräg auf ein lineares Hindernis mit schmalen Öffnung laufen läßt. Es bildet sich eine Kreiswelle aus, deren Zentrum die schmale Öffnung ist (Abb. 1.2.3./1a und b).

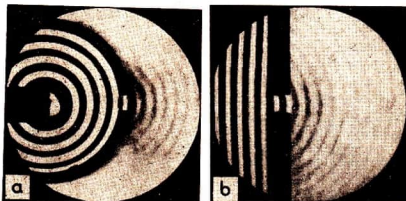


Abb. 1.2.3./1
Modellversuch zur Erzeugung einer Elementarwelle in einer
a) kreisförmigen,
b) geradlinigen Wellenfront

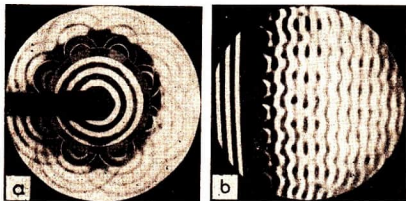


Abb. 1.2.3./2 Überlagerung der Elementarwellen
a) hinter einem ringförmigen Hindernis mit schmalen Öffnungen,
b) hinter einem geradlinigen Hindernis mit schmalen Öffnungen

Versuch 2: Elementarwellen an mehreren Öffnungen eines Hindernisses

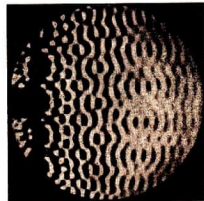
Die Überlagerung der Elementarwellen und die Bildung einer neuen Wellenfront läßt sich aus Versuch 1 leicht herleiten. Man ersetzt lediglich das ringförmige Hin-

dernis mit einer Öffnung durch ein solches mit mehreren symmetrisch auf dem Außenrand verteilten Öffnungen, oder man setzt bei der Verwendung geradliniger Wellen ein Hindernis mit vielen schmalen Öffnungen in die Wellenwanne. Dabei läßt sich zeigen, daß die sich bildenden Wellenfronten um so besser kreisförmig oder linear werden, je dichter die Öffnungen im Hindernis liegen (Abb. 1.2.3./2a und b). Wird der Abstand der Elementarwellenzentren wesentlich kleiner als die Wellenlänge, so ist die Überlagerung vollkommen. Der Nachweis in der Wellenwanne kann durch Einsetzen eines Kammes als Hindernis erfolgen (feinzinkig bei hohen Frequenzen, grobzinkig bei kleinen Frequenzen).

Versuch 3: Elementarwellen an einem Mehrpolderreger

Durch einen Mehrpolderreger erzeugt man gleichzeitig mehrere Kreiswellen. Im Wellenfeld erfolgt eine Überlagerung der einzelnen Kreiswellen (Abb. 1.2.3./3). Durch das Auswechseln des Mehrpolderregers gegen einen solchen mit geringerem Abstand der Erregerzentren läßt sich zeigen, daß die durch Überlagern entstandenen Wellenfronten immer besser werden, je dichter die Elementarwellen liegen.

Abb. 1.2.3./3
Überlagerung der Kreiswellen
nach dem
Huygensschen Prinzip



1.2.4. Versuche zur Reflexion von Oberflächenwellen

- | | |
|--|---|
| 1. Wasserwellengerät | 5. Tropfpipette |
| 2. Wasser, mit wenig Benetzungsmittel versetzt | 6. verschiedene Einsatzkörper zur Reflexion:
geradliniges Hindernis,
gekrümmtes Hindernis |
| 3. Einpolderreger | |
| 4. Erreger für lineare Wellen | |

Methodischer Hinweis

Die Versuche zeigen die Reflexion von kreisförmigen und linearen Wellen an unterschiedlichen Hindernissen. Sie können als Modelle für die Reflexion von Licht betrachtet werden.

Versuch 1: Reflexion einer Welle an einem geradlinigen Hindernis

In die Wellenwanne eines Wasserwellengerätes oder in eine Fotoschale (vgl. Bemerkung zu V 1.2.1.) wird ein geradliniges Hindernis eingebracht, das ein wenig über die Wasseroberfläche herausragt. Nicht zu dicht vor dem Hindernis wird durch eine Tropfpipette eine Wellengruppe erregt. Die Gruppe läuft kreisförmig auf das

Hindernis zu, wird reflektiert und läuft wieder zurück (Abb. 1.2.4./1). Der Versuch erfolgt ohne stroboskopische Beleuchtung.

Wie beim vorangehenden Versuch bringt man ein geradliniges Hindernis in die Wellenwanne. Erzeugt man durch einen nicht zu dicht vor dem Hindernis schwingenden Einpolerregger Kreiswellen, so kann man mit oder ohne stroboskopische Beleuchtung die einfallende und die reflektierte Welle beobachten (Abb. 1.2.4./2a). Einfallende und reflektierte Welle interferieren; dadurch wirkt der Versuch nicht so überzeugend wie der vorhergehende. Ersetzt man den Einpolerregger durch den Erreger für lineare Wellen und läßt die Wellen unter einem Winkel von etwa 45° gegen die Reflexionswand laufen, so beobachtet man ebenfalls die Reflexion (Abb. 1.2.4./2b). Man kann die Beobachtung der reflektierten Wellen dadurch erleichtern, daß man den Erreger nur kurzzeitig mit der Hand betätigt.

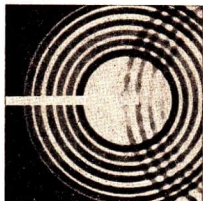


Abb. 1.2.4./1
Reflexion einer Wellengruppe an einem geradlinigen Hindernis

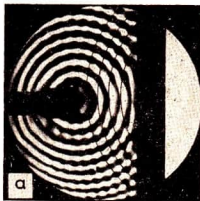
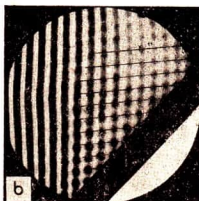


Abb. 1.2.4./2 Reflexion
a) einer kreisförmigen Welle,



b) einer geradlinigen Welle an einem geradlinigen Hindernis

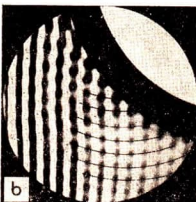
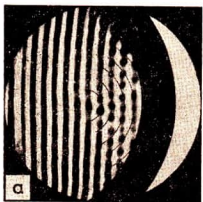


Abb. 1.2.4./3 Reflexion von Oberflächenwellen an einem
a) konkaven,
b) konvexen Hindernis

Versuch 2: Reflexion einer Welle an einem gewölbten Hindernis

Läßt man geradlinige Wellen gegen ein konkav bzw. konvex gekrümmtes Hindernis laufen, so beobachtet man deutlich die Konvergenz bzw. Divergenz der reflektierten Wellen (Abb. 1.2.4./3a und b). Mißt man bei stroboskopischer Beleuchtung die Entfernung vom Scheitel des Hindernisses bis zum Brennpunkt, so kann man leicht feststellen, daß sie etwa halb so groß wie der Krümmungsradius des Hindernisses ist.

Geradlinige Wellenfronten entstehen durch Reflexion von Kreiswellen an einem konkav gekrümmten Hindernis, wenn man den Einpolerregger genau in den Brennpunkt des Hindernisses bringt (Abb. 1.2.4./4).

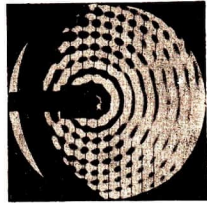


Abb. 1.2.4./4
Reflexion der im Brennpunkt
eines konkaven Hindernisses
erzeugten Kreiswellen

1.2.5. Versuche zur Geschwindigkeit von Oberflächenwellen

- | | |
|--|---|
| 1. Wasserwellengerät | halbrunder Einsatzkörper (für runde Wellenwanne), |
| 2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt | Wellenwanne), |
| 3. Erreger für geradlinige Wellen | rechteckiger Einsatzkörper (für rechteckige Wellenwanne), |
| 4. verschiedene Einsatzkörper zum Erzeugen von Flachwasserbereichen: | planparalleler Einsatzkörper |

Methodische Hinweise

1. Es handelt sich um Vorversuche für die Brechung von Wellen.
2. Versuch 2 kann auch als Anwendungsversuch demonstriert werden.

Versuch 1: Wellen senkrecht zur Kante des Einsatzkörpers

Sehr deutlich zeigt man die Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Wellenlänge der Oberflächenwellen von der Wassertiefe, wenn man die Wellenwanne in einen Tief- und einen Flachwasserbereich unterteilt und in beiden Bereichen senkrecht zur Trennlinie geradlinige Wellen laufen läßt. Bei stroboskopischer Beleuchtung kann man gut auszählen, wieviel Wellen im Flachwasserbereich auf eine vorgegebene Anzahl im Tiefwasserbereich entfallen (Abb. 1.2.5./1).

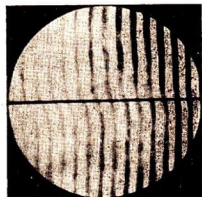


Abb. 1.2.5./1
Geradlinige Oberflächenwellen
im Tief- und
im Flachwasserbereich

Der Versuch läßt sich noch so abwandeln, daß man das planparallele Hindernis einbringt, damit eine Flachwasserrinne erzeugt und die linearen Wellen senkrecht an den Trennlinien der Rinne laufen läßt.

Versuch 2: Richtungsänderung schräger Wellen am Ufer

Man legt wie beim Versuch 1 eine Glas- oder Zelluloidplatte schräg in die Wellenwanne und erzeugt so eine Wasserschicht abnehmender Tiefe. Läßt man nunmehr geradlinige Wellen schräg gegen die Keilkannte des Flachwasserbereiches laufen, so nähern sich die Wellenfronten allmählich einer Parallelen zum Ufer (Abb. 1.2.5./2).



Abb. 1.2.5./2
Richtungsänderung
von linearen Wellen
am flachen Ufer

Bemerkung

Der entsprechende Vorgang ist in der Natur an flachen Ufern von Meeren und Seen zu beobachten.

1.2.6. Versuche zur Brechung von Oberflächenwellen

- | | |
|---|---|
| 1. Wasserwellengerät | oder trapezförmiger Einsatzkörper |
| 2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt | (für rechteckige Wellenwanne), |
| 3. Einpolverreger | planparalleler Einsatzkörper, |
| 4. Erreger für lineare Wellen | bikonvexer Einsatzkörper, |
| 5. verschiedene Einsatzkörper zur Brechung: | bikonkaver Einsatzkörper, |
| halbkreisförmiger Einsatzkörper | zwei kleine Hindernisse |
| (für runde Wellenwanne) | 6. Pipette zum Absaugen der Flüssigkeit |

Methodische Hinweise

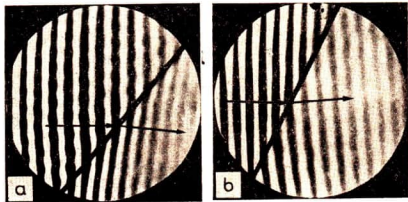
1. Es wird die Brechung von Wellen bei unterschiedlichen Bedingungen gezeigt.
2. Die Versuche dienen als Modellversuche für Lichtwellen.

Versuch 1: Brechung von Wellen an einer geradlinigen Trennschicht

In die Wellenwanne wird entweder der halbkreisförmige oder der trapezförmige Einsatzkörper gelegt. Durch Absaugen oder Hinzufügen von Wasser stellt man ein günstiges Verhältnis der Wassertiefen von Tief- und Flachwasserbereich ein. Vergleiche hierzu MB 1.2.0.3. ! Mit dem geradlinigen Erreger erzeugt man im Tiefwasserbereich lineare Wellen, die man unter einem Winkel von etwa 45° auf die Trennschicht zum Flachwasserbereich laufen läßt. Die Wellen werden zum Lot hin gebrochen, da der Übergang vom Tiefwasser zum Flachwasser einem solchen vom dünnen zum dichten Medium entspricht (Abb. 1.2.6./1a).

Keht man die Verhältnisse um und erregt die Wellen im Flachwasserbereich, so kann man den Übergang der Wellen vom dichten ins dünne Medium zeigen (Abb. 1.2.6./1b).

Abb. 1.2.6./1
Brechung von geradlinigen
Wellen beim Übergang
a) vom Tiefwasser
zum Flachwasser,
b) vom Flachwasser
zum Tiefwasser



Variante zu Versuch 1

Dieser Versuch entspricht in seiner Durchführung dem Versuch 1; man erregt lediglich Kreiswellen durch den Einpolarerregter. Die Wellenbilder zeigen deutlich die Brechung an der Trennschicht von Tief- und Flachwasser (Abb. 1.2.6./2a und b).

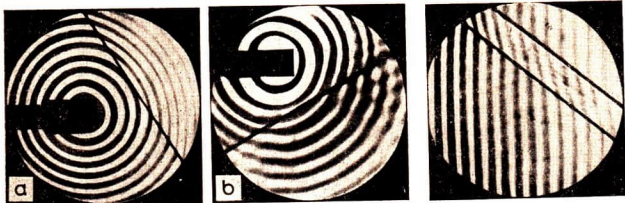


Abb. 1.2.6./2 Brechung einer Kreiswelle beim Übergang
a) vom Tiefwasser zum Flachwasser,
b) vom Flachwasser zum Tiefwasser

Abb. 1.2.6./3
Geradlinige Wellen
an einer Flachwasserrinne

Versuch 2: Brechung an zwei geradlinigen Trennschichten

Bringt man in die Wellenwanne einen planparallelen Einsatzkörper und läßt geradlinige Wellen schräg gegen den Flachwasserbereich laufen, so beobachtet man, daß durch die zweimalige Brechung an den beiden Trennschichten die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung wieder erreicht wird (Abb. 1.2.6./3). Der Einsatzkörper kann durch einen prismatischen ersetzt werden, wenn man die zweimalige Brechung der Wellen in einem Prisma demonstrieren will.

Versuch 3: Brechung von Wellen an gekrümmten Trennschichten

Analogieversuche zur Brechung des Lichtes an Linsen lassen sich durch Einsetzen von Körpern mit gekrümmten Begrenzungsflächen in der Wellenwanne durchführen. Zur deutlichen Beobachtung der Verformung der Wellenfronten begrenzt man die Wellenfronten beiderseits der Einsatzkörper durch geradlinige Hindernisse.

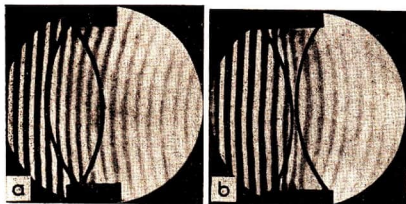


Abb. 1.2.6./4
Brechung
von Oberflächenwellen an
a) bikonvex,
b) bikonkav geformten
Trennschichten

Läßt man geradlinige Wellen gegen einen bikonvexen oder einen bikonkaven Einsatzkörper laufen, so kann man die sammelnde bzw. zerstreue Wirkung auf die Wellen gut beobachten (Abb. 1.2.6./4). Voraussetzung ist lediglich, daß der Krümmungsradius der Einsatzkörper nicht zu groß ist.

1.2.7. Die Beugung von Oberflächenwellen

1. Wasserwellengerät
2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt
3. Einpolarerregger
4. Erreger für geradlinige Wellen
5. Tropfpipette
6. verschiedene Einsatzkörper:
 - lineares Hindernis mit schmaler Öffnung,
 - ringförmiges Hindernis mit schmaler Öffnung,
 - mehrere verschieden lange, lineare Hindernisse,
 - Schraube oder starker Nagel mit Flachkopf

Methodischer Hinweis

Die Beugungsversuche mit Oberflächenwellen können als Modellversuch für die Beugung des Lichtes eingesetzt werden.

Versuch 1: Beugung an einer schmalen Öffnung

Der Versuch gleicht V 1.2.3. (Abb. 1.2.3./1).

Versuch 2: Beugung an einem kleinen Hindernis

Man erregt geradlinige Wellenfronten und setzt als schmales Hindernis eine Schraube oder einen Nagel mit Flachkopf auf den Boden der Wellenwanne. Dieses Hindernis wird zum Ausgangspunkt neuer Kreiswellen.

Versuch 3: Beugung an einer Kante

Blendet man durch ein Hindernis die Hälfte eines geradlinigen Wellenzuges ab, so kann man die Beugung an der Begrenzungskante deutlich beobachten (Abb.

1.2.7./1). Der Versuch gelingt auch, wenn man an Stelle der geradlinigen Wellen Kreiswellen erregt.

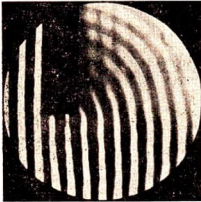


Abb. 1.2.7./1
Beugung einer
geradlinigen Welle
an einer Kante

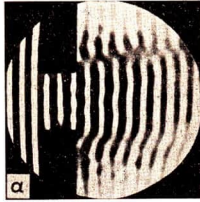
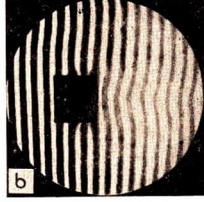


Abb. 1.2.7./2 Beugung von Wellen
a) am breiten Spalt,
b) am gleich breiten Hindernis



Versuch 4: Beugung an einem breiten Spalt

Man setzt zwei Hindernisse so in die Wellenwanne, daß zwischen ihnen ein breiter Spalt entsteht. Lineare Wellen erweisen sich hinter dem Spalt gebeugt (Abb. 1.2.7./2a). Ersetzt man den Spalt durch ein gleich großes Hindernis, so interferieren die an den Rändern des Hindernisses gebeugten Wellen (Abb. 1.2.7./2b).

Versuch 5: Beugung an einem Doppelspalt

Die Beugung und Interferenz von Wellen an einem Doppelspalt führt man vor, indem man geradlinige Wellen gegen ein Hindernis mit zwei schmalen Öffnungen laufen läßt. Der Abstand der Öffnungen soll dabei etwa 2 bis 3 Wellenlängen betragen. Den Doppelspalt kann man auch durch Zusammensetzen dreier Hindernisse aufbauen. Das Interferenzbild (Abb. 1.2.7./3) ähnelt der Abbildung 1.2.2./1 in V 1.2.2.

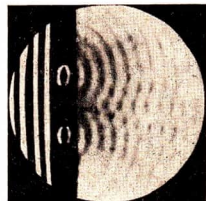


Abb. 1.2.7./3
Interferenz der gebeugten
Wellen hinter
einem Doppelspalt

1.2.8. Stehende Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen

1. Wasserwellengerät ohne stroboskopische Beleuchtung
2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt
3. Erreger für geradlinige Wellen
4. langes, geradliniges Hindernis

Methodischer Hinweis

Es wird demonstriert, wie analog zu V 1.1.4. bis 1.1.7. stehende Oberflächenwellen durch Reflexion entstehen.

Versuch

Stehende Wellen in der Wellenwanne erzeugt man, indem man geradlinige Wellen senkrecht gegen ein lineares Hindernis laufen läßt. Die ankommende und die reflektierte Welle interferieren. Ändert man die Entfernung vom Erreger zum Hindernis, so kann man leicht stehende Wellen erzeugen. Das ist dann erreicht, wenn trotz Fehlens der stroboskopischen Beleuchtung ein stillstehendes Wellenbild entsteht.

1.2.9. Versuche zum Dopplereffekt bei Oberflächenwellen*Zu Versuch 1*

1. WSP 220 mit Strömungswanne
2. Wasser, mit Benetzungsmittel versetzt
3. Einpolverreger

Zu Versuch 2

4. Wasserwellengerät
5. Einpolverreger, beweglich montiert

Methodischer Hinweis

Hier entstehen Bilder, die den Doppler-Effekt zeigen. Die Versuche sind als Modellversuche für die akustischen Versuche im V 1.3.27. zu werten.

Versuch 1: Dopplereffekt bei feststehendem Erreger

Auf dem WSP 220 baut man die Strömungswanne auf, die man mit Wasser füllt, das reichlich mit Benetzungsmittel versetzt wurde. Mit dem Einpolverreger erzeugt man in der Mitte der Strömungswanne Kreiswellen. Man arbeitet mit stroboskopischer Beleuchtung. Setzt man die Pumpe der Strömungswanne in Tätigkeit, so kann man in der Strömungsrichtung eine Verschiebung der Kreiswellen beobachten; die Wellenfronten werden auf der einen Seite zusammengedrängt, auf der anderen auseinandergezogen (Abb. 1.2.9./1). Der Effekt wird immer deutlicher sichtbar, je schneller man die Flüssigkeit in der Strömungswanne umlaufen läßt.



Abb. 1.2.9./1 Doppler-Effekt an Oberflächenwellen; ruhender Erreger, bewegtes Medium

Versuch 2: Dopplereffekt bei bewegtem Erreger

Der Effekt ist auch in jeder anderen Wellenwanne zu beobachten, wenn man den Einpolverreger geradlinig über die Wellenwanne bewegt. Es liegt dann der Fall der Wellenerzeugung bei ruhendem Medium und bewegtem Erregungszentrum vor.

1.2.10. Erzeugen modellmäßiger Interferenzbilder durch Diapositive oder Folien

Zu Variante a

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. Zeichnung einer Kreiswelle
(s. Beilageblatt) | 6. Entwickler (ORWO R 09) |
| 2. Spiegelreflex-Kleinbildkamera
($f = 50$ mm) | 7. Fixiersalz |
| 3. Belichtungsmesser | 8. Diapositivrahmen |
| 4. Reproduktionsgerät oder Stativ | 9. Kleinbildwerfer |
| 5. Kleinbilddfilm (ORWO NP 15) | 10. Projektionswand |

Zu Variante b

Gerät 10., außerdem

11. 2 Folien mit Kreiswellen
12. Tageslichtschreibprojektor

Methodische Hinweise

1. Der Einsatz von Diapositiven oder Folien, die Interferenzen unter verschiedenen Bedingungen zeigen, ist für die Erarbeitung und Festigung zu empfehlen, weil saubere, klare Bilder entstehen.
2. Die Abhängigkeit der Interferenzen von der Wellenlänge und von der Anzahl der Erregerzentren ist mit der Wellenwanne an wirklichen Wellen nur schwer zu demonstrieren.
3. Die Aufnahmen können als Modell für die Interferenzen des Lichtes benutzt werden.

Variante a

Anfertigung von Wellenbildern als Diapositiv

Auf dem Beilageblatt ist die Zeichnung einer Kreiswelle abgedruckt. Die schwarzen und die weißen Streifen sind je 5 mm breit. Mit dieser Zeichnung kann man die verschiedenartigen Bilder von Wellen und Wellenüberlagerungen auf fotografischem Wege herstellen. Durch unscharfe Einstellung bei der Aufnahme werden die Bilder Originalaufnahmen von Oberflächenwellen in einer Wellenwanne täuschend ähnlich. Als Filmmaterial empfiehlt sich der Kleinbilddfilm ORWO NP 15. Er wird 10 min lang in ORWO-Entwickler R 09 1:40 bei 20 °C entwickelt. Die Belichtung wird mit dem halben Wert ausgeführt, den man durch den Belichtungsmesser ermittelt. Es werden folgende Aufnahmen angefertigt, wobei die Aufnahmeentfernung von der Vorlage bis zur Filmebene gemessen wird:

1. und 2. Bild, Aufnahme einer Kreiswelle, Aufnahmeentfernung etwa 600 mm,
3. und 4. Bild, Aufnahme einer Kreiswelle, Aufnahmeentfernung etwa 400 mm,
5. und 6. Bild, Aufnahme einer Kreiswelle, Aufnahmeentfernung etwa 200 mm.

Nach jeder dieser Aufnahmen ist der Film um je zwei Bildlängen unbelichtet weiterzudrehen. Der Filmteil mit den Aufnahmen 1. bis 6. wird so in 6 Teile zerschnitten, daß sich an einer Seite jeder Aufnahme ein leerer Filmstreifen befindet.

Bei der 7. bis 13. Aufnahme werden durch Doppelbelichtung zwei Bilder übereinander fotografiert. Dabei wird die Zeichnung vor der zweiten Teilaufnahme verschoben.

7. Bild, Aufnahmeentfernung etwa 400 mm, Verschiebung 20 mm
(Abb. 1.2.10./1a)
8. Bild, Aufnahmeentfernung etwa 400 mm, Verschiebung 40 mm
(Abb. 1.2.10./1b)
9. Bild, Aufnahmeentfernung etwa 400 mm, Verschiebung 60 mm
(Abb. 1.2.10./1c)
10. Bild, Aufnahmeentfernung 245 mm, Verschiebung 30 mm
(Abb. 1.2.10./2a)

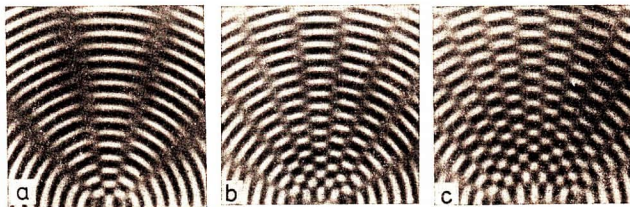


Abb. 1.2.10./1 a, b, c Abhängigkeit der Interferenzen vom Abstand der Erregerzentren bei gleicher Wellenlänge

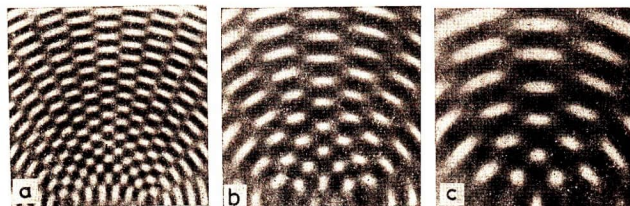


Abb. 1.2.10./2 a, b, c Abhängigkeit der Interferenzen von der Wellenlänge bei gleichem Abstand der Erregerzentren



Abb. 1.2.10./3 a, b, c Abhängigkeit der Interferenzen von der Anzahl der Erregerzentren

11. Bild, Aufnahmeentfernung 360 mm, Verschiebung 60 mm (Abb. 1.2.10./2b)
12. Bild, Aufnahmeentfernung 482 mm, Verschiebung 90 mm (Abb. 1.2.10./2c)
13. Bild, Aufnahmeentfernung 605 mm, Verschiebung 15 mm (Abb. 1.2.10./3a)
14. Bild, 3fach-Belichtung, Aufnahmeentfernung 605 mm, Verschiebung je 15 mm (Abb. 1.2.10./3b),
15. Bild, 4fach-Belichtung, Aufnahmeentfernung 605 mm, Verschiebung je 15 mm (Abb. 1.2.10./3c)

Die Aufnahmen 7 bis 15 werden in Diapositivrahmen eingefäßt.

Projizieren von Modellbildern der Interferenzen

a) Verwendung von zwei Diapositiven

1. Abhängigkeit der Interferenzen vom Abstand der Erregerzentren

Man legt ein Aufnahmepaar (1. und 2., 3. und 4. oder 5. und 6.) übereinander in die Bildbandführung eines Kleinbildwerfers. Verschiebt man die beiden Aufnahmen gegeneinander, so kann man die Veränderung der Interferenzen in Abhängigkeit vom Abstand der Erregerzentren nachweisen.

2. Abhängigkeit der Interferenzen von der Wellenlänge

Auf Grund der unterschiedlichen Aufnahmeentfernung erscheinen die Aufnahmen wie Bilder von Wellen mit verschiedener Wellenlänge. Man bringt in den Strahlengang des Bildwerfers zwei Stativstangen, so daß man am unteren Rand des Bildes den Abstand der Erregerzentren markieren kann. Nacheinander setzt man die drei Aufnahmepaare mit gleichem Abstand der Erregerzentren ein und weist so die Interferenzen bei verschiedenen Wellenlängen nach.

b) Verwendung der Einzeldiapositive

1. Die Bilder 7, 8 und 9 entsprechen den Ergebnissen von a) 1. und zeigen die Abhängigkeit der Interferenzen vom Abstand der Erregerzentren (Abb. 1.2.10./1).
2. Die Aufnahmeentfernungen und Verschiebungen bei den Aufnahmen 10, 11 und 12 sind so gewählt, daß bei verschiedener Wellenlänge der gleiche Abstand der Erregerzentren erscheint (Abb. 1.2.10./2).
3. In den Bildern 13, 14 und 15 wird die Abhängigkeit der Interferenzen von der Anzahl der Erregerzentren gezeigt. Es ist zu erkennen, daß die Lage der Hauptmaxima unverändert bleibt. Sie werden aber schmaler. Mit zunehmender Zahl der Erregerzentren treten mehr und schwächere Nebenmaxima auf (Abb. 1.2.10./3b und c). Derartige Bilder können auch erzeugt werden, indem man einem Bild 13 ein zweites überlagert und es so verschiebt, daß 2, 3 oder 4 Erregerzentren erscheinen.

Bemerkungen

1. Bei den meisten Typen von Spiegelreflexkameras erreicht man eine Doppelbelichtung, indem man den Rückspulknopf drückt und dabei den Filmtransport

betätigt. Dadurch wird der Verschluss gespannt, aber der Film nicht transportiert.

2. Es ist empfehlenswert, zusätzlich noch eine Aufnahme mit den Daten der Aufnahme zu machen. An einer solchen Aufnahme ist gut zu erkennen, wie die Interferenzen entstehen.

Variante b: Einsatz von Folien zur Demonstration von Interferenzen.

Die Unterrichtsmittelindustrie bietet die Folie „Eigenschaften mechanischer Wellen Teil II“ an, die sich für die Demonstration wichtiger Interferenzerscheinungen sehr gut eignet.

Das Unterrichtsmittel besteht aus einer Grundfolie und einer Deckfolie mit je einem System konzentrischer Kreise. Die Deckfolie ist gegenüber der Grundfolie um einen Eckpunkt drehbar angebracht worden. Dadurch kann erreicht werden, daß die Erregerzentren einen gewünschten Abstand zwischen 0 und 10 Wellenlängen einnehmen. Somit läßt sich die Erscheinung der Interferenz modellieren und die Abhängigkeit der Interferenzen vom Abstand der Erregerzentren demonstrieren. Abbildung 1.2.10./4 zeigt das Bild für einen Abstand der Zentren von 3 Wellenlängen.

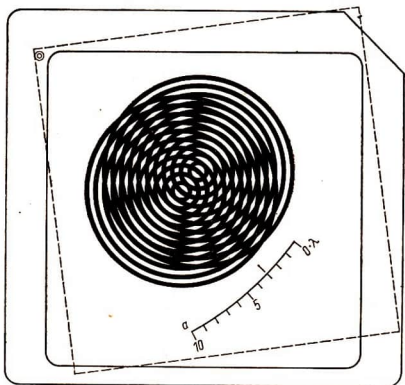


Abb. 1.2.10./4 Folie "Eigenschaften mechanischer Wellen, Teil II"

1.3. Schallwellen

1.3.1. Schallerzeugung durch schwingende feste Körper

Zu Versuch 1

1. Stahlblechstreifen

Zu Versuch 2

2. Stahldraht (etwa 700 mm)

Zu Versuch 3

3. Metallplatte (Gong)

4. Anschlaghammer

5. Perle am Zwirnsfaden

Methodischer Hinweis

Die Versuche können dazu benutzt werden, zu demonstrieren, daß von schwingenden Körpern mechanische Wellen ausgehen.

Versuch 1: Schallerzeugung durch eine schwingende Blattfeder

Eine Blattfeder wird nach Abbildung 1.3.1./1 am Tisch befestigt. An Stelle der Stativteile kann auch ein kleiner Schraubstock verwendet werden. Man reißt den Stahlblechstreifen kurz an, so daß er kräftig schwingt. Das freie Ende der Blattfeder ist so kurz zu wählen, daß der durch die Schwingung entstehende Ton deutlich zu vernehmen ist.

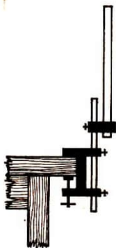


Abb. 1.3.1./1
Tischklemme als Haltevorrichtung für eine Blattfeder

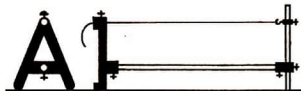


Abb. 1.3.1./2
Spannvorrichtung für einen Draht

Versuch 2: Schallerzeugung durch einen gespannten Draht

Der Aufbau ist aus Abbildung 1.3.1./2 ersichtlich. Dabei wird das Drahtende in die Öffnung für den Einsatz geführt und mit der Knebelschraube festgeklammert. Ist die Schraube zu kurz, so steckt man zusätzlich einen Metallstift von 10 mm Durchmesser in die Bohrung. Man erregt den Draht durch Zupfen oder Streichen zum Schwingen. Bei genügend straffer Spannung ist deutlich ein Ton zu hören.

Versuch 3: Schallerzeugung durch eine Metallplatte

Ein Gong oder eine andere Metallplatte wird mit einem Faden an ein Stativ gehängt. Schlägt man mit dem Anschlaghammer an die Platte, so ist deutlich der entstehende Ton wahrzunehmen. Da die Schwingung der Platte nicht unmittelbar sichtbar wird, weist man sie mit einer an einem Zwirnsfaden befestigten Perle nach. Berührt man mit der Perle die schwingende Platte, so wird die Perle von der Platte zur Seite geschleudert.

Bemerkung zu Versuch 1

Der Versuch kann als Freihandversuch ausgeführt werden, indem man eine Stricknadel mit den Fingerspitzen auf die Tischplatte drückt, so daß ein etwa 10 cm langes Stück der Nadel über die Tischkante hinausragt.

1.3.2. Schallerzeugung durch periodische Luftstöße — Abhängigkeit der Tonhöhe von der Frequenz

Zu Versuch 1

1. Lochsirene mit Einspannvorrichtung
2. Blasrohr mit Spitze
3. Schwungmaschine

Zu Versuch 2

4. Zahnradsirene
5. Streifen aus Karton oder Plast

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt das Erzeugen von Schallwellen durch eine Folge von verdichteter Luft (beim Öffnen) und verdünnter Luft (beim Verdecken) — entstanden infolge der Trägheit der bewegten Luft.
2. Der Versuch ist Modell für das Entstehen von Sirenentönen, die bei Rotation von Geräten auftreten, wie z. B. beim Singen von Motoren und Turbinen, beim Kreischen einer Kreissäge.

Versuch 1: Schallerzeugung mit einer Lochsirene

Man spannt die Lochsirene in die vertikal aufgestellte Schwungmaschine (Abb. 1.3.2./1). Versetzt man die Lochscheibe in möglichst gleichmäßige Umdrehungen

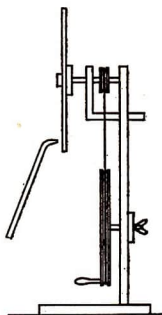


Abb. 1.3.2./1 Lochsirene auf einer Schwungmaschine

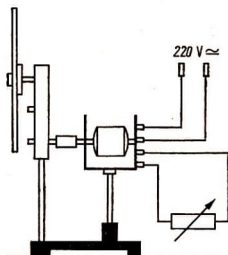


Abb. 1.3.2./2 Lochsirene, durch einen Elektromotor angetrieben

und bläst mit einem Blasrohr gegen die innere Lochreihe, so ist ein Ton zu hören. Führt man das Blasrohr von innen nach außen, so wird der Ton infolge der zunehmenden Lochzahl und der dadurch bedingten steigenden Frequenz der Luftstöße höher. Enthalten die Lochreihen 24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48 Löcher, so ist beim Anblasen die Dur-Tonleiter zu hören. Aus der Anzahl der Löcher können die Frequenzverhältnisse der einzelnen Intervalle entnommen werden.

Auch durch Erhöhen oder Verringern der Drehzahl kann bei gleichbleibender Stellung des Blasrohres die Tonhöhe verändert werden. Die Lautstärke hängt von der Stärke des Luftstromes ab.

Versuch 2: Schallerzeugung mit einer Zahnradsirene

An Stelle der Lochscheibe wird eine Zahnradsirene in die Schwungmaschine gespannt. Hält man einen Kartonstreifen schräg gegen eines der Zahnräder, so wird er durch die vorbeigleitenden Zähne zum Schwingen gebracht, und man hört einen Ton. Die Tonhöhe ist von der Anzahl der Zähne und von der Drehzahl abhängig.

Bemerkung

Um eine möglichst konstante Drehzahl zu erhalten, kann man an Stelle der Schwungmaschine einen Experimentiermotor verwenden (Abb. 1.3.2./2).

1.3.3. Aufzeichnen der Schwingungen einer Stimmgabel*Zu Variante a*

1. Stimmgabel mit Schreibspitze
2. beruhte Glasplatte
3. Anschlaghammer
4. Bildwerfer

Zu Variante b

5. Stimmgabel
6. kleiner Spiegel (etwa 10 mm × 10 mm)
7. Physikleuchte mit Lochblende und Transformator
8. Drehspiegel
9. Transparentschild
10. Knetmasse oder Siegellack

Zu Variante c

Geräte 5., 7., 9., außerdem

11. stroboskopische Scheibe aus Blech oder Pappe ③
12. Lagerzapfen

Methodischer Hinweis

Hier sollen die Schwingungen, die einem Ton zugrunde liegen, auf verschiedene Weise sichtbar gemacht werden.

Variante a: Verwendung einer beruhten Glasplatte

Das Schwärzen einer Diagonalplatte nimmt man mit einer Kerze vor, in deren Flamme die Glasplatte streifenweise beruht wird. Man schlägt die Stimmgabel an und zieht die Schreibspitze schnell über die bewuhte Platte. Zum Betrachten der Aufzeichnung steckt man das Glas in den Lichtschacht eines Bildwerfers.

Variante b: Verwendung eines Lichtzeigers

Man befestigt den Spiegel mit Knetmasse, Siegellack o. ä. an einem Zinken der Stimmgabel. Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 1.3.3./1 zu ersehen. Die Physikleuchte mit Lochblende richtet man so ein, daß auf dem Schirm ein kleiner

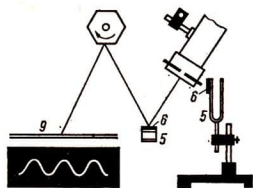


Abb. 1.3.3./1 Versuchsanordnung von oben gesehen: vorn links: die Kurve auf dem Transparenzschirm, vorn rechts: die Stimmgabel am Stativ

Lichtpunkt zu sehen. Versetzt man die Stimmgabel in Schwingungen, so bewegt sich der Lichtpunkt auf und nieder; es ist ein Lichtstreifen zu sehen. Setzt man den Drehspiegel in Bewegung, so wird dieser Streifen zu einer Sinuskurve auseinander gezogen.

Variante c: Betrachtung durch eine stroboskopische Scheibe

Betrachtet man eine schwingende Stimmgabel durch eine stroboskopische Scheibe, so erscheint sie sinusförmig verzeichnet (Abb. 1.3.3./2). Eine Beobachtung in der Schattenprojektion ist eindrucksvoller. Die stroboskopische Scheibe kann man aus Blech oder Pappe selbst herstellen. Ihr Durchmesser soll etwa 400 mm betragen. Sie wird mit radialen Schlitzern versehen und schwarz gestrichen. Man steckt sie auf einen Lagerzapfen und versetzt sie mit der Hand in Drehung.

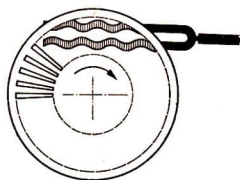


Abb. 1.3.3./2 Beobachtung einer Stimmgabel durch eine stroboskopische Scheibe

Bemerkung

Steht eine Stimmgabel mit Schreibspitze nicht zur Verfügung, befestigt man ein dünnes Stahldrähtchen mit Siegelack am Ende eines Zinkens einer Stimmgabel mit möglichst niedriger Frequenz.

1.3.4. Aufzeichnen der Schwingungsformen von Saiten

1. Monochord
2. Geigenbogen
3. stroboskopische Scheibe mit Achszapfen ® (vgl. V 1.3.3.)

Methodischer Hinweis

Hier sollen die Schwingungen, die einem Klang (Gemisch aus Grund- und Obertönen) zugrunde liegen, sichtbar gemacht werden.

Versuch

Die stroboskopische Scheibe wird so am Stativ befestigt, daß man die schwingende Saite durch ihren oberen oder unteren Teil beobachten kann. Versetzt man die Scheibe in möglichst rasche Rotation, zupft man die Saite nach oben an und betrachtet sie durch die rotierenden Schlitze, so erkennt man bei geeigneter Drehzahl die Schwingungsform der Saite in Form einer Kurve (Abb. 1.3.4./1). Erregt man die Saite mit einem Geigenbogen, dann sollte man ihn beim Streichen möglichst steil führen, damit die Saite nahezu vertikal schwingt.

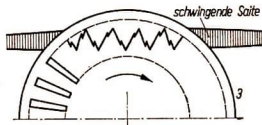


Abb. 1.3.4./1 Beobachtung einer schwingenden Saite durch eine stroboskopische Scheibe

Unterschiedliche Schwingungsformen erzielt man, wenn man die Saite an verschiedenen Stellen erregt oder sie in verschiedenen Obertönen klingen läßt.

Bemerkungen

1. Der Versuch ist auch für objektive Beobachtung geeignet, wenn Schattenprojektion oder Abbildung mit einer Konvexlinse angewandt werden.
2. Die Drehzahl der Scheibe nimmt nach einmaligem Anstoßen beständig ab. Dabei steht das Bild jeweils nur vorübergehend für kurze Zeit still. Stehende Bilder erzielt man, wenn man die Scheibe mit dem Experimentiermotor antreibt.
3. Steht das WSP zur Verfügung, so spannt man die Saite unmittelbar über dessen Linse aus. Bei richtiger Einstellung der Umdrehungszahl der stroboskopischen Scheibe erhält man ein stehendes Bild nach Abbildung 1.3.4./1.

1.3.5. Aufzeichnen verschiedener Schwingungsformen durch einen Katodenstrahloszillografen

1. Katodenstrahloszillograf
2. Schallautsprecher, hochohmig
3. Stimmgabel
4. Anschlaghammer
5. 2 Lippenpfeifen, davon eine mit verschiebbarem Stempel

Methodischer Hinweis

Der Versuch dient zur Unterstützung des Musikunterrichts. Die Unterschiede zwischen Ton, Klang und Geräusch sollen physikalisch geklärt werden.

Vorbemerkung

Der Lautsprecher dient als Mikrophon. Man schließt ihn an die Vertikalablenkung eines Katodenstrahloszillografen an, wählt eine ausreichende Verstärkungsstufe und eine günstige Kippfrequenz. Da zu den Teilversuchen Schallwellen unterschiedlicher Frequenz verwendet werden, ist jedesmal die Frequenzeinstellung zu ändern.

Versuch 1: Aufzeichnen der Schwingungsform eines Tones

Man pfeift dicht vor dem Lautsprecher einen Ton möglichst konstanter Frequenz. Man schlägt die Stimmgabel an und hält sie dicht vor den Lautsprecher. In beiden Fällen ist eine Sinuskurve nach Abbildung 1.3.5./1a auf dem Bildschirm zu sehen.

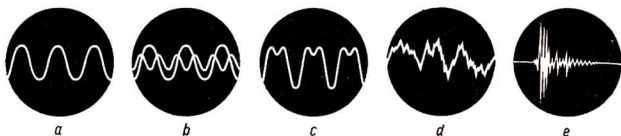


Abb. 1.3.5./1 Schallaufzeichnungen durch einen Katodenstrahloszillografen:

a) Ton, b) zwei getrennte Töne, c) der aus ihnen gebildete Klang, d) Geräusch, e) Knall

Versuch 2: Aufzeichnen der Schwingungsform eines Klanges

Auf einer Lippenpfeife mit verschiebbarem Stempel werden nacheinander zwei Töne einer harmonischen Tonreihe, z. B. Grundton und Oktave, dicht vor dem Lautsprecher angeblasen. Man erhält dann nacheinander die in Abbildung 1.3.5./1b wiedergegebenen Schwingungsformen. Bläst man diese Töne mit zwei Pfeifen gleichzeitig an, so entsteht ein Klang. Man erhält die Schwingungsform nach Abbildung 1.3.5./1c. Es ist eine periodische Schwingung, die man mathematisch in die beiden Einzelschwingungen zerlegen kann.

Sehr eindrucksvoll ist die Aufzeichnung der Schwingungsform des Klanges der menschlichen Stimme. Singt man nacheinander vor dem Lautsprecher mit gleicher Tonhöhe und Lautstärke die Vokale a, e, i, o, u, so erhält man nacheinander die verschiedenen Schwingungsformen dieser Klänge.

Versuch 3: Aufzeichnen eines Geräusches

Erzeugt man ein Geräusch, indem man etwa kurz vor dem Lautsprecher auf der Tischplatte reibt oder Papier zerknittert, so werden auf dem Bildschirm unregelmäßige Schwingungen nach Abbildung 1.3.5./1d sichtbar.

Versuch 4: Aufzeichnen eines Knalls

Man schlägt mit dem Anschlaghammer kurz auf den Tisch, auf dem der Lautsprecher steht. Besonders wirkungsvoll ist das Zerplatzen einer aufgeblasenen Tüte. Die Schwingungsform entspricht der Abbildung 1.3.5./1e.

Bemerkung

Statt der beiden Lippenpfeifen kann auch eine Mundharmonika verwendet werden, auf der man gleichzeitig zwei Töne anbläst.

1.3.6. Nachweis von Schallwellen durch sensitive Flammen

1. Glaskolben mit ausgezogener Spitze
2. Gummischlauch

Methodischer Hinweis

Die sensitive Flamme ist ein sehr empfindliches Nachweisgerät für Schallwellen aller Frequenzen.

Versuch

Der Glaskolben wird als Brenner für sensitive Flammen nach Abbildung 1.3.6./1 aufgestellt. Mit dem Anzünden muß man so lange warten, bis das Stadtgas die Luft aus dem Kolben verdrängt hat. Durch Verstellen des Einlaßhahnes erreicht man, daß die Flamme empfindlich reagiert. Sie muß bei Geflüster aus nächster Nähe stark zusammensucken.

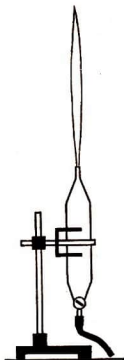


Abb. 1.3.6./1 Brenner für sensitive Flammen

Man stellt sich an die Rückwand des Unterrichtsraumes. Nacheinander führt man etwa folgende Tätigkeiten aus: Zählen, Rasseln mit einem Schlüsselbund, Zerknittern von steifem Papier, mit den Händen klatschen usw. In jedem Falle zuckt die Flamme rhythmisch je nach Stärke und Art des Schalles.

Bemerkung

Statt des Glaskolbens kann auch ein Glasrohr von etwa 5 mm lichter Weite verwendet werden, das man zu einer Spitze auszieht. Die Spitze soll eine Öffnung von 0,5 mm ... 1 mm Durchmesser haben.

1.3.7. Versuch zur Schallausbreitung in der Luft

1. Papprohr (\varnothing etwa 70 mm)
2. Zellophan
3. Kerze
4. Glaskolben mit ausgezogener Spitze
5. Gummischlauch

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt, daß sich mit einer Welle Energie ausbreitet, aber kein Stoff. Die Rauchwirbel bleiben hinter der Welle weit zurück.

Versuch

Man stellt eine Luftstoßtrommel nach Abbildung 1.3.7./1 aus einer Pappröhre her. Das eine Ende der Röhre wird mit Karton beklebt, in den man eine kreisförmige Öffnung von etwa 30 mm ... 50 mm Durchmesser schneidet. Das zweite Rohrende bespannt man mit Zellophan. Bläst man Zigarettenrauch in die Trommel und klopft leicht gegen die Zellophanhaut, so werden im Rhythmus der Schläge Rauchwirbel ausgestoßen.



Abb. 1.3.7./1
Luftstoßtrommel

Richtet man die Rauchwirbel gegen eine sensitive Flamme, die in einer Entfernung von einigen Metern aufgestellt ist, so erkennt man deutlich, daß die Flamme jeweils bereits zuckt, wenn der Schlag gegen die Membran ausgeführt wird, während sie der Rauchwirbel erst bedeutend später erreicht. Der Versuch zeigt, daß Luftwirbel oder Luftverschiebungen nicht die Ursache für die Ausbreitung des Schalls sein können.

Bemerkung

Als weitere Modellversuche zur Luftverschiebung sind Versuche aus dem 1. und 2. Teil der „Physikalischen Schulversuche“ geeignet.

1.3.8. Die Luft als Träger der Schallausbreitung

1. Rezipient
2. Teller mit Stiefelluftpumpe oder Wasserstrahlpumpe oder Drehschieber-Hochvakuumpumpe

3. elektrische Klingel oder Summer
4. Stromversorgungsgerät oder Flachbatterie
5. Wollfaden, Siegellack, Klingeldraht
6. Filzunterlage
7. Lamettafäden

Methodischer Hinweis

Der Versuch zeigt eindeutig, daß zur Ausbreitung von Schallwellen ein Medium erforderlich ist.

Versuchsaufbau

Die Schallquelle wird mit einem Woll- oder Gummifaden und etwas Siegellack an der Glasglocke befestigt. Die Spannungsquelle, eine Taschenlampenbatterie, stellt man ebenfalls unter dem Rezipienten auf eine Filzunterlage. Besitzt der Rezipient einen oberen Tubus, so verschließt man ihn mit einem Gummistopfen, an dem man die Schallquelle aufhängt. Die Stromzuführung erfolgt dann über zwei Lamettafäden. Man führt sie zwischen dem Gummistopfen und der Glaswand hindurch (Abb. 1.3.8./1).

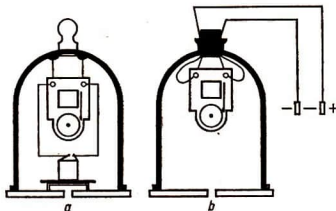


Abb. 1.3.8./1 Rezipient
a) mit Schallquelle und Batterie,
b) mit Gummistopfen und Schallquelle

Versuch

Schließt man den Stromkreis, so ist das Klingeln oder Summen durch die Glaswand des Rezipienten deutlich zu hören. Evakuiert man ihn mit Hilfe einer Luftpumpe, so wird der Schall allmählich leiser. Obwohl man an der Klingel die Bewegung des Klöppels deutlich sehen kann, ist schließlich der Schall kaum noch zu hören. Läßt man wieder Luft in den Rezipienten einströmen, dann nimmt mit zunehmendem Druck auch die Lautstärke zu. Da diese Zunahme in kurzer Zeit erfolgt, ist der Unterschied ganz besonders auffällig.

1.3.9. Leitung des Schalles in verschiedenen Stoffen

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (8 V—) | 6. Eisenstab (750 mm) |
| 2. Summer oder Klingel | 7. Holzstab (750 mm) |
| 3. Mikrofonmodell nach V 1.3.7.
im 9. Teil | 8. Glasstab oder -rohr (750 mm) |
| 4. Demonstrationsdrehspulmeßgerät (50 mA) | 9. Schalter |
| 5. Schiebewiderstand (300 Ω) | |

Methodischer Hinweis

Hier soll gezeigt werden, daß neben Luft auch andere Medien für die Ausbreitung des Schalls in Frage kommen.

Versuchsordnung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.3.9./1. Das Meßgerät dient hier zur Anzeige der Schallstärke, die vom Mikrofon aufgenommen wird. Mit Hilfe des Widerstandes stellt man die Stromstärke im Mikrofonstromkreis so ein, daß der Zeiger voll ausschlägt. Der Ausschlag nimmt mit zunehmender Schallstärke infolge Vergrößerung des Widerstandes zwischen den Kohlestäben ab.

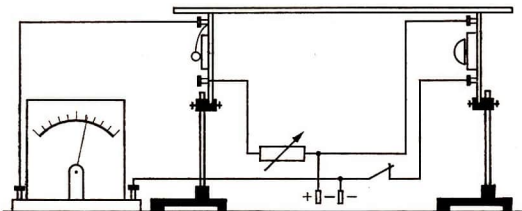


Abb. 1.3.9./1 Veranschaulichen der Schalleitung in verschiedenen Stoffen

Versuch

Schaltet man den Summer ein, so beträgt der Rückgang des Zeigers etwa einen Skalenteil. Die Schalleitung erfolgt hierbei durch Luft. Legt man nun nacheinander den Holz-, den Eisen- und den Glasstab zwischen den Summer und das Mikrophon, so daß sie auf beiden Geräten aufliegen, so erfolgt die Schalleitung vorwiegend in diesen Stoffen. Der Zeigerausschlag beträgt 6 bis 10 Skalenteile.

**1.3.10. Leitung des Schalles in festen Stoffen —
Das Fadentelefon [SE]**

1. Papprohr
2. Zellophanhaut oder Plastikfolie
3. 20 m Zwirn

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist als Hausversuch geeignet. Er demonstriert die Ausbreitung des Schalls in Bindfäden. Die Schüler können ihre physikalischen Kenntnisse zum Bau eines Spielzeugs einsetzen.

Versuch

Je eine Öffnung zweier kurzer Papprohre wird mit Zellophanhaut oder Plastikfolie bespannt. Man durchsticht die Membran in der Mitte, führt den Faden hindurch

und knotet an sein Ende ein Stück eines Streichholzes (Abb. 1.3.10./1). Spricht man leise in eine der Dosen, so wird der Schall durch den mäßig straff gespannten Faden übertragen und von der Membran der zweiten Dose wieder abgestrahlt. Zum Hören hält der Gesprächspartner die Dose wie den Hörer eines Telefons an das Ohr.

Abb. 1.3.10./1 Fadentelefon



Bemerkungen

1. Statt der Papprohre mit Zellophanhaut können auch die beiden Hälften einer Plastschachtel (Bonbonschachtel) verwendet werden.
2. Beim Sprechen und Hören müssen die Membranen frei schwingen können, man darf die Dosen deshalb nur am Rand anfassen.

1.3.11. Leitung des Schalles in festen Stoffen — Übertragung der Schwingungen eines Stahlstabes durch Bindfaden [SE]

1. Stativstab (500 mm) oder Feuerhaken
2. Anschlaghammer aus Metall oder beliebiges Metallstück
3. Bindfaden

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.3.10.!

Versuch

Die Mitte eines etwa 1 m langen Bindfadens wird mit einer Schlaufe am Ende eines Stativstabes befestigt. Man drückt die Enden des Fadens gegen den äußeren Gehörgang beider Ohren, so daß der Stab frei herabhängt. Schlägt jemand mit einem metallischen Gegenstand gegen den Stab, so hört man den Klang des Stahlstabes sehr kräftig. Er erinnert an den Klang einer Glocke.

Bemerkung

Die Leitung des Schalles kann auch objektiv demonstriert werden, wenn man die oberen Enden des Fadens an ein Mikrofon bindet und dieses über einen Verstärker an einen Lautsprecher anschließt.

1.3.12. Bestimmen der Schallgeschwindigkeit in Luft

1. Stoppuhr
2. Gong mit Klöppel oder Startklappe
3. Karte (1:50000) der Umgebung des Schulortes

Methodischer Hinweis

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle in einem Medium ist ein wesentliches Merkmal aller Wellen. Sie wird hier ohne großen technischen Aufwand für Luft bestimmt.

Variante a: Verwendung eines Gongs oder einer Startklappe als Schallquelle

In einer Entfernung von mindestens 350 m wird an einer Stelle, die von den Beobachtern gut zu sehen ist, ein Schüler aufgestellt. Dieser erhält den Auftrag, in größeren Abständen eine Startklappe zu betätigen oder weitausholend einen Gong zu schlagen. Bei der Beobachtergruppe wird der Zeitabstand zwischen dem Zusammenschlagen der Klappe bzw. dem Auftreffen des Klöppels und dem Hören des Schalles gemessen. Je weiter die Entfernung gewählt werden kann — dies hängt von der Beschaffenheit des Geländes und von der Stärke der Schallquelle ab —, um so eindrucksvoller ist die Wirkung bei den Schülern.

Variante b: Beobachten einer Dampfpfeife

Ist die Dampfpfeife eines Werkes direkt sichtbar, so läßt sich mit diesem Betrieb vereinbaren, daß zu einer verabredeten Zeit die Dampfpfeife einige Male betätigt wird. Da die Entfernung hier einige Kilometer betragen kann, ist der Zeitraum zwischen dem Ausströmen des Dampfes und dem Hörbarwerden des Tons verhältnismäßig lang. Die Wirkung auf die Schüler ist besonders eindrucksvoll. Die Entfernung wird der Karte entnommen.

1.3.13. Bestimmen der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe Lissajousscher Figuren

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Stimmgabel (440 Hz) auf Resonanzkasten | 4. Katodenstrahloszillograf |
| 2. Anschlaghammer | 5. Meßstab |
| 3. 2 Mikrofone (s. Bemerkung 1) | |

Methodischer Hinweis

Hier wird mit größerem technischem Aufwand die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmt. Der Versuch ist nur für Arbeitsgemeinschaften geeignet.

Vorbemerkung

Bei diesem Versuch werden mit einem Katodenstrahloszillografen die Schwingungsphasen eines Schallwellenfeldes in verschiedenen Entfernungen von der Schall-

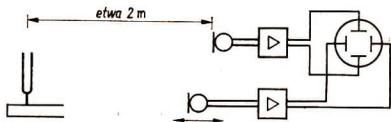


Abb. 1.3.13./1
Versuchsanordnung zur Messung der Schallgeschwindigkeit

quelle verglichen (Abb. 1.3.13./1). Bei Phasengleichheit ist die Differenz der Entfernungen gleich

$$k \cdot \lambda$$

für $k = 0; 1; 2; 3;$ usw.

Versuchsvorbereitung

Das Kippperät des Oszillografen wird ausgeschaltet. Nun schließt man ein Mikrofon an den X-Eingang des Gerätes an. Erregt man die Stimmgabel, so wird auf dem Bildschirm des Oszillografen eine waagerechte Linie gezeichnet. Der Verstärker für Horizontalablenkung wird so eingestellt, daß diese Linie beim Anschlagen der Stimmgabel die Ränder des Bildschirms fast erreicht. Nun trennt man das Mikrofon vorübergehend vom Oszillografen und schließt das zweite an den Y-Eingang an. Auf dem Bildschirm wird beim Erregen der Stimmgabel eine vertikale Linie sichtbar. Der zugehörige Verstärker wird ebenso eingestellt wie für die Horizontalablenkung.

Versuch

Die beiden Mikrofone werden dicht nebeneinander, also in gleicher Entfernung von der Schallquelle aufgestellt. Nach dem Erregen der Stimmgabel wird auf dem Bildschirm eine Linie sichtbar, die schräg, von rechts oben nach links unten, verläuft. Bei richtiger Einstellung der Verstärker beträgt ihr Anstiegswinkel 45° (Abb. 1.3.13./2a). Sie kennzeichnet Phasengleichheit.

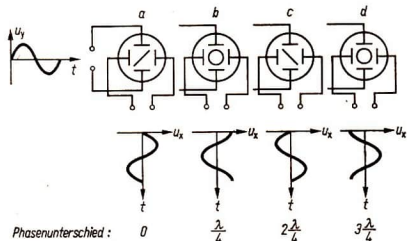


Abb. 1.3.13./2
Oszillogramm bei verschiedenen
Phasenunterschieden

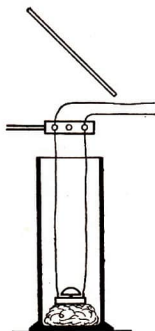
Verschiebt man eins der Mikrofone allmählich auf die Schallquelle zu, so entsteht aus dieser Geraden eine Ellipse, die in einen Kreis übergeht (Abb. 1.3.13./2b). Ihm entspricht ein Phasenunterschied von $\frac{\lambda}{4}$. Über eine Gerade (Abb. 1.3.13./2c) und einen Kreis (Abb. 1.3.13./2d) erhält man schließlich wieder das gleiche Bild wie in der Ausgangsstellung (Abb. 1.3.13./2a). Es ist also wieder Phasengleichheit erreicht worden. Das Mikrofon wurde somit um eine Wellenlänge λ verschoben. Sie kann als Abstand der beiden Mikrofone gemessen werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles berechnet man nach der Gleichung

$$c = f \cdot \lambda.$$

Bemerkungen

1. Als Mikrofone eignen sich Tauchspulmikrofone, Kristallmikrofone mit Vorverstärker oder zwei hochohmige Lautsprecher, die man als Tauchspulmikrofone verwendet.
2. Stehen im Oszillografen keine eingebauten Verstärker zur Verfügung, so schaltet man getrennte Verstärker, z.B. Schulverstärker, vor. Dabei muß im allgemeinen der Verstärkerausgang mit einem Widerstand von etwa $10\text{ k}\Omega$ als Arbeitswiderstand der Verstärkerröhre überbrückt werden.
3. Durch einen vorgeschalteten Verstärker kann Phasenumkehr eintreten, so daß bei Phasengleichheit ein Oszillogramm nach Abbildung 1.3.13./2c entsteht.
4. Die im Versuch benutzte Schallquelle hat den Nachteil, daß sie immer wieder neu erregt werden muß. Besser ist ein Tongenerator geeignet, der auf einen Ton bekannter Frequenz eingestellt werden kann (s. V 3.1.14.).
5. Wenn ein entsprechender Digitalzähler zur Verfügung steht, kann man die Laufzeit des Schalls auf eine Entfernung von etwa $1,7\text{ m}$ direkt messen. Zwei Mikrofone oder Lautsprecher werden in diesem Abstand aufgestellt. Das erste öffnet das Tor zur Zeitmessung, das zweite schließt es. Man erzeugt durch das Aufeinanderschlagen zweier Bretter vor dem ersten Mikrofon einen Knall. Ändert man den Abstand der Mikrofone geringfügig so, daß die Zeitdauer 50 zehntausendstel Sekunden beträgt, ist das Ergebnis leicht errechenbar.

1.3.14. Reflexion des Schalles durch einen ebenen Spiegel [SE]

1. Stromversorgungsgerät
2. Summer oder Klingel
3. weiter, hoher Standzylinder
4. Spiegel
5. Watte oder Wolltuch
6. Klemmenstange

Abb. 1.3.14./1

Nachweis der Reflexion des Schalles durch einen ebenen Spiegel

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann als Anwendung der Reflexion von Wellen im Unterricht gezeigt werden.

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 1.3.14./1. Dabei ist auf gute Schalldämmung zu achten. Auch die Leitungen zum Summer sollten die Glaswand nicht berühren. Die Spannung wird so gewählt, daß der Summer möglichst leise tönt.

Hält man den Spiegel um etwa 45° geneigt über den Zylinder, so hören die Schüler, die die Schallquelle im Spiegel sehen, deutlich eine Zunahme der Schallstärke. Durch Drehen des Spiegels verändert man die Reflexionsrichtung allmählich so, daß nacheinander alle Schüler die Veränderung wahrnehmen können.

Bemerkungen

1. Erscheint die Regelung der Spannung am Stromversorgungsgerät zu grob, dann kann ein Schiebewiderstand von etwa 110Ω als Potentiometer dazwischengeschaltet werden.
2. Statt des Summers kann auch eine möglichst laut tickende Taschenuhr verwendet werden.

1.3.15. Freihandversuch zur Reflexion des Schalles [SE]

1. 2 Regenschirme
2. Weckuhr

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist dazu geeignet, nachzuweisen, daß auch der Schall ähnlich wie das Licht durch gewölbte Reflektoren gebündelt werden kann.
2. Der Versuch ist als Hausexperiment geeignet.
3. Die in historischen Gebäuden vorhandenen Flüsterecken werden erklärbar.

Versuch

Als Reflektoren dienen zwei Regenschirme, als Schallquelle eine laut tickende Uhr. Die aufgespannten Schirme werden so gehalten, daß ihre Stöcke gegeneinander zeigen (Abb. 1.3.15./1). Befinden sich die Uhr und das Ohr des Beobachters in der

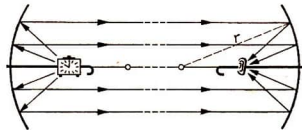


Abb. 1.3.15./1
Regenschirme als Schallreflektoren

Nähe der Brennpunkte der Reflektorflächen, dann ist das Ticken der Uhr noch in einer Entfernung von mehreren Metern deutlich zu hören. Die Brennweite findet man durch Abschätzen ($f = \frac{r}{2}$) und Probieren. Statt des Tickens der Uhr kann auch Geflüster übertragen werden.

1.3.16. Die Abhängigkeit der Tonhöhe einer Saite von ihrer Beschaffenheit [SE]

1. Monochord
2. Spannschlüssel
3. Hakenkörper (1 kg, 2 kg, 5 kg)
4. 3 Saiten gleicher Beschaffenheit (Ø etwa 0,3 mm)
5. Saite aus gleichem Material wie 4. und doppeltem Durchmesser

Methodischer Hinweis

Die Versuche können zur Unterstützung des Musikunterrichts eingesetzt werden.

Versuch 1: Abhängigkeit der Tonhöhe von der Saitenlänge

Drei Saiten von gleicher Beschaffenheit werden gleichmäßig straff gespannt. Dies ist der Fall, wenn sie beim Anzupfen den gleichen Ton erzeugen. Zwei der zum Monochord gehörenden Dreikantprismen aus Holz werden so unter die Saiten geschoben, daß die zweite um $\frac{1}{3}$ und die dritte um $\frac{1}{2}$ ihrer ursprünglichen Länge verkürzt werden.

Zupft man die Saiten in der Reihenfolge von der unverkürzten zur kürzesten an, so erhält man einen um so höheren Ton, je kürzer die Saite ist. Bezeichnet man den Ton der längsten Saite als Grundton, so ergibt die um $\frac{1}{3}$ verkürzte Saite die Quinte und die um $\frac{1}{2}$ verkürzte die Oktave.

Eine vollständige Übersicht über die Saitenlängen für die Intervalle einer C-Dur-Tonleiter zeigt die folgende Tabelle:

Intervall	Saitenlänge	Benennung des Tones
Prime (Grundton)	1	c
Sekunde	$\frac{8}{9}$	d
Terz	$\frac{4}{5}$	e
Quarte	$\frac{3}{4}$	f
Quinte	$\frac{2}{3}$	g
Sexte	$\frac{3}{5}$	a
Septime	$\frac{8}{15}$	h
Oktave	$\frac{1}{2}$	c'

Versuch 2: Abhängigkeit der Tonhöhe von der Spannung der Saite

Zupft man die unverkürzte Saite mehrfach nacheinander an und erhöht dabei mit Hilfe des Spanschlüssels allmählich ihre Spannung, so erhöht sich dabei auch die Tonhöhe.

Ist das Monochord mit einer Umlenkrolle versehen, so kann man an das Ende der zugehörigen Saite einen Hakenkörper anhängen. Vergrößert man die Spannkraft, so steigt die Tonhöhe. Die Oktave erhält man, wenn man die Spannkraft vervierfacht.

Versuch 3: Abhängigkeit der Tonhöhe vom Querschnitt der Saite

Man spannt die über die Umlenkrolle geführte Saite mit einer Kraft von 20 N und stimmt die benachbarte Saite mit Hilfe des Spanschlüssels auf die gleiche Tonhöhe.

Ersetzt man nun die mit dem Hakenkörper gespannte Saite durch eine aus gleichem Material mit doppeltem Durchmesser, so ergibt sich bei gleicher Spannkraft nur die Hälfte der ursprünglichen Frequenz. Der Ton der benachbarten Saite ist also die Oktave zum Ton der dickeren Saite. Um die gleiche Tonhöhe zu erhalten, muß man die Spannkraft vervierfachen.

Bemerkungen

1. Will man auch die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Dichte des Materials der Saite untersuchen, so verfährt man wie im Versuch 3 und verwendet eine Saite aus Darm, Dederon oder Messing, jedoch mit gleichem Querschnitt wie die Vergleichssaite.
2. Bei der Auswertung des Versuches 3 ist besonders auf die Unterscheidung der Begriffe Spannkraft und Spannung zu achten. Unter der Spannung versteht man den Quotienten von Spannkraft und Querschnitt

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

3. Der Versuch ist auch als Praktikumsversuch geeignet, um die Gesetzmäßigkeiten

$$v = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

zu bestätigen. In dieser Gleichung bedeuten: v die Frequenz, l die Länge der Saite, σ die Spannung und ρ die Dichte.

1.3.17. Stehende Wellen an Saiten — Obertöne

- | | |
|----------------|-----------------|
| 1. Monochord | 3. Papierreiter |
| 2. Geigenbogen | 4. Haarpinsel |

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 1.3.16.!
2. Der Versuch kann bei der Behandlung des Wellenmodells des Atoms als Analogieversuch eingesetzt werden.

Versuch

Für diesen Versuch wird nur eine Saite des Monochords benötigt. Zum Nachweis der Schwingungsbäuche und Knotenpunkte werden Papierreiter, schmale, in der Mitte geknickte Papierstreifen, verwendet.

Man verteilt etwa acht bis zehn Papierreiter ungefähr gleichmäßig auf die gesamte Länge der Saite und streicht diese in geringer Entfernung von ihrem Ende mit einem Geigenbogen an. Es ertönt der Grundton, und alle Reiter werden abgeschleudert. Die Saite schwingt in der Grundschiwingung nach Abbildung 1.3.17./1a.

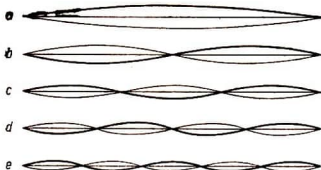


Abb. 1.3.17./1 a bis e Schwingende Saite in der Grundschiwingung und den ersten vier Oberschwingungen

Berührt man während des Anstreichens die Saite genau in ihrer Mitte leicht mit dem Finger oder einem dünnen Haarpinsel, so bleibt ein Papierreiter, der dort angeordnet war, ruhig auf der Saite hängen, während alle übrigen abgeworfen werden. Dies ist auch dann noch der Fall, wenn man während des gleichmäßigen Bogenstrichs den Finger oder Pinsel von der Saite entfernt. An dieser Stelle entsteht ein Schwingungsknoten, die Saite vollführt die erste Oberschwingung (Abb. 1.3.17./1b), es ertönt die Oktave als Flageolett-Ton. Berührt man die Saite in einem Drittel (Abb. 1.3.17./2), einem Viertel oder einem Fünftel ihrer Länge, so entstehen die zweite, dritte und vierte Oberschwingung und die entsprechenden Obertöne (Abb. 1.3.17./1c bis e).



Abb. 1.3.17./2 Nachweis stehender Wellen an einer Saite

Bemerkungen

1. Statt der Papierreiter können auch Papierringe verwendet werden. Man stellt sie her, indem man etwa 50 mm lange schmale Papierstreifen um die Saite herumlegt und an ihren Enden verklebt. Die Ringe gleiten von den Schwingungsbäuchen und sammeln sich an den Knotenpunkten.
2. Statt die Knotenpunkte durch Berühren mit dem Finger oder einem Haarpinsel festzulegen, kann man an dieser Stelle auch einen Steg unter die Saite stellen.

1.3.18. Offene und gedackte Pfeifen

Zum Vorversuch

- | | |
|--------------------|----------------------|
| 1. Standzylinder | 3. Reagenzglasländer |
| 2. 8 Reagenzgläser | 4. Glasrohr |

Zu den Versuchen 1 und 2

5. Lippenpfeife mit verschiebbarem Stempel

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.3.16.!

Vorversuch

Man stellt nach Abbildung 1.3.18./1 acht Reagenzgläser in einen Ständer und füllt sie teilweise mit Wasser, so daß die letzte Luftsäule halb so lang ist wie die erste. Bläst man mit einem Glasrohr über den Rand hinweg, so entstehen Töne, die um so höher klingen, je kürzer die Luftsäule ist. Sind die Füllhöhen richtig gewählt, so vernimmt man die Töne einer Tonleiter.

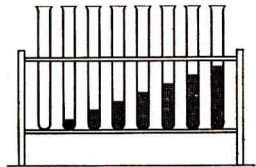


Abb. 1.3.18./1 Reagenzglasreihe
zum Erzeugen einer Tonleiter

Versuch 1: Tonhöhe einer offenen und einer gedackten Pfeife

Aus der Lippenpfeife wird der Stempel entfernt. Man bläst in die offene Pfeife und vernimmt einen bestimmten Ton. Verschießt man das offene Ende mit der Handfläche, so entsteht die nächsttiefere Oktave des Grundtons. Eine offene Pfeife muß demnach doppelt so lang sein wie eine gedackte, wenn sie den gleichen Grundton erzeugen soll.

Versuch 2: Abhängigkeit der Tonhöhe von der Länge der Pfeife

Man schiebt den Stempel in die Lippenpfeife so weit hinein, daß der erste Teilstrich gerade mit dem Rande der Öffnung abschneidet. Der erzeugte Ton ist der Grundton der Pfeife. Beim weiteren Verschieben des Stempels um je einen Teilstrich bilden die aufeinanderfolgenden Töne eine Tonleiter. Da bei jeder Grundschwingung die Länge der Pfeife gleich einer Viertelwellenlänge ist, kann die Frequenz ihres Tones nach $f = \frac{c}{4l}$ berechnet werden.

1.3.19. Resonanzversuche mit Stimmgabeln [SE]

Zu Versuch 1

- | | |
|--|--------------------|
| 1. 2 Stimmgabeln (440 Hz) mit Resonanzkasten | 2. Anschraubkörper |
| | 3. Anschlaghammer |

Zu Versuch 2

4. Glasrohr mit Anschlußstutzen
5. Trichter (Kugeltrichter)
6. Schlauch
7. Stimmgabel (440 Hz)
8. Meßstab
oder an Stelle der Geräte 4. bis 6.
9. Glasrohr
10. Standzylinder oder
11. 2 ineinander verschiebbare Glas-
oder Papprohre
12. Kundtsches Rohr

Zu Versuch 3

13. Lippenpfeife mit verschiebbarem
Stempel und Gerät 1 (eine Stimmgabel
mit Resonanzkasten)

Methodische Hinweise

1. Die Versuche eignen sich sehr gut zur Erarbeitung der Begriffe erzwungene Schwingungen und Resonanz.
2. Versuch 2 ist als Praktikumsversuch geeignet.

Versuch 1: Resonanz zwischen zwei Stimmgabeln

Zwei gleiche Stimmgabeln auf Resonanzkästen werden nach Abbildung 1.3.19./1 so aufgestellt, daß die Öffnungen der Kästen einander zugekehrt sind. Schlägt man eine der beiden Stimmgabeln an und dämpft sie kurz danach durch Auflegen der Hand, so hört man deutlich die zweite Stimmgabel tönen. Verändert man die Frequenz der zweiten Stimmgabel dadurch, daß man ein kleines Metallstück anschraubt, so wird infolge der veränderten Eigenfrequenz diese Stimmgabel nicht zum Mitschwingen angeregt.

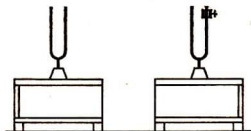


Abb. 1.3.19./1 Zwei Stimmgabeln auf Resonanzkästen

Versuch 2: Resonanz zwischen einer Stimmgabel und einer Luftsäule

Variante a

Der Versuchsaufbau erfolgt nach einer der Anordnungen von Abbildung 1.3.19./2. Hält man die tönende Stimmgabel über den Glaszylinder und verändert die Länge der Luftsäule durch Heben oder Senken des Trichters bzw. des Glasrohres, so ist bei einer bestimmten Länge eine deutliche Verstärkung des Tones zu vernehmen. Man mißt diese Länge l und kann daran verschiedene Berechnungen knüpfen. Bei einem einseitig geschlossenen Rohr tritt nämlich die Resonanz des Grundtones bei $l = \frac{\lambda}{4}$, die der Obertöne bei $l = \frac{3 \cdot \lambda}{4}, \frac{5 \cdot \lambda}{4} \dots$ ein. Für eine Stimmgabel der Frequenz 440 Hz ergibt sich beispielsweise für die Luftsäule eine Länge von

$l = 19,3 \text{ cm}$. Mit Hilfe der Beziehung

$$c = f \cdot \lambda,$$

die zwischen der Frequenz f , der Schallgeschwindigkeit c und der Wellenlänge λ besteht, kann man aus zwei Größen die dritte berechnen.

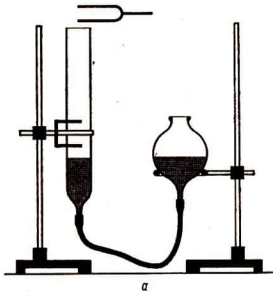


Abb. 1.3.19./2 Resonanz einer einseitig geschlossenen Luftsäule mit einer Stimmgabel

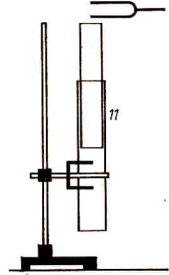


Abb. 1.3.19./3 Resonanz einer beiderseitig offenen Luftsäule mit einer Stimmgabel

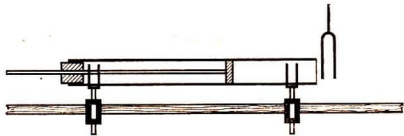
Variante b

Führt man den Versuch mit einer zweiseitig offenen Luftsäule durch, so wird die Anordnung nach Abbildung 1.3.19./3 vorgenommen. Die Resonanz des Grundtones tritt dann für $l = \frac{\lambda}{2}$ ein. Die Luftsäule ist demnach doppelt so lang wie bei der Variante a.

Variante c

Verwendet man das Kundtsche Rohr nach Abbildung 1.3.19./4, so lassen sich durch langsames Zurückziehen des Stempels zwei aufeinanderfolgende Resonanzstellen finden. Das Messen des Abstandes beider Resonanzstellen ergibt die Hälfte der Wellenlänge, woraus sich die Schallgeschwindigkeit berechnen läßt.

Abb. 1.3.19./4 Resonanz einer Luftsäule mit einer Stimmgabel bei Verwendung des Kundtschen Rohres



Versuch 3: Resonanz zwischen einer Pfeife und einer Stimmgabel

Man stimmt die Lippenpfeife durch Verschieben des Stempels auf den Ton der Stimmgabel und bläst sie dicht vor der Öffnung des Resonanzkastens an. Ist der

Ton der Lippenpfeife verklungen, so hört man noch deutlich das Tönen der Stimmgabel. Verstimmt man die Pfeife durch Verschieben des Stempels ein wenig und wiederholt den Versuch, so wird die Stimmgabel nicht zum Mitschwingen erregt.

1.3.20. Erregen eines Stabes zu longitudinalen Schwingungen [SE]

- | | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| 1. Stativstab (1000 mm) | 5. Kolophonium |
| 2. Stativstab (500 mm) | 6. kleiner Anschlaghammer aus Metall |
| 3. Stativstab (250 mm) | 7. Perle an Faden |
| 4. Lederlappen | |

Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann als Modellversuch bei der Behandlung des Dipols herangezogen werden.
2. Der Versuch kann auch bei der Behandlung des Wellenmodells des Atoms als Analogieversuch herangezogen werden.

Versuchsvorbereitung

Man klemmt einen 1 m langen Stativstab nach Abbildung 1.3.20./1 ein. Damit die Schwingung des Stabes nicht durch eine breite Einspannstelle gedämpft wird, legt man in die Kreuzmuffe ein Stück eines Nagels (Abb. 1.3.20./2).

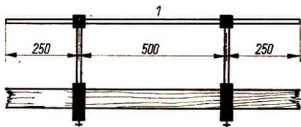


Abb. 1.3.20./1
An zwei Stellen eingespannter Stativstab

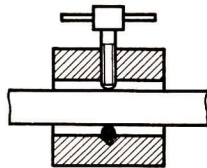


Abb. 1.3.20./2
Verringern der Auflagefläche

Versuch 1: Longitudinalschwingung eines Stabes

Man hängt die an einem Seidenfaden befestigte Perle so auf, daß sie an einem Stabende anliegt. Schlägt man mit dem Anschlaghammer gegen das andere, so ist ein Ton zu hören, und die Perle wird wiederholt abgestoßen. Dies erreicht man auch, wenn man den Stab durch einen mit Kolophonium bestreuten Lederlappen in der Längsrichtung reibt. Jedoch ist die Schwingungsweite der Perle dabei wesentlich geringer.

Versuch 2: Zusammenhang zwischen Stablänge, Wellenlänge und Tonhöhe

Reibt man den nach Abbildung 1.3.20./3a eingespannten Stab in der Längsrichtung, so entsteht ein hoher Ton. Spannt man den Stab nach Abbildung 1.3.20./3b und c

ein, so nimmt die Tonhöhe ab. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Eisen von $c = 5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ergeben sich bei diesem Versuch folgende Frequenzen:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1 \text{ m}} = 5100 \text{ Hz},$$

$$f_2 = \frac{c}{\lambda} = \frac{5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \text{ m}} = 2550 \text{ Hz},$$

$$f_3 = \frac{c}{\lambda} = \frac{5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{4 \text{ m}} = 1275 \text{ Hz}.$$

Man spannt drei Stativstäbe nach Abbildung 1.3.20./4 ein. Reibt man die Stäbe in der beschriebenen Weise zusammen, so entsteht dabei immer der gleiche Ton.

Die Frequenz beträgt $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{5100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1 \text{ m}} = 5100 \text{ Hz}$, weil in den drei Fällen die Wellenlängen gleich sind.



Abb. 1.3.20./3 Verschiedene Einspannungsarten eines Stativstabes:

a) $\lambda = l$; b) $\lambda = 2 \cdot l$; c) $\lambda = 4 \cdot l$

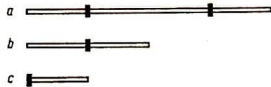


Abb. 1.3.20./4 Drei verschieden eingespannte Stativstäbe von gleicher Eigenfrequenz

Bemerkung

An Stelle der Stativstäbe kann man auch Glasstäbe verwenden. Dabei schiebt man etwa 10 mm breite Schlauchstücke auf die Klemmstellen, damit die Stäbe beim Einspannen nicht zerdrückt werden. Zum Erregen benutzt man einen angefeuchteten Korken, den man vorher in Dicke des Stabes durchbohrt und dann längs aufschneidet.

1.3.21. Chladnische Klangfiguren an Platten

- | | |
|---|---|
| 1. Quadratische oder kreisförmige Metall- oder Glasplatte | 3. Geigenbogen oder Anschlaghammer aus Metall |
| 2. Spezialtischklemme mit Bügel oder Tischklemme und Stativstab (160 mm) mit Gewinde M 8 und Mutter | 4. Seesand oder Korkmehl |
| | 5. feines Sieb oder Salzstreuer |
| | 6. Spiegel (etwa 300 mm \times 300 mm) |

Methodischer Hinweis

Die Chladnischen Klangfiguren eignen sich als Analogon für das Wellenmodell des Atoms, weil sie den Schülern eine Vorstellung von räumlich stehenden Wellen vermitteln.

Versuch

Man spannt eine quadratische oder eine kreisförmige Platte in die dazugehörige Spezialtischklemme oder schraubt sie auf einen von einer Tischklemme gehaltenen Stativstab. Mit Hilfe eines Siebes oder Streuers verteilt man trockenen Seesand oder feines Korkmehl dünn und gleichmäßig über die gesamte Platte. Zum Beobachten der Figuren stellt man einen um 45° geneigten Spiegel über der Platte auf (Abb. 1.3.21./1).

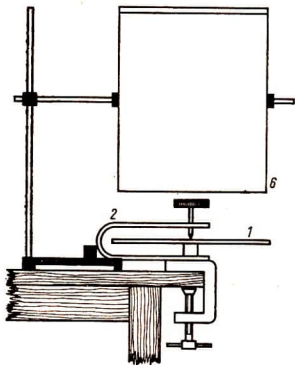


Abb. 1.3.21./1 Versuchsaufbau mit Spannbügel und Beobachtungsspiegel

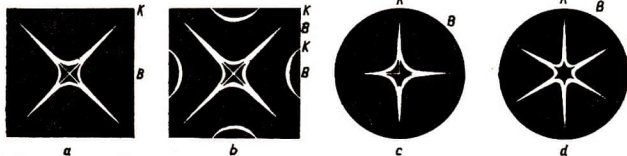


Abb. 1.3.21./2 Klangfiguren:

- a) Grundschiwingung einer quadratischen Platte,
- b) ihre erste Oberschiwingung,
- c) Grundschiwingung einer kreisförmigen Platte,
- d) ihre erste Oberschiwingung

Durch Anstreichen mit einem Geigenbogen oder durch Anschlagen mit einem kleinen Hammer wird die Platte in Schwingungen versetzt. Dabei ist ein Ton hörbar. Durch die Schwingung wird das Streugut von den Schwingungsbäuchen weggeschleudert und sammelt sich an den Knotenlinien; es entsteht eine Klangfigur.

Erregt man die quadratische Platte in der Mitte einer Seite, so erzeugt sie den Grundton. Sie schwingt in der einfachsten Form (Abb. 1.3.21./2a). Berührt man sie während des Erregens an einer oder mehreren Stellen mit den Fingern, so wird sie

dort am Schwingen gehindert, und es entstehen weitere Knotenlinien. Noch komplizierter werden die Klangfiguren, wenn man dabei die Platte in der Nähe einer Ecke erregt. Je vielfältiger die Klangfigur ist, desto höher ist der Ton, den die Platte abstrahlt. Ähnlich verfährt man auch mit der kreisförmigen Platte.

1.3.22. Schwebungen durch Überlagerung der Töne zweier Stimmgabeln

1. 2 Stimmgabeln auf Resonanzkästen
2. Anschraubkörper
3. Anschlaghammer

Methodischer Hinweis

Schwebungen von Schallwellen können als Modell für die Schwebungen Hertzscher Wellen gezeigt werden.

Vorversuch

Man stellt die beiden Stimmgabeln nebeneinander so auf, daß die Öffnungen der Resonanzkästen auf die Schüler gerichtet sind. Um nachzuweisen, daß ihre Eigenfrequenzen gleich sind, schlägt man sie nacheinander an und dämpft sie jeweils kurz danach mit der Hand. Sie erzeugen den gleichen Ton. Dies ist auch der Fall, wenn man im Schwingungsknoten der einen Stimmgabel ein Metallstück anschraubt. Je weiter man jedoch das Metallstück vom Schwingungsknoten entfernt, desto tiefer wird der Ton dieser Stimmgabel (Abb. 1.3.22./1).

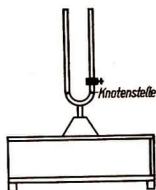


Abb. 1.3.22./1 Stimmgabel mit Zusatzkörper

Versuch

Nachdem man eine Stimmgabel leicht verstimmt hat, schlägt man beide kurz nacheinander an und läßt sie gleichzeitig schwingen. Man vernimmt ein periodisches Anschwellen und Abnehmen der Lautstärke. Die Frequenz dieser Schwebungen ist um so höher, je größer die Differenz der Eigenfrequenzen der Stimmgabeln ist, je weiter man also das Metallstück von der Knotenstelle entfernt. Man berechnet die Schwebungsfrequenz nach der Gleichung

$$f_s = f_1 - f_2.$$

1.3.23. Die Kundtsche Röhre — Bestimmen der Schallgeschwindigkeit in Metall- und Glasstäben [SE]

Zu Variante a

- | | |
|--|----------------|
| 1. Kundtsche Röhre mit verschiebbarem Stempel | 7. Meßstab |
| 2. Metallstäbe (500 mm) aus Eisen, Aluminium, Messing | 8. Lederlappen |
| 3. Glasstab oder Glasröhre (\varnothing 6 mm; Länge 600 mm) | 9. Alleskleber |
| 4. Kartonscheibe (ohne Berührung in 1. passend) | |
| 5. Korke | |
| 6. trockenes Korkmehl | |

Zu Variante b

- | |
|--|
| 10. Glasrohr (\varnothing innen 20 mm; Länge etwa 400 mm) |
| 11. Papierröhre (um 10. verschiebbar passend; Länge 100 mm) |
| 12. kleine Signalpfeife |

Methodischer Hinweis

Der Versuch eignet sich für die Abiturstufe zur Vertiefung der Beziehungen zwischen Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Variante a

Versuchsvorbereitung

Die Kundtsche Röhre wird nach Abbildung 1.3.23./1 auf zwei Röhrenhaltern gelagert. Nun verteilt man trockenes Korkmehl gleichmäßig in der Röhre auf ihrer gesamten Länge. Das geschieht am besten mit einer schmalen Holzleiste, z. B. einem Meßstab, die man mit Korkmehl bestreut. Man schiebt sie vorsichtig in die

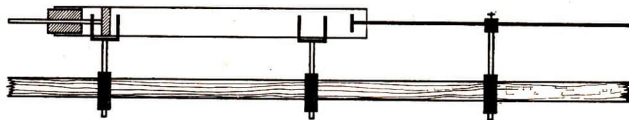


Abb. 1.3.23./1 Lagerung der Kundtschen Röhre

Röhre und dreht sie so, daß das Pulver in die Röhre gleitet. Durch leichtes Klopfen gegen die Röhre erreicht man, daß es sich als schmales Band in ihr sammelt. Danach dreht man sie um ihre Längsachse vorsichtig so, daß das Korkmehl etwas zur Seite gehoben wird, aber noch nicht an der glatten Röhrenwand abrutscht.

Auf das Ende eines Metallstabes klebt man mit Alleskleber eine Kartonscheibe, deren Durchmesser etwas kleiner ist als die lichte Weite der Röhre. Man spannt den Stab genau in seiner Mitte in eine Stabklemme und befestigt ihn nach Abbildung 1.3.23./1. Dabei soll die Kartonscheibe die Röhrenwand möglichst nicht berühren.

Versuch: Erzeugen von Staubfiguren in der Röhre

Man bringt den Metallstab durch Entlangstreichen mit einem angefeuchteten Lederlappen zum Tönen und verursacht so auf dem Stab eine stehende Longitudi-

nalwelle mit einem Knoten in der Mitte. Die Länge des Stabes entspricht einer halben Wellenlänge. Man verschiebt den Stempel so weit, bis Resonanz eintritt. Ist dies der Fall, so wird der Staub an den Schwingungsbäuchen aufgewirbelt, an den Knotenstellen bleibt er liegen. Er ordnet sich in wellenartigen Bögen an, an denen die Knotenstellen deutlich zu erkennen sind (Abb. 1.3.23./2).

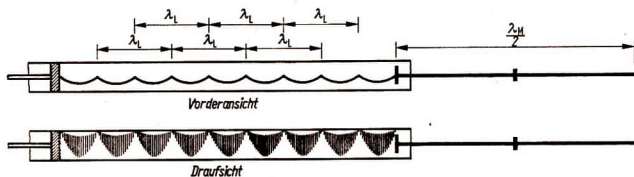


Abb. 1.3.23./2 Schematische Wiedergabe der Staubfiguren

Auswertung des Versuches

Man kann durch einen Versuch indirekt die Schallgeschwindigkeit in Metallstäben ermitteln, wenn man sie in der Luft kennt. Man mißt mit Hilfe eines Meßstabes die Wellenlänge der Staubfiguren im Rohr. Damit man Ablesefehler nach Möglichkeit vermeidet, mißt man nicht nur eine, sondern möglichst viele Wellenlängen. Die Staubfiguren jedesmal neu zu erregen ist zeitraubend und liefert keine genaueren Ergebnisse. Es gilt für Luft die Gleichung

$$f_L = \frac{c_L}{\lambda_L}$$

und für Metalle die Gleichung

$$f_M = \frac{c_M}{\lambda_M}$$

Da der erregte Ton in der Luft und im Metall die gleiche Frequenz hat, ergibt sich

$$\frac{c_L}{\lambda_L} = \frac{c_M}{\lambda_M}$$

und somit

$$c_M = \frac{\lambda_M}{\lambda_L} \cdot c_L$$

c_L findet man nach dem Messen der Zimmertemperatur aus der Gleichung

$$c_L = 331 \left(1 + \frac{T - T_0}{2T_0} \right) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ bzw. nach}$$

$$c_L = 331 \left(1 + 0,00183 \cdot \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

λ_M ist doppelt so groß wie die Stablänge.

Auf die gleiche Weise kann auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Glas bestimmt werden, indem man statt des Metallstabes einen Glasstab oder ein Glasrohr benutzt.

Variante b: Verwenden einer Signalpfeife als Schallgeber

Einfacher läßt sich der Versuch mit einer kleinen Signalpfeife als Schallgeber durchführen. Man kommt dabei mit einer etwa 400 mm langen und 20 mm weiten, beiderseits offenen Glasröhre aus, auf die man einen Papierzylinder schiebt, den man am Ende mit einer Kartonscheibe verschlossen hat.

Nachdem man in die Röhre wie im vorangehenden Versuch Korkstaub eingebracht hat, bläst man vor dem offenen Ende der Röhre die Signalpfeife an. Dabei verschiebt man den Papierzylinder, bis Resonanz auftritt.

1.3.24. Die Glühdrahröhre als Kundtsche Röhre

1. Glühdrahröhre mit Metallbuchsen (Länge etwa 300 mm; \varnothing innen 10 mm), leicht gekrümmt $\text{\textcircled{S}}$
 Glühdraht aus Chromnickel (\varnothing 0,1 mm)
2. Signalpfeife oder
3. Galtonpfeife
4. Schiebewiderstand (110 Ω)
5. Strommesser (1 A)
6. Schalter

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist eine interessante Variante zu V 1.3.23.

Vorbemerkung

Eine wesentliche Vereinfachung hat die Kundtsche Röhre durch die von H. Krönke angegebene Verwendung eines Glühdrahtes erfahren, durch den die stehenden Wellen in der Röhre sichtbar gemacht werden. Zu diesem Zweck dient ein 0,1 mm dicker Draht aus Chromnickel mit einem Widerstand von 30 Ω ... 40 Ω , der im Inneren der Röhre zwischen den Endbuchsen gespannt ist. Die industriell hergestellte Röhre ist leicht gekrümmt; denn der Draht dehnt sich beim Erwärmen, so daß er durchhängt. Wenn in der Röhre stehende Schallwellen auftreten, wird der Draht an den Bäuchen durch die Bewegung der Luft abgekühlt. Infolgedessen hört das Glühen auf; nur die Knoten glühen weiter, so daß der Draht wie eine Perlenkette leuchtender Punkte wirkt.

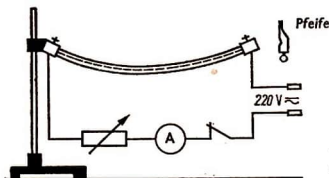


Abb. 1.3.24./1 Die Glühdrahröhre als Anzeiger für Schallwellen

Versuch

Die Anordnung erfolgt nach Abbildung 1.3.24./1. Man heizt den Draht durch einen Strom von der Stärke 0,8 A ... 0,9 A. Zum Versuch verwendet man zweckmäßigerweise eine Schallquelle, die einen Ton mit hoher Frequenz erzeugt. Sobald er ertönt, erscheint längs des Drahtes eine Reihe leuchtender Punkte.

1.3.25. Die Interferenz von Schallwellen einer Stimmgabel

- | | |
|--|--|
| 1. Stimmgabel (440 Hz) | 4. Verstärker |
| 2. rechteckige Kartonscheiben (A 4)
mit seitlicher Aussparung | 5. Lautsprecher |
| 3. Mikrophon | 6. Stromversorgungsgerät
(6,3 V~; 250 V-) |

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann im Zusammenhang mit der Behandlung der Interferenz Chladnischer Wellen demonstriert werden.

Vorbemerkungen und Vorversuch

Die Stimmgabel gehört zu den schlechten Schallstrahlern, da die Zinken abwechselnd aufeinander zu und voneinander weg schwingen. Infolgedessen quellen aus dem Raum zwischen den Zinken Schallwellen hervor, die sich in der Phase um $\frac{\lambda}{2}$ von den Schallwellen unterscheiden, die vor den Zinken entstehen (Abb. 1.3.25./1). Klemmt man die Stimmgabel schwenkbar an das Stativ und bewegt sie langsam

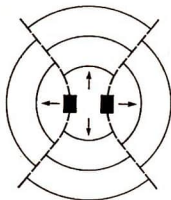


Abb. 1.3.25./1
Schallwellen an einer Stimmgabel

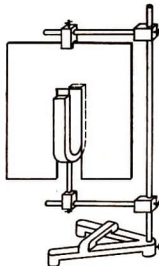


Abb. 1.3.25./2
Verstärkung des Stimmgabeltones durch
Verhinderung der Interferenz

durch die Aussparung in der Kartonscheibe (Abb. 1.3.25./2), so ist dann ein lauter Ton zu hören, wenn eine Zinke in der Aussparung steht, weil die phasenverschiedenen Schallwellen durch die Scheibe abgehalten werden.

Versuche

- a) Man hält die klingende Stimmgabel vertikal dicht vor das Ohr und dreht sie langsam um ihre Achse. Der Ton ändert sich bei einer vollen Umdrehung viermal (Abb. 1.3.25./1).
- b) Diesen subjektiven Versuch kann man zu einem objektiven umgestalten, wenn man einen Lautsprecher über einen Verstärker an ein Mikrofon anschließt, vor das man die tönende Stimmgabel hält. Wieder kann man, diesmal von allen Schülern wahrnehmbar, während einer Umdrehung der Stimmgabel viermal eine Tonabnahme und -zunahme beobachten.

Bemerkung

Der Versuch kann auch ohne Schallverstärkung objektiv gestaltet werden, wenn man eine Stimmgabel mit der Frequenz 2000 Hz verwendet.

1.3.26. Versuche mit der Interferenzröhre

Zu Variante a

- | | |
|--|---|
| <p>1. Stimmgabeln ($a = 440$ Hz),
wenn möglich auch $c'' = 523$ Hz und
$c''' = 1046$ Hz</p> <p>2. Anschlaghammer</p> <p>3. Galton- oder Signalpfeife</p> <p>4. Interferenzröhre, behelfsmäßig Ⓢ,
bestehend aus</p> <p>4a. 2 T-Stücken aus 8 mm-Glasrohr</p> <p>4b. Trichter ($\varnothing 100$ mm)</p> <p>4c. 2 Schlauchstücken (auf 4a passend);
Länge $(100 + 20)$ mm</p> <p>4d. Schlauchstück (wie 4c);
Länge $(490 + 20)$ mm</p> | <p>4e. Schlauchstück (wie 4c);
Länge 100 mm</p> <p>4f. Schlauchstück (wie 4c);
Länge 400 mm</p> <p>4g. kurzes Rohr ($\varnothing 8$ mm);
Länge 100 mm)</p> |
|--|---|

Zu Variante b

5. Interferenzröhre aus Metall,
posaunenartig ausziehbar
6. Galtonpfeife
7. Glühdrähtöhre
8. Stahlflasche mit Preßluft oder
Druckkessel
9. Schlauch
10. Schiebewiderstand (300 Ω)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.3.25.!

Variante a: Interferenzröhre aus behelfsmäßigen Mitteln

Aus den angegebenen Glasteilen und Schlauchstücken wird nach Abbildung 1.3.26./1 die Versuchsanordnung zusammengestellt. Es führen vom Schalltrichter zwei Schlauchwege zum Ohr. Sind sie gleich lang, so nimmt man den Ton der klingenden Stimmgabel im Ohr wahr (Abb. 1.3.26./1a). Unterbricht man die eine Schlauchleitung durch Zuquetschen, so ist nur eine ganz unwesentliche Abnahme der Tonstärke zu beobachten. Anders ist es, wenn man den einen Schlauch durch einen anderen ersetzt, der gerade um eine halbe Wellenlänge des Tons länger ist als der

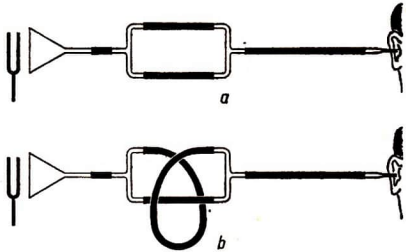


Abb. 1.3.26./1
Interferenzröhre
aus Schlauchteilen:
a) Phasenunterschied 0
b) Phasenunterschied $\frac{\lambda}{2}$

ursprüngliche. In diesem Falle ist kein Ton zu hören (Abb. 1.3.26./1b). Quetscht man jetzt den einen Schlauch, so tritt der Ton wieder auf.

Variante b: Ausziehbare Interferenzröhre aus Metall

Weit günstiger gestaltet sich der Versuch, wenn man eine Interferenzröhre aus Metall verwendet. Sie besteht aus zwei U-förmig gebogenen Röhren, von denen die eine posaunenartig ausziehbar ist. Eine an der inneren Röhre angebrachte Millimeterskala ermöglicht das Durchführen quantitativer Versuche. Die Anordnung erfolgt nach Abbildung 1.3.26./2. Sehr zu empfehlen ist es, den Versuch in Ver-

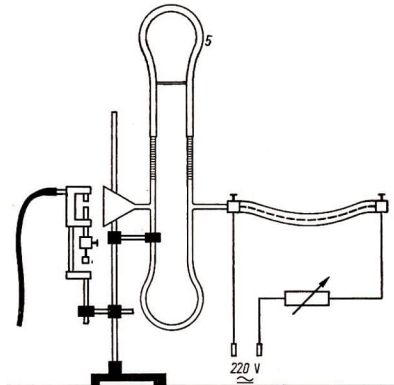


Abb. 1.3.26./2 Ausziehbare Interferenzröhre, kombiniert mit einer Glühdröhre

bindung mit einer Glühdröhre durchzuführen, da dann der Eintritt der Interferenz objektiv sichtbar wird. Als Schallquelle verwendet man eine Signalpfeife oder noch besser eine Galtonpfeife. Man kann dann mit der Interferenzröhre nach-

einander eine ganze Reihe von Interferenzen feststellen, indem man das äußere U-Rohr so weit verschiebt, bis am Glühdraht keine Knoten und Bäuche mehr zu sehen sind. Die Verschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Interferenzen beträgt an einem Röhrenschenkel gemessen $\frac{\lambda}{4}$. Nach der Wellengleichung kann die Frequenz f berechnet werden

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Nach diesem Verfahren kann man auch mittels einer Galtonpfeife die Frequenzen von Tönen bestimmen, die an der Grenze der Hörbarkeit liegen oder sie bereits überschritten haben.

1.3.27. Der Doppler-Effekt

1. Stimmgabel (2000 Hz) oder Stimmgabel aus Leichtmetall (1700 Hz)
2. Anschlaghammer aus Metall
3. Stativstab (250 mm)
4. Zwirnsfaden

Methodische Hinweise

1. Der Doppler-Effekt bei Schallwellen kann als Modell des Doppler-Effektes von Lichtwellen eingesetzt werden.
2. Vergleiche V 1.2.9.!

Variante a

Man schlägt eine Stimmgabel von mindestens 1700 Hz kräftig an und bewegt sie abwechselnd auf die Schüler zu und von ihnen weg. Dabei ist ein leichtes Ansteigen und Absinken des Tones wahrzunehmen.

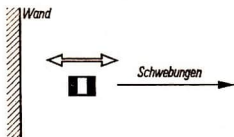


Abb. 1.3.27./1 Nachweis des Doppler-Effektes durch Schwingungen einer tönenden Stimmgabel

Nimmt man den Versuch unmittelbar vor einer festen Wand vor, so überlagern sich die von der Stimmgabel direkt ausgehenden und die von der Wand reflektierten Wellen. Es treten Schwebungen auf, die man in der Richtung senkrecht zur Wand deutlich hören kann (Abb. 1.3.27./1). Sie kommen dadurch zustande, daß die Stimmgabel und ihr akustisches Spiegelbild gegenläufige Bewegungen ausführen.

Variante b

Der Doppler-Effekt tritt auch auf, wenn man als Tongeber einen 250 mm langen Stativstab an zwei Fäden nach Abbildung 1.3.27./2 aufhängt und als Pendel

schwingen läßt. Am günstigsten wirkt der Versuch, wenn man das Pendel in einem offenen Türrahmen anbringt. Anderenfalls muß man aus Stativteilen einen Tragrahmen bauen. Man zieht den Stab etwa $50^\circ \dots 40^\circ$ seitlich aus der Ruhelage, schlägt ihn kräftig an und läßt ihn frei schwingen. Wieder ist in der Schwingungsrichtung deutlich ein Ansteigen bzw. Abnehmen der Tonhöhe wahrzunehmen.

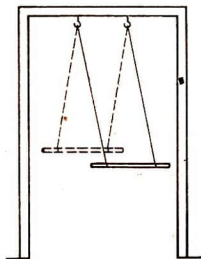


Abb. 1.3.27./2 Nachweis des Doppler-Effektes durch Schwingungen einer tönenden Stahlstange

Bemerkungen

1. Machen sich bei Variante a Schallreflexionen an den Wänden störend bemerkbar, so führt man den Versuch im Freien aus.
2. Als bewegte Schallquelle kann ein als Pendel bifilar aufgehängter Lautsprecher dienen, der einen Ton von 1 kHz bis 2 kHz abstrahlt (UVG₂ mit flexiblen Zuleitungen zum Lautsprecher).

1.3.28. Das Richtungshören

- | | |
|---------------|------------------------------|
| 1. Eisenstück | 3. 3 m langer Gasschlauch |
| 2. Hammer | 4. dazu 2 Endröhren aus Glas |

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 1.3.10.!

Vorbemerkungen

Das menschliche Gehör ist in der Wahrnehmung der Richtung, aus der der Schall kommt, außerordentlich empfindlich. Dies ist dadurch bedingt, daß der Schall von beiden Ohren aufgenommen wird. Die Richtung einer Schallquelle kann mit einer Genauigkeit von etwa 3° bestimmt werden.

Versuch im Freien

Ein Schüler, dem man vorher zur Wahrung seiner Unvoreingenommenheit die Augen verbunden hat, damit er nicht durch die Sicht beeinflusst wird, beobachtet kurze Signale, die auf dem Schulhof oder auf dem Sportplatz von einem anderen

Schüler in kurzen Zwischenräumen gegeben werden. Am besten eignet sich dazu das Anschlagen eines Eisenstückes mit einem Hammer. Der Beobachter wendet sein Gesicht der Schallquelle zu und verharrt in dieser Stellung. Wenn ihm die Augenbinde gelöst wird, sieht er die Schallquelle in gerader Richtung vor sich.

Versuch im Unterrichtsraum

Der Beobachter steht mit dem Rücken zur Klasse hinter dem Experimentiertisch. Er drückt die mit kurzen Glasröhren versehenen Enden eines etwa 3 m langen Gummischlauches fest in beide Ohren. Der Schlauch liegt hinter ihm auf dem Tisch. Die Mitte des Schlauches ist durch einen Kreidestrich oder durch eine Bandschleife gekennzeichnet. Schlägt man mit einem leichten Gegenstand, z. B. mit einem Bleistift, auf die Schlauchmitte (Abb. 1.3.28./1), so hat der Beobachter den Eindruck,

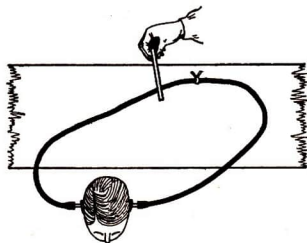


Abb. 1.3.28./1 Ortsbestimmung der Schallquelle beim Modellversuch (Draufsicht)

als läge die Schallquelle genau vor oder hinter ihm. Er gibt die vermeintliche Richtung an. Klopft man nur wenige Zentimeter von der Schlauchmitte entfernt, so hat der Beobachter den Eindruck, daß sich die Schallquelle stark seitlich verschoben hat.

Bemerkung

Die Glasröhren sind mit größter Vorsicht und nicht zu tief in die Ohren einzuführen.

2. Lichtwellen

2.0. Methodische Bemerkungen

2.0.1. Das zweite Kapitel behandelt die Lichtwellen. Es befaßt sich mit den Erscheinungen, die auf den Wellencharakter des Lichtes zurückzuführen sind, der Interferenz und der Polarisation des Lichtes.

Zu den meisten Gebieten der Physik haben die Schüler im allgemeinen schon vor der Behandlung im Unterricht zum Teil bewußt, zum Teil unbewußt Erscheinungen beobachtet, die mit Hilfe physikalischer Gesetzmäßigkeiten erklärt werden können. Häufig stützt sich der Lehrer bei der Erarbeitung der Gesetze und Zusammenhänge auf diese Beobachtungen. Bei der Behandlung des Gebietes Lichtwellen ist das in der Regel nicht der Fall. Der Stoff ist den Schülern völlig neu und wird deshalb gewöhnlich mit besonderem Interesse aufgenommen. Oft wird dieses Interesse noch durch das Überraschungsmoment gestärkt, das von einer eindrucksvollen Interferenzfigur ausgelöst wird. Die Voraussetzungen dafür sind jedoch sicheres Gelingen der Versuche und deutliche Interferenzfiguren. Daraus ergibt sich für den Lehrer die Notwendigkeit, jede Unterrichtsstunde methodisch und experimentell besonders gewissenhaft vorzubereiten. Während z. B. in der Elektrizitätslehre der Versuchsaufbau im allgemeinen vor den Augen der Schüler entwickelt wird, ist es bei Interferenzversuchen ratsam, den Versuchsaufbau bereits vor dem Unterricht vorzunehmen und die Teile sorgfältig zu justieren.

Wichtige Voraussetzung zum Gelingen der Interferenzversuche ist die Kohärenz der Lichtwellen. Auf die Erklärung des Kohärenzbegriffes muß im Unterricht besonderer Wert gelegt werden. Die übrigen Interferenzbedingungen sind dem Schüler vom Stoffkomplex „Mechanische Wellen“ her bereits bekannt. Sie werden hier zur quantitativen Auswertung der Versuche, bei bekanntem Abstand der kohärenten Lichtquellen zur Berechnung der Wellenlänge oder bei bekannter Wellenlänge zur Berechnung des Abstandes der Lichtquellen, benutzt.

Da die Kohärenzbedingungen für zwei Lichtquellen technisch nicht realisiert werden können, erzeugt man durch Beugung, Reflexion und Brechung zwei Wellenfelder, die von virtuellen kohärenten Lichtquellen auszugehen scheinen. Der erste Abschnitt des Kapitels befaßt sich mit Versuchen zur Interferenz durch Reflexion oder Brechung. Um lichtstarke Erscheinungen zu garantieren, ist für die Versuche des 2. Kapitels neben der Verwendung der großen Optikleuchte (12 V; 50 W) der Bildwerfer als Lichtquelle zu empfehlen.

Für die Auswahl der Versuche waren in erster Linie folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Jeder Versuch soll möglichst wenig Justierarbeit erfordern und kein allzu hohes Experimentiervermögen voraussetzen.
2. Die Interferenzfiguren sollen möglichst groß und dabei lichtstark sein.

3. Die Deutung der Versuche soll durch die Annahme zweier punktförmiger oder zweier geradliniger kohärenter Lichtquellen ermöglicht werden.

Da das Angebot an Demonstrationsgeräten für die Experimente zur Wellenoptik seitens der Unterrichtsmittelindustrie noch gering ist, werden auch Selbstbauanleitungen gegeben.

Der Stoffkomplex „Lichtwellen“ bietet Anknüpfungspunkte für die weltanschauliche Erziehung. So kann den Schülern bewußt gemacht werden, daß die Welt erkennbar ist und daß der menschlichen Erkenntnisfähigkeit keine festen, unverrückbaren Grenzen gesetzt sind. Das Erkennen der typischen Welleneigenschaften des Lichtes und die Bestimmung der Lichtwellenlänge sind dafür überzeugende Beispiele.

2.0.2. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels sind Versuche zur Interferenz des Lichtes durch Beugung beschrieben. Die Beugung selbst ist den Schülern aus dem Stoffabschnitt „Mechanische Wellen“ bekannt und wurde dort an Wasserwellen demonstriert (V 1.2.3.). Dort lernten die Schüler auch das Huygenssche Prinzip kennen, das zur Erklärung der Interferenz des Lichtes durch Beugung herangezogen wird. Daher ist es auch zweckmäßig, diesen Versuch als Wiederholung der Behandlung des Abschnittes Interferenz durch Beugung voranzustellen.

Den Doppelspalt kann man nach der in V 2.2.2. beschriebenen Methode mit Hilfe eines Meßschiebers oder auf fotografischem Wege herstellen. Für mehrere äquidistante Spalte und behelfsmäßige Strichgitter mit kleinerer Gitterkonstante ist die fotografische Methode besser geeignet. Eine Vorlage mit äquidistanten parallelen schwarzen Linien wird mit einer Kleinbildkamera, möglichst einer Spiegelreflexkamera, auf Dokumentenfilm aufgenommen. Da die Herstellung einer solchen Vorlage für optische Gitter sehr mühselig ist, wurde diesem Buch ein Linienblatt beigelegt, das zur Herstellung von Strichgittern geeignet ist. Man spannt es auf ein Reißbrett und stellt es so auf, daß es senkrecht zur optischen Achse der Kamera steht. Die Belichtungszeit ermittelt man mit einem elektrischen Belichtungsmesser. Damit die Negative nicht zu flau werden, ist es ratsam, etwas reichlicher zu belichten, als der Belichtungsmesser angibt. Der Film wird dann im Papierentwickler bei 18 °C hart entwickelt. Die Negative werden in Diapositivrahmen gefaßt und als Strichgitter verwendet.

Die schwarzen Linien und die Zwischenräume der Vorlage haben jeweils eine Breite von 0,5 mm. Je nach der Entfernung, aus der die Vorlage fotografiert wird, ergeben sich Bilder mit unterschiedlichem Spaltabstand (Gitterkonstante). Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Zusammenhänge von Gitterkonstante und Aufnahmeentfernung für eine Objektivbrennweite von $f = 50$ mm. Die Entfernung ($s + s'$) ist vom Objekt bis zur Filmebene zu messen. Die Lage der Filmebene in der Kamera kann man mit hinreichender Genauigkeit bestimmen, weil der Film in der Regel nur einige Millimeter vor der Kamerarückwand liegt. Bezeichnet man

das Abbildungsverhältnis $\frac{y}{y'}$ mit m , so ergibt sich folgende Gleichung:

$$s + s' = f \left(2 + m + \frac{1}{m} \right).$$

V 2.2.8. gibt Anregungen, wie ein vorhandener Schulspektralapparat als Gitterspektralapparat benutzt werden kann. Die Versuche 2.2.11. und 2.2.12. geben An-

Entfernung zwischen Objekt und Film ($s + s'$) in mm	Gitterkon- stante a in mm
245	0,4
360	0,2
605	0,1
1103	0,05

leitungen zum Gebrauch eines Reflexionsgitters. Der folgende Versuch V 2.2.13. zur Beugung des Lichtes an einem Kreuz- oder Punktgitter ist deshalb von Bedeutung, weil er die Schüler anregt, Interferenzerscheinungen an feinen Geweben, Vogelfedern u. dgl. zu beobachten. Die drei letzten Versuche dieses Abschnittes behandeln Interferenzerscheinungen an einem schmalen Spalt, einer kreisrunden Öffnung und am Schirmrand. Sie nehmen eine Ausnahmestellung ein, da man hier die Interferenz nicht durch die Annahme zweier oder mehrerer kohärenter Lichtquellen erklären kann. Zur Deutung dieser Erscheinungen zieht man das Huygenssche Prinzip heran.

Erwähnt sei noch, daß man Spalte, z. B. Beleuchtungsspalte, leicht aus zwei halben Rasierklingen herstellen kann. Man klebt sie mit den scharfen Kanten genau parallel nebeneinander auf eine Diapositivmaske aus schwarzem Papier. Der so entstandene Spalt wird wie ein Diapositiv gerahmt.

2.0.3. Der dritte Abschnitt ist der Polarisierung des Lichtes, dem elektrooptischen und dem magneto-optischen Effekt gewidmet. Er ist für das Verständnis der Wellennatur des Lichtes von entscheidender Bedeutung, weil er Klarheit über den Charakter des Lichtes als transversale Wellen bringt.

In den für diesen Abschnitt ausgewählten Versuchen wurden als Polarisatoren vorwiegend Polarisationsfilter verwendet. Sie sind Bestandteile der Unterrichtsmittelsammlung (SEG Wellenoptik) und leicht zu handhaben. Früher benutzte man meist Polarisierungsspiegel oder Nicolsche Prismen. Mit den Spiegeln gestalten sich aber die Versuchsaufbauten recht umständlich und erfordern genaues Justieren. Nicolsche Prismen sind sehr kostspielig. Bei ihnen ist außerdem der Querschnitt des polarisierten Lichtbündels erheblich kleiner als bei Polarisationsfiltern. Wo sie vorhanden sind, können sie selbstverständlich an Stelle der Filter benutzt werden. Für subjektive Beobachtungen, z. B. im Schülerpraktikum, können auch Turmalinlinsen verwendet werden.

2.1. Interferenz durch Reflexion und Brechung

2.1.1. Interferenz nach Lloyd

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. verstellbarer Spalt mit Spiegelhalter Ⓢ,
dazu erforderliches Material:
verschiedene Stücke von 1 mm dickem, 50 mm breitem Eisenblech
2 Manipermklötze (Länge 50 mm)
Alleskleber

3. Spiegelstreifen mit geschliffener Oberfläche, oberflächenversilbert oder Schwarzglasspiegel (eventuell UR- oder UV-Filterglas)
4. transparenter Schirm
5. Spaltblende
6. optische Bank mit Reitern
7. Farbfilter (rot – grün – blau)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Abiturstufe und für Arbeitsgemeinschaften geeignet.
2. Der Versuch stellt einen mäßigen Anspruch an das Justieren.
3. Die Lichtquelle und ihr Spiegelbild sind hier die Erregerzentren für die Interferenzen.

Anfertigung des verstellbaren Spaltes mit Spiegelhalter

Nach den Maßangaben der Abbildung 2.1.1./1 werden aus etwa 1 mm dickem Eisenblech die Einzelteile zum verstellbaren Spalt mit Spiegelhalter hergestellt. Besondere Sorgfalt ist auf die Ränder der Spaltbacken zu richten, die mit Hilfe einer Schmirgelfeile so lange bearbeitet werden, bis sie, zusammengesetzt und gegen das Licht gehalten, völlig dicht schließen. An die Grundplatte *a* und den beweglichen Spaltbacken *d* werden quaderförmige Manipermklötze (17 mm × 24 mm × 50 mm) mit Alleskleber bei gut aufgerauhten Klebeflächen mit starkem Druck aufgeklebt. Die Teile *b* und *c* werden ebenfalls zusammengeklebt oder genietet. Der Zusammenbau geht aus Abbildung 2.1.1./1e hervor. Der ganze Spalt läßt sich, magnetisch gehalten, in der Höhe verändern; die Spaltbreite kann beliebig variiert werden. Spalte genau bekannter Breite erhält man, wenn man zwischen die Backen zwei dünne, mikrometrisch gemessene Streifen Metallfolie klemmt.

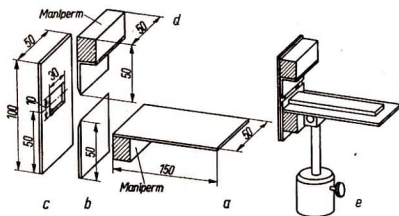


Abb. 2.1.1./1 Verstellbarer Spalt mit Spiegelhalter:
a) bis d) Einzelteile,
e) zusammengesetzte Anordnung

Versuch

Hinter der Lichtquelle (ohne Kondensator) wird ein etwa 1 mm breiter waagerechter Leuchtspalt aufgestellt. Bei Verwenden der Glühfadenlampe muß die Glühwendel parallel zum Spalt liegen. Etwa 20 cm ... 30 cm dahinter wird der verstellbare Spalt mit dem Spiegelhalter so in den Strahlengang gebracht, daß das Licht nahezu streifend durch den auf etwa 0,05 mm ... 0,1 mm eingestellten Spalt auf den aufgelegten Spiegelstreifen fällt. Die Höhe des Spaltes ist so einzurichten, daß er nur einige Zehntelmillimeter über der Spiegelfläche liegt und zu ihr parallel verläuft. Diese Einstellung ist sehr kritisch und wird am besten auf einem 30 cm ... 50 cm

vor der Anordnung stehenden transparenten Schirm beobachtet. Sie muß so lange korrigiert werden, bis das direkte, vom Spalt kommende Licht mit dem gespiegelten Licht zur Überlagerung gelangt. Beim Einstellen stören die Beugungserscheinungen etwas, die vom Spalt verursacht werden. Nach einiger Übung wird es aber gelingen, die Beugungsfransen von den streng äquidistanten, in der Regel sehr feinen Interferenzstreifen zu unterscheiden. Nunmehr kann der transparente Schirm weiter von der Spiegelanordnung entfernt werden. Je nach Stärke der verwendeten Lichtquelle kann die Interferenzfigur in einer Entfernung von 1 m ... 5 m hinter dem Spiegel aufgefangen werden (Abb. 2.1.1./2). Man erhält farbige Interferenz-

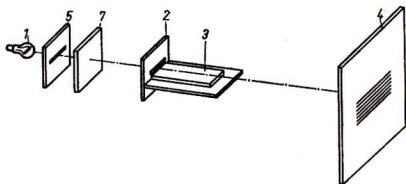


Abb. 2.1.1./2
Versuchsanordnung zum
Interferenzversuch nach Lloyd

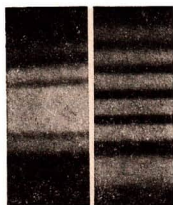


Abb. 2.1.1./3 Interferenzfiguren zum Spiegelversuch nach Lloyd:
a) Beugungsfransen,
b) Interferenzstreifen bei monochromatischem Licht (Rotfilter)

figuren. Durch Einschalten von Farbfiltern in den Strahlengang wird die Interferenzfigur einfarbig. Verwendet man nacheinander mehrere Lichtfilter verschiedener Farbe, so kann man die Abhängigkeit des Abstandes der Streifen von der Lichtwellenlänge vorführen. In Abbildung 2.1.1./3 sind Interferenzfiguren zum Spiegelversuch von Lloyd wiedergegeben. Will man das Entstehen der Interferenz durch die beiden Wellenzentren vorführen, so schaltet man zwischen Spiegel und Transparenzschirm eine Sammellinse ein und entwirft auf dem Schirm die reellen vergrößerten Bilder der beiden Wellenzentren, des Spaltes und seines Spiegelbildes.

Bemerkungen

- Die Interferenzfigur zum Spiegelversuch nach Lloyd läßt sich ähnlich wie beim Spiegelversuch nach Fresnel quantitativ und zur Bestimmung der Lichtwellenlänge auswerten. Vergleiche dazu V 2.1.2.! Man beachte aber, daß zwischen dem direkten und dem reflektierten Strahl zusätzlich ein Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ durch den Phasensprung am dichten Medium entsteht.

2. An Stelle des oberflächenversilberten Spiegelstreifens kann man notfalls auch eine dickere plangeschliffene Glasplatte verwenden. Besser eignet sich noch ein Schwarzglasspiegel, den man als Behelf auch durch ein UR- oder UV-Filterglas ersetzen kann.

2.1.2. Interferenzversuch mit dem Doppelspiegel nach Fresnel

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) und Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Spaltblende als Beleuchtungsspalt
3. verstellbarer Spalt oder Spaltdrehblende
4. Spiegel nach Fresnel auf Stativ
5. transparenter Schirm
6. kurze optische Bank mit Reitern
7. Linse ($f = +500$ mm)
8. Farbfilter
9. Meßstab
10. Meßschieber

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Abiturstufe geeignet.
2. Der Versuch erfordert ein sehr genaues Justieren.
3. Hier sind zwei virtuelle Bilder der Lichtquelle als Erregerzentren für die Interferenzen anzusehen.

Versuchsdurchführung

Der Leuchtspalt (2) steht dicht hinter der Lichtquelle ohne Kondensator, der verstellbare Spalt (3) wird weitere 20 cm ... 40 cm dahinter aufgestellt. Beim Verwenden der Glühfadenlampe als Lichtquelle achte man auf gute Parallelstellung des Glühfadens und der Spalte. 10 cm ... 20 cm hinter dem verstellbaren Spalt, der beim Versuch als linienförmige Lichtquelle dient, wird der Fresnelsche Schwarzglasspiegel so aufgestellt, daß die Stoßkante der beiden Spiegel parallel zu den Spalten liegt und das Licht streifend auf die Spiegel fällt. Dabei sollen beide Spiegel etwa gleichmäßig beleuchtet werden. Sie dürfen an der Stoßkante keine Stufe aufweisen. Zum Einstellen bringt man etwa 30 cm ... 50 cm hinter den Spiegel einen transparenten Schirm, so daß er vom reflektierten Licht getroffen wird (Abb. 2.1.2./2). Mit Hilfe



Abb. 2.1.2./1
Interferenzfigur am Fresnel-Spiegel
in monochromatischem Licht

der Justierschraube verändert man die Lage des einen Spiegels so, daß auf dem Schirm zwei dicht beieinanderliegende Lichtstreifen entstehen. Meist sind diese Lichtstreifen von Beugungstreifen durchzogen, die entweder vom verstellbaren

Spalt (0,1 mm) oder von der Stoßkante der beiden Spiegel herrühren. Vorsichtig verändert man die Spiegelneigung so lange, bis die beiden Lichtstreifen einander zu überdecken beginnen. Durch Nachjustieren des Strahlenganges sorgt man für gleichmäßige Helligkeit und Breite der Lichtstreifen. Ist der Spiegel an der Stoßstelle einwandfrei zusammengefügt, treten nunmehr feine, scharfe Interferenzstreifen auf (Abb. 2.1.2./1). Je nach der Stärke der Lichtquelle kann der Schirm bis zu mehreren Metern vom Spiegel entfernt werden. Durch Einschalten von Lichtfiltern (8) kann man die mehrfarbige Interferenzfigur einfarbig gestalten.

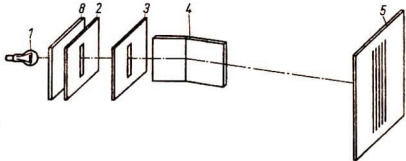


Abb. 2.1.2./2
Versuchsanordnung zum Spiegelversuch nach Fresnel

Das Vorhandensein zweier Lichtquellen, der virtuellen Bilder des verstellbaren Spaltes, weist man nach, indem man bei unverändertem Schirmabstand in den Strahlengang zwischen Spiegel und Transparenzschirm eine Sammellinse bringt und mit ihr die reellen Bilder dieser Lichtquellen entwirft (Abb. 2.1.2./3).

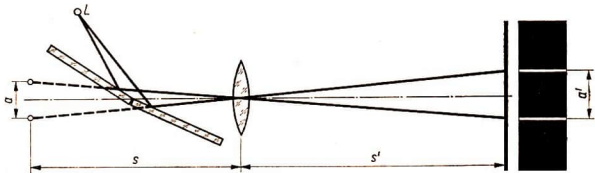


Abb. 2.1.2./3 Versuchsanordnung zur Bestimmung des Abstandes der virtuellen Spaltbilder

Ermittlung der Wellenlänge des Lichtes aus dem Interferenzversuch nach Fresnel

Zur Berechnung der Wellenlänge werden folgende Größen benötigt:

- a Abstand der beiden virtuellen Lichtquellen,
- a' Abstand zweier benachbarter Streifen,
- e Entfernung der virtuellen Lichtquellen vom Bildschirm.

Die Größen a und e sind der direkten Messung nicht zugänglich. Man ermittelt sie nach der Linsengleichung mit Hilfe der Versuchsanordnung nach Abbildung 2.1.2./3

$$a : a' = s : s'.$$

Die Gegenstandsweite s , der Abstand der virtuellen Spaltbilder von der Linse, kann nicht direkt gemessen werden. Da jedoch die Summe von Einfallswinkel und Reflexionswinkel nahezu 180° beträgt, entspricht dieser Größe mit guter Annäherung die Entfernung vom Spalt (3) zur Linse. Für den Abstand der virtuellen Spaltbilder ergibt sich somit die Gleichung:

$$a = \frac{a' \cdot s}{s'}.$$

Ist die Brennweite der Linse bekannt, dann kann s durch

$$s = \frac{s' \cdot f}{s' - f}$$

ausgedrückt werden. Somit ist

$$a = \frac{a' \cdot s' \cdot f}{s' \cdot (s' - f)}$$

Der Abstand der kohärenten Lichtquellen vom Bildschirm kann als Summe von Gegenstands- und Bildweite

$$e = s + s'$$

oder nach der Gleichung

$$e = \frac{s' \cdot f}{s' - f} + s'$$

berechnet werden.

Der Abstand benachbarter Interferenzstreifen a' wird mit einem Meßschieber auf dem Transparenzschirm abgegriffen. Die Wellenlänge des verwendeten Lichtes ergibt sich aus der Gleichung:

$$\lambda = \frac{a' \cdot a}{e}$$

Bemerkungen

1. Zur Demonstration der Interferenzfigur kann man auch einen mattweißen Schirm verwenden. Man stellt ihn schräg in den Strahlengang, so daß das vom Doppelspiegel reflektierte Licht streifend auf ihn trifft. Dadurch wird das Interferenzbild breiter und besser sichtbar.
2. An Stelle des industriell gefertigten Spiegels kann auch ein behelfsmäßiger Spiegel verwendet werden. Dazu wird ein Schwarzglasstreifen (eventuell UR- oder UV-Filterglas) möglichst mit einem Diamant-Glассscheider in zwei Stücke geschnitten und an der Schnittstelle wieder zusammengesetzt. Als Spiegelhalter benutzt man den gleichen wie im V 2.1.1., nachdem man ihn durch eine Justierschraube ergänzt hat (Abb. 2.1.2./4).
3. Die Genauigkeit des Wertes für die Wellenlänge des Lichtes hängt bei der Berechnung besonders von der Genauigkeit der Meßwerte für a und a' ab. Bei der

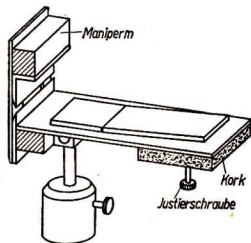


Abb. 2.1.2./4
Spiegelhalter zum Interferenzversuch nach Fresnel

Bestimmung des Streifenabstandes a' ist es deshalb zweckmäßig, mit dem Meßschieber mehrere Streifenabstände zu umfassen und durch die Anzahl der Abstände zu teilen.

2.1.3. Interferenzversuch nach Pohl

Zu Variante a

1. Natriumdampfampe mit Drossel und Lampengehäuse oder Quecksilberdampfampe mit Drossel und Lampengehäuse
2. Glimmerblatt (Dicke 0,05 mm bis 0,15 mm)
3. Glimmerblatthalter (z. B. Reagenzglashalter oder ⑤)
4. Projektionswand

Zu Variante b

- Geräte 1. bis 4., außerdem
5. Doppelkondensator
 6. kleiner Spiegel auf Stiel (Spiegelfläche etwa 1 cm^2) ⑥

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Abiturstufe vorgesehen.
2. Der Versuch ist als Einführungsversuch geeignet.
3. Es entsteht eine überraschend große Interferenzfigur.

Vorbemerkung

Der Interferenzversuch nach Pohl ist sehr eindrucksvoll. Die Lichtwellen interferieren nach der Reflexion an der Vorder- und Rückseite einer dünnen Schicht. Dabei kann die Lichtquelle einen Durchmesser von mehreren Zentimetern besitzen, ohne daß die Kohärenzbedingung verletzt wird. Voraussetzung für das Gelingen des Versuches sind eine kräftige Lichtquelle, ein stark divergentes Lichtbündel und ein nicht zu kleines, sehr dünnes Glimmerblatt. Als brauchbar für Variante a hat sich das in den SEG Wellenoptik vorhandene Glimmerblatt erwiesen. Das Glimmerblättchen ist aus dem Rahmen zu entfernen und an einer Ecke in einen Reagenzglashalter einzuspannen. Stehen größere Glimmerblättchen (Fläche 50 cm^2 bis 100 cm^2) zur Verfügung, so ist die Interferenzerscheinung lichtstärker. Die Halterung muß dann nach Abbildung 2.1.3./1c erfolgen. Für das Gelingen der Variante b sind diese größeren Glimmerblättchen Voraussetzung. Der Versuch erfordert keinerlei langwierige Justierung. Bei Verwendung der Hg-Dampfampe ist die Erscheinung entsprechend dem Emissionsspektrum verschiedenfarbig, was sich durch Einblenden eines Monochromatfilters beheben läßt.

Variante a: Interferenz nach Pohl mit schrägem Lichteinfall

Das Lampengehäuse soll ein kreisförmiges Lichtaustrittsfenster von 5 mm ... 10 mm Durchmesser haben. Wenige Zentimeter davon entfernt stellt man in das divergente Strahlenbündel das in den Halter spannungsfrei eingesetzte Glimmerblatt, so daß es vom Lichtkegel voll ausgeleuchtet wird. Das Glimmerblatt wird so aufgestellt

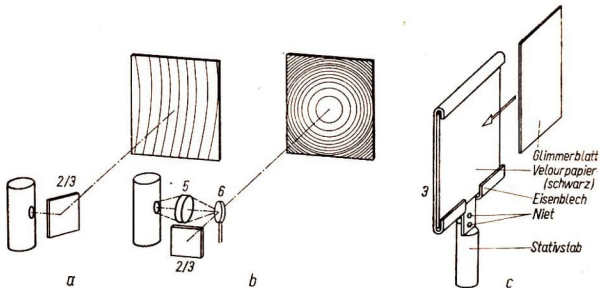


Abb. 2.1.3./1 Versuchsanordnung zum Interferenzversuch nach Pohl:

- a) Anordnung bei schrägem Lichteinfall,
- b) Anordnung bei senkrechtem Lichteinfall,
- c) Glimmerblatthalter für große Glimmerblättchen

daß das Licht auf eine mehrere Meter entfernte Projektionswand oder einen transparenten Schirm reflektiert wird. Man erhält eine große, aus schwach gekrümmten Kreisbogen bestehende Interferenzfigur, die eine Flächenausdehnung von mehreren Quadratmetern besitzt (Abb. 2.1.3./1a). Durch Drehen des Glimmerblattes kann eine beliebige Stelle des Interferenzfeldes sichtbar gemacht werden. Die Abbildung 2.1.3./2 zeigt die Interferenzfigur an der Wand des Experimentierraumes.

Variante b: Interferenz nach Pohl bei senkrechtem Lichteinfall

Dreht man beim Interferenzversuch nach Variante a das Glimmerblatt so, daß das Lichtbündel das Glimmerblatt senkrecht trifft, so kann man auf einer Projektions-

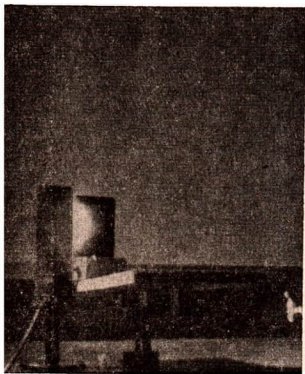


Abb. 2.1.3./2 Interferenzfigur an der Wand des Experimentierraumes bei schrägem Lichteinfall auf die Glimmerfolie

wand hinter dem Lampenhaus ein vollständiges Ringsystem beobachten. Leider ist diese Interferenzfigur durch den Schatten des Lampenhauses gestört. Diesen Mangel kann man beheben, indem man mit Hilfe eines kurzbrennweitigen Doppelkondensators auf einem kleinen oberflächenversilberten Spiegel ein reelles Bild der Lichtquelle entwirft und dieses als sekundäre Lichtquelle benutzt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 2.1.3./1 b wiedergegeben. Der Spiegel ist um 45° zur optischen Achse gedreht und reflektiert das Licht auf die Glimmerfolie. Auf der Projektionswand kann nun ein vollständiges, kaum noch durch Schatten gestörtes Ringsystem aufgefangen werden.

2.1.4. Interferenz durch Reflexion an einer Keilplatte (Luftkeil)

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Leuchtspalt (0,2 mm bis 0,4 mm)
3. 2 rechtwinklige Glasprismen
4. 2 Prismenklemmen, aus 2 Schlauchklemmen hergestellt ® oder 2 Gummiringe
5. Transparenzschirm
6. kurze optische Bank mit Reitern
7. Prismentisch
8. Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Der Versuch sollte unbedingt als Einführungsversuch in der Abiturstufe eingesetzt werden.
2. Der Versuch zeigt das Prinzip der Interferenzen an dünnen Schichten.

Versuch

Auf einer kurzen optischen Bank werden die große Optikleuchte, ein Leuchtspalt und 5 cm ... 10 cm davon entfernt ein Prismentisch aufgestellt. Die beiden Prismen werden unter einseitigem Zwischenlegen eines Stanniolstreifens oder Papierstreifens mit Hilfe zweier Prismenklemmen oder zweier kräftiger Gummiringe zusammengehalten. Die beiden Prismenklemmen werden nach Abbildung 2.1.4./1 aus zwei Schlauchklemmen hergestellt. Man legt die Prismen so auf den Prismentisch, daß das von der Lichtquelle über den Spalt in eine Kathetenfläche eindringende Licht die Hypotenusenfläche noch nicht unter dem Winkel der totalen Reflexion trifft. Das von den beiden Hypotenusenflächen reflektierte Licht fängt man 20 cm bis 50 cm von der Prismenanordnung entfernt auf (Abb. 2.1.4./2a). Durch Drehen der Prismen findet man leicht die günstigste Stellung. Auf dem Schirm entsteht eine bunte Interferenzfigur. Bringt man zwischen Lichtquelle und Prismenanordnung ein Farbfilter, so ist sie einfarbig und scharf (Abb. 2.1.4./3). Nunmehr kann man den Bildschirm bis zu mehreren Metern entfernen. Die Interferenzfigur bleibt auch erhalten, wenn man die Spaltbreite vergrößert oder den Spalt ganz entfernt. Der Streifenabstand der Interferenzfigur wird um so größer, je näher der Keilkante das Licht einfällt.

Auch im durchfallenden Licht kann man eine Interferenzfigur in jedem beliebigen Abstand von der Prismenanordnung auffangen. Durch Einschalten einer Sammel-

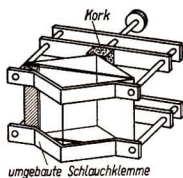


Abb. 2.1.4./1 Dünner Luftkeil zwischen zwei rechtwinklig gleichschenkligen Prismen. Die Prismenklemmen wurden aus Schlauchklemmen hergestellt.

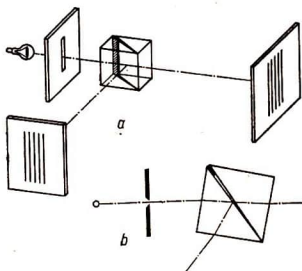


Abb. 2.1.4./2 Interferenz des Lichtes durch Reflexion an einem Luftkeil:

- a) Versuchsanordnung,
- b) Stellung der Prismenanordnung im Strahlengang

linse in den Strahlengang zwischen Prisma und Schirm können die virtuellen Lichtquellen auf dem Schirm abgebildet werden. Wegen der mehrfachen Reflexion an der Keilplatte erhält man je nach der Lichtstärke der Lichtquelle 3 bis 6 Bilder.

Die quantitative Auswertung der Interferenz kann ähnlich wie beim Fresnelschen Spiegelversuch (V 2.1.2.) vorgenommen werden. Der Phasensprung von $\frac{\lambda}{2}$ bei der Reflexion an der Glasfläche ist zu berücksichtigen.

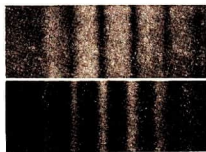


Abb. 2.1.4./3 Interferenzfigur:
oben: im reflektierten Licht,
unten: im durchfallenden Licht

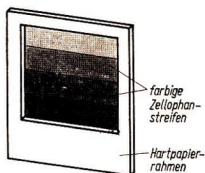


Abb. 2.1.4./4 Streifenfilter

Bemerkung

Zur Demonstration der Abhängigkeit des Streifenabstandes von der Wellenlänge des Lichtes hat sich ein Streifenfilter aus farbigen Zellophanstreifen, das dicht vor den Transparenzschirm gehalten wird, bewährt (Abb. 2.1.4./4).

2.1.5. Die Newtonschen Ringe

Zu Variante a und b

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
3. Newtonsches Glas
4. Linse ($f = +200$ mm)
5. transparenter Schirm
6. Farbfilter (Rotfilter und Blaufilter) oder Rot-Blau-Filter

Zu Variante c

Geräte 1. bis 6., außerdem

7. Natriumdampfampe NAE 24 mit Drossel oder Natriumflamme
8. Auflichtmikroskop
9. Planglasplatte
10. Linse ohne Fassung ($f = +250$ mm ... +500 mm) oder Brillenglas (positiv)

Methodischer Hinweis

Eine der Varianten sollte in der Abiturstufe unbedingt als Beispiel für Interferenzen an dünnen Schichten gezeigt werden.

Variante a: Objektive Beobachtung der Newtonschen Ringe

In der Versuchsanordnung nach Abbildung 2.1.5./1 soll der Einfallswinkel des Lichtes auf das Newtonsche Glas etwa 20° ... 30° betragen. Der Kondensator wird so eingestellt, daß ein paralleles oder schwach konvergentes Strahlenbündel entsteht. Mit Hilfe der Sammellinse (4) wird die ringförmige Keilschicht auf der Projektions-

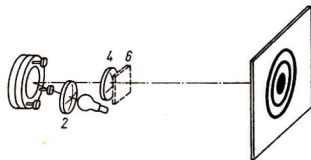


Abb. 2.1.5./1 Versuchsanordnung zur Erzeugung Newtonscher Ringe



Abb. 2.1.5./2 Newtonsche Ringe im reflektierten Natriumlicht

wand (5) scharf abgebildet. Es entstehen lebhaft gefärbte Newtonsche Ringe. Form und Güte der Interferenzfigur können durch Nachstellen der Klemmschrauben des Newtonschen Glases beeinflusst werden. Bringt man ein Farbfilter (6) in den Strahlengang, so wird die Interferenzfigur einfarbig (Abb. 2.1.5./2).

Die Interferenzerscheinung kann auch im durchfallenden Licht beobachtet werden. Die Interferenzfigur ist komplementär zu der im reflektierten Licht und wesentlich blasser.

Variante b: Subjektive Beobachtung der Newtonschen Ringe

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.1.5./3 vorgenommen. Ein transparenter Schirm wird rückseitig beleuchtet und dient als ausgedehnte Lichtquelle. Mit dem auf die Keilringsschicht akkommodierten Auge kann man die Newtonschen Ringe sowohl im reflektierten als auch im durchfallenden Licht beobachten.

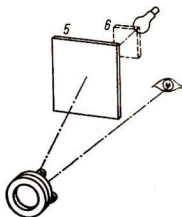


Abb. 2.1.5./3 Subjektive Beobachtung der Newtonschen Ringe

Variante c: Betrachtung der Newtonschen Ringe mit einem Auflichtmikroskop

Newtonsche Ringe bis zu sehr hohen Ordnungszahlen kann man mit Hilfe eines Auflichtmikroskops schon zwischen einer Planglasplatte mit einer beliebigen Plankonvexlinse im monochromatischen Licht beobachten. Auf den Objektstisch des Auflichtmikroskops legt man die Planglasplatte und die Plankonvexlinse. In die Auflichteinrichtung lenkt man das Licht einer Natriumdampfampe. Bei schwacher Objektivvergrößerung ($8\times$) kann man nach Scharfeinstellen auf die Schicht ein schönes Ringsystem beobachten.

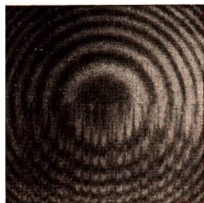


Abb. 2.1.5./4 Mikrofotografische Aufnahme der Newtonschen Ringe unter Verwendung eines Objektträgers nach Thoma im Natriumlicht



Abb. 2.1.5./5 Mikrofotografische Aufnahme des Luftkeils zwischen einer Planglasplatte und einer Placrylplatte

Bemerkungen

1. Verwendet man in Variante c an Stelle der Planglasplatte einen Objektträger nach Thoma mit einem eingravierten Strichnetz, den man im Handel als Zählkammer für Blutkörperchen erhält, so ist es möglich, die Durchmesser der Newtonschen Ringe zu messen (Abb. 2.1.5./4). Wird der Krümmungsradius der Linse sphärometrisch oder optisch gemessen, so kann man mit Hilfe dieses Versuches die Wellenlänge des Natriumlichtes bestimmen.
2. Die Variante c kann auch zum Prüfen spiegelnder Oberflächen genutzt werden. Auf ein Stück Fensterglas, Polystyrol, Piacryl oder gut verchromtes Metall legt man ein dünnes Stanniolstreifen und darauf die Planglasplatte, so daß eine dünne keilförmige Luftschicht entsteht. Die Interferenzfigur im Luftkeil wird nahe der Keilkante im Mikroskop betrachtet (Abb. 2.1.5./5). Unebenheiten in der Oberfläche machen sich in Abweichungen vom parallelen Verlauf der Interferenzstreifen bemerkbar, und zwar eine Vertiefung in einer Abweichung auf die Keilkante zu, eine Erhöhung in einer Abweichung von der Keilkante weg.

2.1.6. Newtonsche Ringe an einer rotierenden Seifenlamelle

1. Kohlebogenlampe mit Widerstand oder Physikleuchte mit Transformator
2. rotierender Trog Ⓢ,
dazu erforderliches Material:
rundes niedriges Gefäß aus Plast (\varnothing 70 mm ... 100 mm)
großer Manipermring
Alleskleber
eiserner Drehkörper nach Vorlage
3. Universalexperimentiermotor mit Bohrfutter
4. große Linse ($f = +200$ mm ... $+250$ mm), z. B. große, flache Kondensorlinse
5. Projektionsfläche (transparenter Schirm)
6. flache Schale, z. B. Fotoschale (15 cm \times 20 cm)
7. Seifenlösung mit etwas Glycerin (siehe 3. bis 5. Teil)

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.1.5.!

Vorbemerkung

Überraschend farbenprächtige Newtonsche Ringe erhält man mit Hilfe einer rotierenden Seifenlamelle. Die Interferenzfigur kann groß an eine Wand projiziert werden. Verwendet man eine Kohlebogenlampe, dann kann man Interferenzfiguren bis zu einer Größe von 1 m² erzielen.

Variante a: Projektion der Newtonschen Ringe an einer rotierenden Seifenlamelle

Zur Durchführung des Versuches braucht man einen rotierenden Trog, den man in einfacher Weise selbst zusammensetzen kann. An die Bodenfläche eines runden, niedrigen, innen mattschwarz gestrichenen Plastgefäßes mit einem Durchmesser von 70 mm ... 100 mm wird unter Druck mit Alleskleber ein runder, großer Mani-

permring (\varnothing 8,5 mm und 43 mm, Dicke 14 mm) zentrisch ange kittet. Zum Aufsetzen des Gefäßes auf die Schwungmaschine fertigt man noch einen Drehkörper aus Eisen an (Abb. 2.1.6./1).

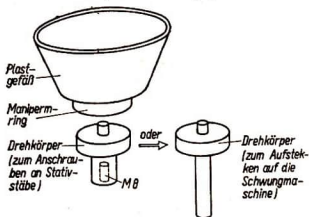


Abb. 2.1.6./1 Trog zum Aufsetzen auf die Schwungmaschine

Der Trog wird auf eine vertikal gestellte Schwungmaschine gesetzt; er wird magnetisch auf dem Drehkörper gehalten.

Zum Herstellen der Seifenlamelle nimmt man den Trog von der Schwungmaschine und taucht ihn mit seiner Öffnung in Seifenlösung. Sie besteht aus einer Lösung von Kernseife oder Fewa in Wasser, die mit etwas Glycerin versetzt wird. Durch leichtes Bewegen des Troges in der Seifenlösung, die sich in einer flachen Schale

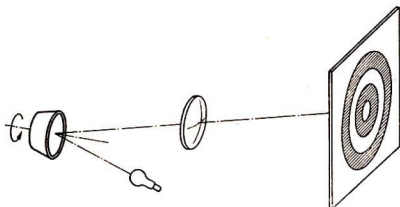


Abb. 2.1.6./2 Versuchsanordnung zur Projektion der Newtonschen Ringe mit einer rotierenden Seifenlamelle

befindet, gelingt es nach einiger Übung, die Öffnung mit einer dünnen Seifenlamelle zu überziehen. Daraufhin setzt man den Trog wieder auf die Schwungmaschine und läßt sie rotieren. Nach kurzer Zeit erscheinen in der Projektion farbenprächtige Newtonsche Ringe; denn die Lamelle hat sich unter der Einwirkung der Zentrifugalkraft zu einer ringförmigen Keilschicht deformiert (Abb. 2.1.6./2). Die Newtonschen Ringe wandern radial weiter, aus dem Zentrumquellen immer neue hervor. Kurz vor dem Zerreißen der Seifenlamelle entsteht im Zentrum ein dunkler, fast schwarzer Fleck, die Lamelle ist dann dort so dünn geworden, daß für alle Lichtwellenlängen Auslöschung erfolgt. Die günstigste Drehzahl ermittelt man durch Versuch. Die Erscheinung kann auch im gefilterten Licht vorgeführt werden.

Variante b: Subjektive Beobachtung der Newtonschen Ringe an einer rotierenden Seifenlamelle

Noch einfacher gestaltet sich der Versuchsaufbau, wenn man die Interferenzerscheinung subjektiv beobachtet. Man muß dann allerdings dicht an die Versuchs-

anordnung herantreten. Ein transparenter Schirm wird von der Rückseite beleuchtet. Vor den Schirm bringt man den Trog mit der rotierenden Seifenlamelle. Man kann auf ihr die gleiche Interferenzfigur wie bei Variante a, allerdings wesentlich kleiner, beobachten. Zur Versuchsanordnung vergleiche Abbildung 2.1.5./3.

Bemerkung

Die Seifenlamelle hält sich bei günstigem Mischungsverhältnis von Seifenlösung und Glycerin mehrere Minuten.

2.1.7. Farben dünner Blättchen

Geräte wie zum Versuch 2.1.5., Variante a, ohne 3., dafür 3. Drahtschlinge und mit Glycerin versetzte Seifenlösung

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.1.5.!

Versuch

Versuchsaufbau und -durchführung entsprechen im wesentlichen dem Versuch 2.1.5., Variante a. An Stelle des Newtonschen Glases verwendet man eine Seifenlamelle, die man mit einer Drahtschlinge von etwa 60 mm Durchmesser (Abb. 2.1.7./1) hält. Unter der Einwirkung der Schwere entsteht eine dünne Keilschicht; die Interferenzfigur weist in weißem Licht lebhaft gefärbte, in gefiltertem Licht einfarbige, parallele Streifen mit abnehmendem Streifenabstand auf (Abb. 2.1.7./2).



Abb. 2.1.7./1
Drahtschlinge

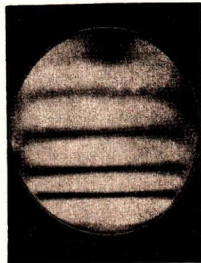


Abb. 2.1.7./2
Interferenzfigur

Bemerkungen

1. An Stelle der Drahtschlinge kann man auch einen Metallring verwenden, an den man den Haltedraht außen anlötet.

2. Zum Herstellen der Seifenlösung vergleiche V 2.1.6.!
3. Der Versuch kann auch in subjektiver Beobachtung ausgeführt werden, indem man die Seifenlamelle vor einem weiß oder monochromatisch beleuchteten Transparenzschirm betrachtet.
4. Diese Interferenzerscheinung kann auch an einer Seifenblase beobachtet werden.

2.1.8. Interferenzversuch mit dem Biprisma nach Fresnel

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. verstellbarer Spalt oder Spaltdrehblende
3. Biprisma nach Fresnel
4. transparenter Schirm
5. Farbfilter
6. optische Bank mit Reitern

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Abiturstufe vorgesehen.
2. Durch die Brechung in den beiden Hälften des Biprismas entstehen scheinbar zwei Lichtquellen, deren Licht interferiert.

Versuch

Etwa 10 cm hinter einer Kohlebogen- oder Glühfadenlampe wird der Beleuchtungsspalt (0,05 mm ... 0,1 mm) aufgestellt. Weitere 10 cm ... 15 cm dahinter steht das Biprisma, mit der Prismenkante dem Spalt zugekehrt. Spalt, Prismenkante und der Glühfaden der Lampe müssen genau parallel stehen. Zur Justierung des Versuches stellt man etwa 40 cm vom Biprisma entfernt einen transparenten Schirm auf (Abb. 2.1.8./1). Spalt und Biprisma werden nun vorsichtig justiert, so daß sie parallel stehen und die Prismenkante gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Auf dem Schirm müssen dann scharfe Interferenzstreifen entstehen (Abb. 2.1.8./2a). Nuncmehr kann der Schirm je nach der Stärke der Lichtquelle 2 m ... 4 m entfernt werden. Die Interferenzfigur ist bunt. Sie kann einfarbig gemacht werden, indem man vor den Beleuchtungsspalt ein Farbfilter setzt.

Die Auswertung des Versuches erfolgt in der gleichen Weise wie im V 2.1.2.

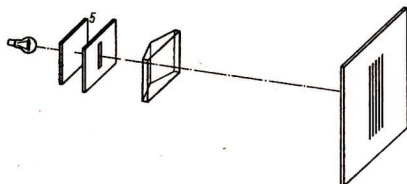


Abb. 2.1.8./1
Versuchsanordnung zum
Interferenzversuch mit dem
Biprisma nach Fresnel

Abb. 2.1.8./2 Interferenzfiguren
bei monochromatischem Licht
a) mit einem Biprisma nach Fresnel erzeugt,
b) mit einer Spiegelfacette erzeugt



Bemerkungen

1. Die Interferenzfigur kann auch auf einem mattweißen Bildschirm erzeugt werden, den man schräg in den Strahlengang stellt (vgl. Bem. 1 im V 2.1.2.).
2. Der Versuch kann in der Weise abgewandelt werden, daß man das Biprisma in eine Küvette bringt, die mit einer Flüssigkeit gefüllt ist. Ihre Brechungszahl muß kleiner sein als die des Prismenglases, wozu sich beispielsweise Wasser eignet. Das kommt einer Verkleinerung des brechenden Winkels der beiden Prismenhälften gleich. Man erhält dann Interferenzfiguren mit größerem Streifenabstand. Andererseits gelingt der Versuch auch, wenn man an Stelle des Biprismas ein Stück Spiegelfacette verwendet, von der man den Spiegelbelag entfernt hat (vgl. Abb. 2.1.8./2b).
3. Ein geschickter Experimentator erzeugt sogar Interferenzfiguren mit Hilfe eines rechtwinkligen Prismas in einer Küvette, die mit einer Mischung aus Schwefelkohlenstoff und Alkohol gefüllt ist; die Brechungszahl der Mischung darf dabei von der Brechungszahl des Prismenglases nur sehr wenig verschieden sein.

2.1.9. Die Queteletschen Ringe

1. Kleine Glühpunktlampe (6 V; 30 W) auf Stiel Ⓢ
2. Spiegel (etwa 300 mm × 400 mm), rückseitig versilbert
3. Lykpodium
4. Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Die Queteletschen Ringe entstehen durch Reflexion des Lichtes an der Vorder- und an der Hinterfläche eines Spiegels unter Mitwirken der Streuung des Lichtes an kleinen Teilchen.
2. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften geeignet.
3. Der Versuch kann als Modellversuch vor Behandlung des Debye-Scherrer-Diagramms eingesetzt werden.

Versuch

Der vorher möglichst gleichmäßig mit Lykpodium eingestaubte Spiegel wird vertikal aufgestellt. 1 m ... 2 m vor dem Spiegel ordnet man eine an einem Stiel befestigte Glühpunktlampe an, die bis auf eine pfenniggroße Öffnung mit Ofenrohrlack mehrmals gestrichen wurde (Abb. 2.1.9./1).

Tritt man hinter die Lichtquelle und blickt auf den Spiegel, so beobachtet man überraschend deutlich eine große Interferenzfigur. Man sieht das Bild der Lichtquelle, umgeben von dunklen, nach außen immer farbiger werdenden Ringen. Hält man ein Farbfilter vor das Auge, so wird die Interferenzfigur einfarbig.

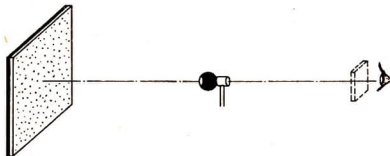


Abb. 2.1.9./1
Versuchsanordnung zur Erzeugung der Queteletschen Ringe

Bemerkung

Das Einstauben des Spiegels kann außer mit Lycopodium auch mit Puder, Mehl oder Kreidestaub geschehen. Es genügt auch, den Spiegel mit Knetmasse einzureiben.

2.1.10. Einfache Interferometermodelle für subjektive Beobachtung

Zu Versuch 1

1. Natriumdampfampe mit Gehäuse und Drossel oder Na-Flamme oder Spektralröhre (He) und Funkeninduktor
2. Glimmerblatt (etwa 30 mm × 30 mm; 0,1 mm dick) — möglichst beiderseitig halbdurchlässig versilbert [®]
3. Projektionswand oder transparenter Schirm

Zu Versuch 2

4. Natriumflamme
5. 2 Oberflächenspiegel (etwa 60 mm × 40 mm)
6. 6 mm ... 10 mm dicke, planparallele Glasplatte (etwa 80 mm × 60 mm)
7. Interferometerhalter aus Eisen [®]
8. 4 quaderförmige Manipermklötze (17 mm × 24 mm × 50 mm)

Zu Versuch 3

Geräte wie zu 2 ohne 5. und 6., außerdem

9. 2 gleich dicke, planparallele, geschliffene Glasplatten (etwa 50 mm × 60 mm; Dicke 6 mm ... 10 mm)

Methodische Hinweise

1. Die Anordnungen können in der Abiturstufe als Modelle für in der Industrie übliche Interferometer verwendet werden.
2. Die Modelle können in Arbeitsgemeinschaften angefertigt werden.
3. Die Modelle sind von großer Einfachheit.

Versuch 1: Modell eines Interferometers nach Fabry-Perot

Das Luftplatten-Interferenzspektroskop nach Fabry-Perot liefert überaus scharfe Interferenzmaxima hoher Ordnungszahl, weil sie durch das Zusammenwirken vieler Strahlenbündel zustande kommen. Als Modell eines solchen Spektroskops dient für den Versuch 1 ein dünnes, ebenes, planparalleles Glimmerblatt als Ersatz für die Luftplatte. Bringt man dieses Glimmerblatt dicht vor das Auge und blickt gegen eine von einer starken monochromatischen Lichtquelle beleuchtete Projektionswand aus einer Entfernung von 1 m ... 3 m, so kann man ein System Haidinger'scher Ringe wahrnehmen (Abb. 2.1.10./1). Der Versuch gelingt auch, wenn man

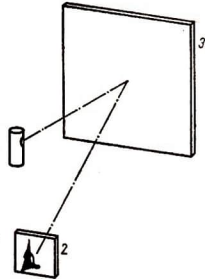


Abb. 2.1.10./1 Modellinterferometer nach Fabry-Perot

gegen eine von der Rückseite mit einer Natriumflamme oder Spektralröhre beleuchtete transparente Fläche blickt. Wegen der geringeren Lichtstärke verkürzt man die Entfernung auf 30 cm bis 50 cm. Wird das Glimmerblatt beiderseitig halbdurchlässig versilbert, so beobachtet man wegen der Mehrfachreflexionen im Glimmerblatt eine wesentlich schärfere Interferenzfigur. Für geringere Ansprüche genügt bereits ein Versilbern auf nassem Wege (vgl. hier: „Physikalische Schulversuche“, 7. Teil, V 1.3.5.). Mit einem solchen versilberten Glimmerblatt gelingt es leicht, die beiden Natriumlinien D_1 und D_2 zu trennen. Man neigt dazu das Glimmerblatt vor dem Auge langsam gegen die Visierlinie und findet eine Lage des Blattes, bei der sich die nunmehr zu beobachtenden dunklen Kreisbogen in zwei feinere Bogen unterschiedlicher Helligkeit aufspalten.

Versuch 2: Modell eines Glasplatteninterferometers

Gemäß der Abbildung 2.1.10./2a setzt man aus einer dicken Planglasplatte (ausgesuchtes, geschliffenes Spiegelglas) und zwei Oberflächenspiegeln (Spiegelflächen nach innen gekehrt) mit Hilfe von 4 quaderförmigen Manipermklötzen das Modell eines Glasplatteninterferometers zusammen. Diese Anordnung wird auf eine Grundplatte, den Interferometerhalter, mit M8 Gewindebohrung aufgesetzt. Das Gerät wird durch die Manipermmagnete zusammengehalten. Als Lichtquelle dient eine wenige Zentimeter vom Interferometer entfernte Natriumflamme. Blickt man entsprechend der Abbildung 2.1.10./2b in das Interferometer, so sieht man mehrere Spiegelbilder der Natriumflamme. Einige dieser Bilder überdecken einander und sind von einer Vielzahl von Interferenzstreifen durchzogen. Durch leichtes Drehen

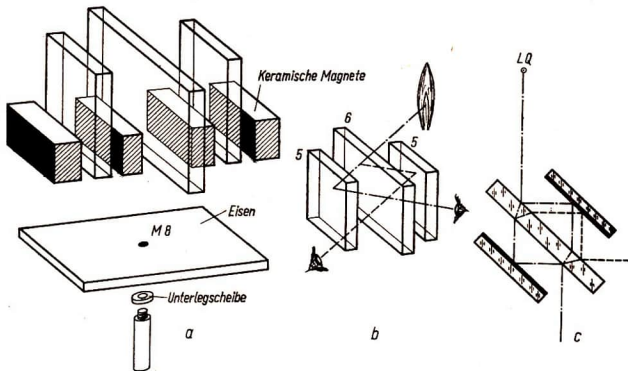


Abb. 2.1.10./2 Modell eines Glasplatteninterferometers:
 a) Zusammenbau des Gerätes, b) Versuchsanordnung, c) Strahlengang

der Anordnung stellt man auf größte Schärfe und Helligkeit der Interferenzfigur ein.

Versuch 3: Modell eines Interferometers nach Jamin

Man setzt das Interferometermodell wie bei 2 wiederum mit Manipermklötzen nach Abbildung 2.1.10./3a zusammen und bringt es auf die Grundplatte. Man läßt das Licht der Natriumflamme unter einem Winkel von etwa 45° auf die erste Glasplatte fallen und richtet das Interferometer so aus, daß das reflektierte Licht die zweite Glasplatte trifft (Abb. 2.1.10./3b und 2.1.10./3c). So erblickt man in dieser Platte

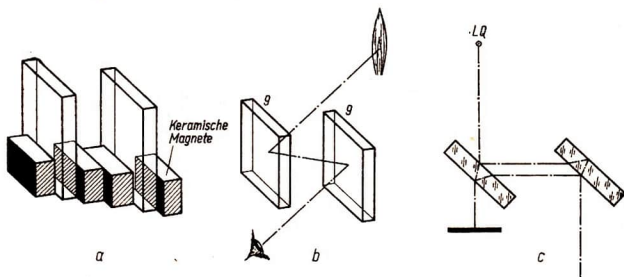


Abb. 2.1.10./3 Modell eines Interferometers nach Jamin:
 a) Zusammensetzung des Gerätes, b) Versuchsanordnung, c) Strahlengang

mehrere Spiegelbilder der Lichtquelle, die einander überdecken. Diese Bilder sind von einer Vielzahl von Interferenzstreifen durchzogen. Das direkte, durch die erste Glasplatte hindurchtretende Licht kann man mit Hilfe eines kleinen Schirmes ausblenden.

Bemerkungen

1. Der Versuch 1 gelingt schon, wenn man an Stelle des Glimmerblattes eine ausgesuchte, gut ebene Zellophanfolie verwendet.
2. Das beiderseitig halbdurchlässige versilberte Glimmerblattinterferometer kann man zum Schutz der Silberschicht wie ein Diapositiv rahmen.
3. Die Planparallelität der quaderförmigen Manipermklötze reicht meist für die einfachen Versuche nach 2 und 3 aus, so daß schon nach dem ersten Zusammenetzen der Geräte die Interferenzstreifen erscheinen. Sollte der gewünschte Erfolg nicht eintreten, so kann man gegebenenfalls die Klötze untereinander oder gegen andere austauschen, bis der Versuch gelingt. Man achte auf saubere Haftflächen der Magnete.

2.2. Interferenz durch Beugung

2.2.1. Beugung des Lichtes an einem schmalen Hindernis [SE]

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A) oder Kleinbildwerfer als Lichtquelle
2. Spalt (0,1 mm oder 0,2 mm)
3. Blendrahmen mit 3 Drähten [®],
dazu erforderliches Material:
rechteckige Hartpapier- oder Sperrholztabelle (130 mm × 90 mm) mit 70 mm × 70 mm großem Ausschnitt
3 Drähte mit Durchmessern von 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm
4. transparenter Schirm
5. Farbfilter
6. Meßstab
7. Feinmeßschraube
8. Meßschieber

Methodischer Hinweis

Die Versuche 2.2.1., 2.2.2. und 2.2.14. dienen dem Nachweis der typischen Welleneigenschaften Beugung und Interferenz beim Licht. Vor ihrer Ausführung sollten die entsprechenden Versuche mit Wasserwellen wiederholt werden.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.2.1./1. Etwa in die Mitte des Strahlenganges bringt man als Hindernis einen dünnen, parallel zum Spalt ausgerichteten Draht. Auf dem Transparenzschirm beobachtet man im Schlagschatten des Drahtes helle und dunkle Interferenzstreifen. Auch außerhalb des Schattenbereiches sind Interferenzstreifen zu sehen, sie sind jedoch nicht so kontrastreich.



Abb. 2.2.1./1 Versuchsanordnung zur Beugung des Lichtes an einem schmalen Hindernis

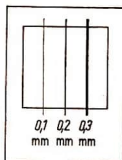


Abb. 2.2.1./2 Blendrahmen mit drei Drähten verschiedener Dicke

Wird der Abstand Spalt — Draht auf 20 cm bis 30 cm verkleinert und der Abstand Draht — Schirm mehrere Meter gewählt, so vergrößert sich das Schattenbild wesentlich und zeigt eine deutliche Aufhellung in der Mitte des Drahtschattens.

Auswertung

Zum Ermitteln der Wellenlänge des Lichtes mißt man den Durchmesser a des Drahtes mit einer Feinmeßschraube, den Abstand e des Hindernisses vom Bildschirm mit einem Meßstab und den Abstand s zwischen zwei Interferenzstreifen mit einem Meßschieber. Hierbei bekommt man genaue Werte, wenn man mit den Meßspitzen des Meßschiebers gleichzeitig mehrere Interferenzstreifen auf dem Transparenzschirm umfaßt und den abgelesenen Wert durch die Anzahl der Streifenabstände teilt.

Die Wellenlänge des Lichtes ergibt sich aus der Gleichung

$$\lambda = \frac{s \cdot a}{e}.$$

Bemerkungen

1. Um das Hindernis möglichst rasch gegen ein anderes mit anderer Dicke auszuwechseln zu können, empfiehlt es sich, einen Blendrahmen mit drei Drähten von 0,1 mm, 0,2 mm und 0,3 mm Durchmesser anzufertigen (Abb. 2.2.1./2). Man läßt die unteren Drahtenden etwas überstehen, damit man die Drähte straff spannen kann.
2. Statt der Drähte haben sich Angelschnüre als sehr brauchbar erwiesen.
3. Drähte und Angelschnüre lassen sich auch in ein Diarähmchen einklemmen.

2.2.2. Beugung des Lichtes an einem Doppelspalt [SE]

Zu Variante a

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Spaltdrehblende oder fester Spalt (0,2 mm)
3. Doppelspalt (SEG Wellenoptik) oder Doppelspalte
4. Diapositivhalter im Blendrahmen
5. transparenter Schirm
6. Farbfilter
7. optische Bank mit Reitern

Zu Variante b

Geräte 3., 5., 6., außerdem

8. Bildwerfer

9. Leuchtspalt (0,2 mm) im Diaformat

Methodische Hinweise

1. Die Variante a ist bei Benutzung der SEG als Schülerexperiment einzusetzen.
2. Variante b ist als Demonstrationsversuch geeignet.

Herstellen der Doppelspalte

Eine belichtete, entwickelte und fixierte Diapositivplatte vom Format $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ wird nach dem Trocknen an einem Rand mit einer Schmirgelfeile glatt geschliffen. In die geschwärzte Schicht wird mit einer der beiden Meßscheiden eines Meßschiebers ein Spalt eingeritzt; der Meßschieber wird dabei mit der anderen Schneide an der geschliffenen Seite der Diapositivplatte geführt (Abb. 2.2.2./1). Verstellt man den Meßschieber um 0,5 mm, 0,4 mm oder 0,3 mm, so kann man dicht neben dem ersten Spalt einen zweiten einritzen. Auf einer Diapositivplatte können 3 Doppelspalte mit den angegebenen Spaltabständen untergebracht werden. Dieses Verfahren geht zwar schnell, hat aber den Nachteil, daß beim Ritzen der Emulsionsschicht leicht gezackte Ränder entstehen. Glatte Ränder erhält man beim fotografischen Verfahren (vgl. MB 2.0.2.).

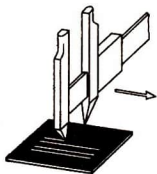


Abb. 2.2.2./1 Herstellen von Doppelspalten

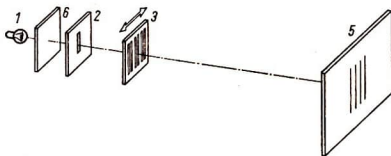


Abb. 2.2.2./2 Versuchsanordnung zur Interferenz des Lichtes durch Beugung am Doppelspalt

Variante a: Young-Fresnelsche Beugung an einem Doppelspalt

In geringer Entfernung hinter die Lichtquelle bringt man den etwa 0,2 mm ... 0,3 mm breiten Leuchtspalt. Beim Verwenden der Glühfadenlampe achte man auf die Parallelität zwischen Spalt und Glühfaden. In das vom Spalt ausgeblendete Lichtbündel stellt man je nach Stärke der verwendeten Lichtquelle den transparenten Schirm in einer Entfernung von 2 m ... 6 m. Etwa 20 cm bis 30 cm hinter dem Spalt ordnet man den Beugungsdoppelspalt parallel zum Leuchtspalt gut durchleuchtet an (Abb. 2.2.2./2). Auf dem transparenten Schirm beobachtet man eine mehrfarbige Interferenzfigur. Durch Einschalten von Farbfiltern wird sie einfarbig (Abb. 2.2.2./3). Bringt man Doppelspalte mit anderem Spaltabstand in den Strahlengang, so kann man die Abhängigkeit des Streifenabstandes vom Spaltabstand zeigen.



Abb. 2.2.2./3 Fotografische Aufnahme der Interferenzfigur

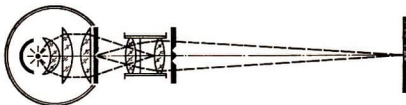


Abb. 2.2.2./4 Versuchsanordnung zur Fraunhoferschen Beugung am Doppelspalt bei Verwendung eines Kleinbildprojektors

Variante b: Fraunhofersche Beugung am Doppelspalt — Verwendung eines Bildwerfers

Die Erscheinung kann auch bei Fraunhoferscher Beugung demonstriert werden, wenn man einen Bildwerfer verwendet (Abb. 2.2.2./4). In den Lichtschacht bringt man einen Leuchtpalt im Diaformat, z. B. den Spalt zwischen zwei Rasierklingen, die zwischen zwei Diagläsern wie ein Diapositiv gerahmt sind. Er wird mit dem Objektiv auf einem 2 m ... 5 m entfernten transparenten Schirm scharf abgebildet. Den Doppelspalt stellt man dicht vor dem Objektiv des Projektors auf.

Bemerkungen

1. Bei der Versuchsvariante a kann die Helligkeit der Interferenzfigur verbessert werden, indem man ein konvergentes Lichtbündel verwendet. Dazu entfernt man vorübergehend den Leuchtpalt, bringt einen Kondensor in den Strahlengang und bildet mit ihm die Lichtquelle auf dem Doppelspalt ab. Danach bringt man den Leuchtpalt dicht hinter dem Kondensor wieder in den Strahlengang.
2. Die unter a und b beschriebenen Versuchsanordnungen können zum Ermitteln der Lichtwellenlänge dienen. Dazu müssen der Spaltabstand a , die Entfernung e zwischen Doppelspalt und Bildschirm und der Abstand s zweier Interferenzstreifen bestimmt werden. Zur Auswertung vgl. V 2.1.2.!



2.2.3. Beugung des Lichtes an mehreren äquidistanten Spalten [SE]

Zu Variante a

1. Spektralröhre für seitliche Betrachtung der Leuchtsäule (linienarmes Spektrum, z. B. He)
2. Funkeninduktor oder Teslatransformator
3. 2 Hochspannungsisolatoren
4. Hülse aus schwarzem Karton ⑤
5. mehrere äquidistante Spalte ⑤, auf fotografischem Wege hergestellt (s. MB 2.0.2.)

Zu Variante b

- Gerät 5., außerdem
6. Physikleuchte mit Glühfadlampe (6 V; 30 W), Kondensator und Transformator
 7. Prismenspektralapparat
 8. Farbfilter
 9. Halter für die äquidistanten Spalte

Methodische Hinweise

1. Die Versuche dienen dazu, den Übergang vom Doppelspalt zum Gitter, der theoretisch nur schwer zu behandeln ist, in der Praxis vorzuführen.
2. Vergleiche V 1.2.10.!

Herstellen der äquidistanten Spalte

Die Herstellung der äquidistanten Spalte erfolgt auf fotografischem Wege nach dem unter MB 2.0.2. angegebenen Verfahren. Für eine gute und eindeutige Beobachtung der Interferenzfiguren ist ein Spaltabstand von etwa 0,1 mm erforderlich. Damit man eine genügend gute Beobachtungsgrundlage zum Extrapolieren der Interferenzbedingungen am optischen Strichgitter erhält, muß man eine ganze Reihe äquidistanter Spalte zur Verfügung haben. Es empfiehlt sich, 2, 3, 4 ... 7 äquidistante Spalte auf einer Fotoplatte herzustellen. Das Zeichnen der Vorlage dafür macht nur geringe Mühe.

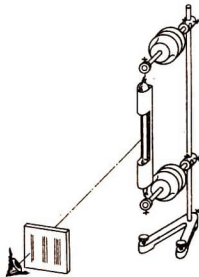


Abb. 2.2.3./1 Beobachtung der Interferenz des Lichtes bei der Beugung an mehreren äquidistanten Spalten

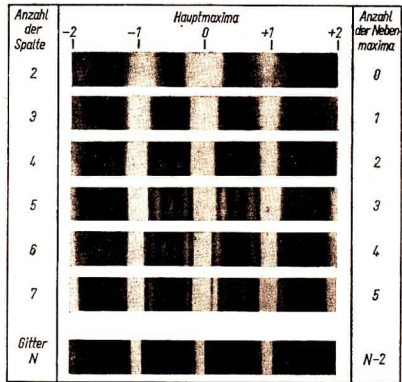


Abb. 2.2.3./2 Interferenzfiguren bei der Beugung des Lichtes an äquidistanten Spalten mit unterschiedlicher Spaltzahl N

Variante a: Extrapolieren der Interferenzbedingung am optischen Strichgitter

Man betrachtet die lotrecht stehende, als linienförmige Lichtquelle wirkende Spektralröhre aus einer Entfernung von 3 m ... 6 m durch die dicht vor das Auge gehaltenen äquidistanten Spalte (Abb. 2.2.3./1). Spaltichtung und Spektralröhre müssen parallel sein. Man beginnt die Betrachtung durch 2 äquidistante Spalte, danach blickt man durch 3, 4 ... 7 Spalte und vergleicht die beobachteten Beugungsfiguren miteinander.

Man sieht zu beiden Seiten der Lichtquelle Beugungsmaxima bis zur 4. oder 5. Ordnung. Je größer die Anzahl der Spalte wird, um so lichtstärker und schärfer werden diese Maxima. Gleichzeitig beobachtet man das Auftreten von feinen Nebenmaxima. Mit steigender Spaltzahl werden diese Nebenmaxima immer feiner und lichtschwächer; vergleiche dazu Abbildung 2.2.3./2. Verwendet man schließlich ein optisches Strichgitter, dessen Gitterkonstante mit dem Abstand der äquidistanten Spalte übereinstimmt, so beobachtet man nur die scharf gezeichneten Hauptmaxima. Daraus kann man die Interferenzbedingungen für die Beugung des Lichtes am optischen Strichgitter extrapolieren:

Am optischen Strichgitter sind nur die sehr scharfen Hauptmaxima zu beobachten, da die Anzahl der Nebenmaxima sehr groß, ihre Lichtstärke aber sehr gering wird.

Variante b: Verwendung eines Schulspektralapparates zum Beobachten der Beugung des Lichtes an äquidistanten Spalten

Die Interferenzfiguren bei der Beugung an äquidistanten Spalten kann man auch mit Hilfe eines Spektralapparates beobachten. Man entfernt zu diesem Zweck das Glasprisma vom Prismentisch und richtet Spalt- und Fernrohr in eine optische Achse, nachdem man das Fernrohr vorher auf Unendlich eingestellt hat. Nunmehr beleuchtet man den Spalt mit einer Glühfadenlampe unter Zwischenschalten eines Farbfilter. Ohne die Einstellung des Fernrohres zu verändern, verschiebt man nun den Spalt in Richtung der optischen Achse, bis man im Fernrohr ein scharfes Bild des Spaltes erkennt. Zwischen Spaltrohr und Fernrohr stellt man auf dem Prismentisch mit Hilfe eines Halters aus Blech die äquidistanten Spalte auf (Abb. 2.2.3./3). Durch das Fernrohr beobachtet man die Interferenzfigur.

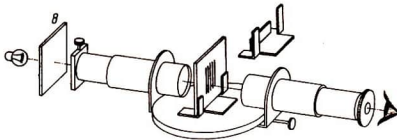


Abb. 2.2.3./3 Beobachtung der Interferenzfiguren durch einen Schulspektralapparat

Bemerkungen

1. Den Halter für die äquidistanten Spalte kann man auf Abbildung 2.2.3./3 erkennen. Man stellt ihn aus dünnem Blech her.
2. Die unter 4. aufgeführte Kartonhülse hat die Aufgabe, die Enden der Spektralröhre zu verdecken, so daß nur die mittlere Kapillare sichtbar ist. Man klebt sie aus dünnem, schwarzem Karton und schneidet aus ihrem mittleren Teil ein Fenster aus.
3. Die Halterung der Spektralröhre kann mit Hilfe zweier Hochspannungsisolatoren erfolgen, an die man je einen Haken aus Draht klemmt (Abb. 2.2.3./1). Die Abbildung 2.2.3./4 gibt eine Anregung zur Selbstanfertigung eines Spektralröhrenhalters aus einem Hartpapier- oder Sperrholzstreifen und zwei Krokodilklemmen.
4. Es bereitet keine Schwierigkeiten, von Mehrfachspalten und Gittern auf fotografischem Wege ganze Klassensätze anzufertigen. Auf das Einglasen kann man verzichten. Mit ihnen kann man die oben beschriebenen subjektiven Versuche in günstiger Weise auch übungsmäßig durchführen. Die Versuche eignen sich zum

Teil auch für das Arbeiten in gleicher Front. Als Lichtquelle stellt man einen etwa 1 mm breiten Spalt in einem Diapositivhalter auf den Experimentiertisch und beleuchtet ihn von hinten durch einen Bildwerfer, in den man ein Rotfilter einsetzt. Die Schüler halten nacheinander den Doppelspalt, die Mehrfachspalte und das Gitter mit $a = 0,2$ mm dicht vor das Auge. Die Interferenzbilder haben dabei immer die gleiche Lage, werden aber schärfer und heller mit zunehmender Spaltzahl.

5. Es ist eine objektive Abbildung der Interferenzfiguren nach Variante a möglich, indem man die äquidistanten Spalte in einer Versuchsanordnung nach V 2.2.4. oder V 2.2.6. an Stelle des Gitters einsetzt.



Abb. 2.2.3./4 Spektralröhrenhalter

2.2.4. Die experimentelle Untersuchung der Beugung des Lichtes an einem optischen Strichgitter [SE]

1. Kleinbildprojektor
2. Leuchtspalt im Diapositivformat (50 mm \times 50 mm) $\text{\textcircled{S}}$,
dazu erforderliches Material:
2 Rasierklingen
2 Diapositivdeckgläser
3. Strichgitter aus SEG und Strichgitter $\text{\textcircled{S}}$
4. Blendrahmen mit Diapositivhalter
5. transparenter Schirm
6. verschiedene Farbfilter (SEG) und Farbfilter (grün) aus Colorfolie $\text{\textcircled{S}}$

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann in der Oberstufe ohne quantitative Auswertung gezeigt werden. Die quantitative Auswertung bleibt der Abiturstufe vorbehalten.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entspricht V 2.2.2., Variante b. In den Lichtschacht eines Kleinbildprojektors schiebt man einen Leuchtspalt mit einer Spaltbreite von etwa

0,1 mm ... 0,2 mm, den man aus 2 Rasierklingen herstellt (s. MB 2.0.2.). Durch das Objektiv wird ein scharfes Bild des Leuchtpaltes auf dem 3 m ... 5 m entfernten transparenten Schirm erzeugt. Das fotografisch hergestellte Gitter wird gemeinsam mit einem Lichtfilter in den Diapositivhalter gesteckt. Auf dem transparenten Schirm kann man danach die Beugungsfigur betrachten (Abb. 2.2.4./1).

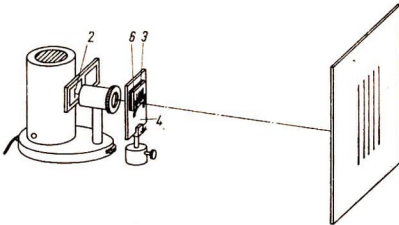


Abb. 2.2.4./1
Versuchsanordnung zur
Beugung des Lichtes an einem
optischen Strichgitter

Versuch 1: Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Gitterkonstante a

Bringt man nacheinander Strichgitter mit unterschiedlichen Gitterkonstanten a bei unverändertem Schirmabstand e und gleicher Lichtwellenlänge λ in den Strahlengang, so findet man bei Auswertung der beobachteten Beugungsfiguren die Proportionalität

$$s \sim \frac{1}{a} \quad (\text{vgl. Abb. 2.2.4./2a}).$$

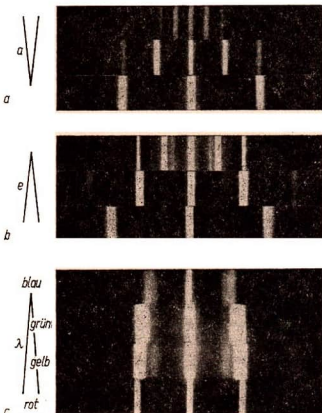


Abb. 2.2.4./2 Interferenzfiguren bei der
Beugung des Lichtes an einem optischen
Strichgitter:

- a) Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Gitterkonstante a ,
- b) Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Schirm Entfernung e ,
- c) Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Lichtwellenlänge λ

Versuch 2: Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Schirm Entfernung e

Man entwirft nacheinander bei unveränderter Gitterkonstante a und gleicher Lichtwellenlänge λ die Beugungsfigur in den Entfernungen 1 m, 2 m und 3 m. Durch Vergleichen der Beugungsfiguren findet man für den Streifenabstand die Beziehung

$$s \sim e \quad (\text{vgl. Abb. 2.2.4./2b}).$$

Versuch 3: Abhängigkeit des Streifenabstandes s von der Lichtwellenlänge λ

Bei unveränderter Schirm Entfernung e und bei gleichbleibender Gitterkonstante a wechselt man nacheinander die Farbfilter aus (blau — grün — gelb — rot). Man findet aus den Interferenzfiguren

$$s \sim \lambda \quad (\text{vgl. Abb. 2.2.4./2c}).$$

Faßt man die Ergebnisse der drei Versuche zusammen, so erhält man die Proportionalität

$$s \sim \frac{e \cdot \lambda}{a}$$

oder eine Bestätigung der Gleichung

$$\lambda = \frac{s \cdot a}{e}.$$

Bemerkungen

- Die beschriebenen Versuche können als Schülerexperiment mit den SEG-Optik durchgeführt werden. Statt des Bildwerfers sind die Experimentierleuchte mit Leuchtpalt und eine Linse ($f = +100$ mm) als Abbildungslinse zu verwenden.
- Dieser Versuch kann auch als Übungsversuch mit subjektiver Beobachtung ausgeführt werden. Man benötigt dazu einen Klassensatz optischer Strichgitter mit verschiedenen Gitterkonstanten. Sie werden nach den in MB 2.0.2. beschriebenen Verfahren auf fotografischem Wege hergestellt. Die Interferenzbilder sind besser zu beobachten als bei der Abbildung auf einem Projektionsschirm; es sind auch Interferenzbilder höherer Ordnung zu erkennen. Auf dem Experimentiertisch wird ein etwa 1 mm breiter Spalt in einem Diapositivhalter von hinten durch einen Bildwerfer beleuchtet, in dessen Lichtschacht man ein Rotfilter einsetzt.
 - Die Schüler beobachten nacheinander aus gleicher Entfernung durch ein Gitter mit $a = 0,2$ mm, $a = 0,1$ mm, $a = 0,05$ mm. Sie erkennen, daß die Interferenzstreifen mit kleinerer Gitterkonstante weiter auseinanderrücken.
 - Die Schüler beobachten durch das Gitter mit der Konstante $a = 0,05$ mm aus verschiedenen Entfernungen. Der Abstand der Interferenzstreifen wächst mit der Entfernung von der Lichtquelle.
 - Das Rotfilter wird aus dem Bildwerfer genommen, der Spalt wird mit weißem Licht beleuchtet. Man kann auch als Lichtquelle eine Kerzenflamme verwenden. Die Schüler beobachten sie durch das Gitter mit $a = 0,05$ mm. Es entstehen vollkommene Beugungsspektren, die zur Mitte zu Violett und am äußeren Ende Rot haben. Der Abstand zwischen den Gebieten der Verstärkung ist also für Rot größer als für Violett.
- Man kann die Versuche auch mit dem Tageslichtschreibprojektor ausführen. Ein schmaler Spalt wird durch zwei Stück Papier auf der Schreibfläche gebildet.

Gitter und Filter werden in einen Blendrahmen gesteckt und dicht vor das Objektiv gehalten.

2.2.5. Bestimmung der Lichtwellenlänge durch Beugung unter Verwendung eines Doppelkeilspaltes [SE]

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. 2 Diapositivhalter
3. Doppelkeilspalt (SEG Optik, Keilabstand 11 mm)
4. Strichgitter (SEG Optik, $a = 0,05$ mm)
5. lange optische Bank mit Reitern
6. Farbfilter
7. Meßstab

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist als Praktikumsexperiment in der Abiturstufe vorgesehen.
2. Es wird bei diesem Prinzip die Messung des Abstandes der Interferenzbilder erspart, da der Abstand der beiden keilförmigen Spalte bekannt ist.

Versuchsordnung

Am Ende einer optischen Bank wird ein Diapositivhalter mit dem Doppelkeilspalt aufgestellt. Von der Rückseite erfolgt die Beleuchtung.

Der zweite Diapositivhalter mit dem Strichgitter wird auf der optischen Bank in Richtung der optischen Achse verschiebbar angeordnet (Abb. 2.2.5./1).

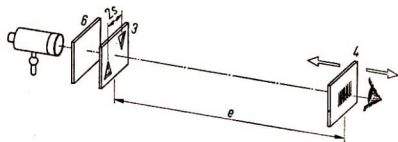


Abb. 2.2.5./1
Ermitteln der Lichtwellenlänge durch Beugung des Lichtes an einem Strichgitter

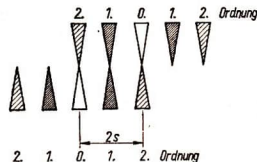


Abb. 2.2.5./2
Beugungsfiguren bei richtiger Gitterentfernung

Bringt man das Auge nahe an das Gitter und blickt auf die beiden Spaltöffnungen, so beobachtet man übereinander zwei Interferenzfiguren, deren zentrale Maxima um $2s = 11$ mm gegeneinander versetzt sind. Man verschiebt das Gitter längs der

optischen Achse so, daß das linke Maximum 1. Ordnung des oberen Interferenzbildes mit dem rechten Maximum 1. Ordnung des unteren Interferenzbildes genau übereinandersteht (Abb. 2.2.5./2). So stellt man den Abstand der Maxima 1. Ordnung von den zentralen Maxima auf $s = 5,5 \text{ mm}$ ein. Die Entfernung e zwischen Gitter und Spaltöffnungen wird gemessen. Bei bekannter Gitterkonstante a ist die Wellenlänge zu berechnen:

$$\lambda = \frac{a \cdot s}{e}.$$

Versuch 1: Übersicht über die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes

Man verwendet weißes Licht. Die Interferenzbilder zeigen die Spektralfarben. Der Abstand e zwischen Gitter und Spaltöffnungen wird so eingestellt, daß jeweils die gleichen Farben in den Maxima 1. Ordnung übereinanderstehen. Von Rot nach Violett fortschreitend erhält man für e wachsende Werte, mit denen man näherungsweise die mittleren Wellenlängen für die verschiedenen Farben im Spektrum berechnen kann.

Versuch 2: Bestimmen der mittleren Wellenlängen hinter Farbfiltern

Durch verschiedene Farbfilter erhält man einfarbige Bilder und kann mit ihnen die mittlere Wellenlänge des von ihnen nicht absorbierten Teils des Spektrums bestimmen.

Bemerkung

Nach dem gleichen Prinzip ist es möglich, die Wellenlänge einiger Spektrallinien zu bestimmen. Dazu benutzt man eine größere Platte aus Blech oder Pappe mit zwei keilförmigen Spalten ohne Transparentpapier (Spaltabstand 100 mm). Dicht dahinter stellt man zwei Bunsenbrenner auf, deren Flammen mit Natrium-, Barium- oder Strontiumsalzen gefärbt werden. Das optische Gitter sollte für diesen Versuch eine möglichst kleine Gitterkonstante haben.

2.2.6. Bestimmung von Frequenzen des sichtbaren Lichtes und von Gitterkonstanten bei Verwendung von Strichgittern [SE]

Zu Versuch 1

1. Bildwerfer
2. Leuchtspalt (0,1 mm ... 0,2 mm)
3. Strichgitter (SEG Optik, $a = 0,05 \text{ mm}$ und $a = 0,1 \text{ mm}$)
4. Diapositivhalter
5. transparenter Schirm
6. Meßschieber oder Stechzirkel
7. Meßband

Zu Versuch 2

1. bis 7., außerdem
8. Farbfilter

Zu Versuch 3

1. bis 7., außerdem
9. Natriumdampfampe mit Drossel und Lampengehäuse
10. Linse ($f = +100 \text{ mm}$)

Methodischer Hinweis

Die Versuche sind für Demonstrationen in der Ober- und der Abiturstufe geeignet.

Versuch 1: Bestimmung der Grenzfrequenz des sichtbaren Lichtes

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt nach V 2.2.2., Variante b, Abbildung 2.2.2./4. Der in den Kleinbildprojektor eingesetzte Spalt wird mit Hilfe des Projektionsobjektivs auf einem mehrere Meter entfernten Schirm scharf abgebildet. Dann stellt man das Strichgitter mit dem Diapositivhalter dicht vor das Objektiv. Die Entfernung e zwischen dem Gitter und der Projektionsfläche wird mit einem Meßband bestimmt. Im verdunkelten Raum erkennt man auf dem Transparenzschirm links und rechts neben dem zentralen Maximum, dem Spektrum 0. Ordnung, Beugungsspektren. Mit einem Meßschieber greift man den Abstand ($2s$) gleichfarbigen Lichtes, nämlich des gerade noch erkennbaren dunkelroten Lichtes, und bei einer zweiten Messung den Abstand des äußersten violetten Lichtes am Beugungsspektrum 1. Ordnung, ab (Abb. 2.2.6./1).

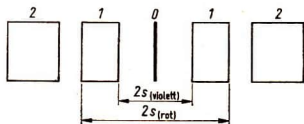


Abb. 2.2.6./1
Bestimmung des Abstandes gleichfarbigen Lichtes in den Spektren 1. Ordnung

Nach der Gleichung

$$\lambda = \frac{s \cdot a}{e}$$

berechnet man die Wellenlänge für diese beiden Lichtarten. Die zugehörigen Frequenzen ergeben sich aus der Wellengleichung

$$f = \frac{c}{\lambda},$$

wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes c mit $3 \cdot 10^{11} \text{ mm}$ einzusetzen ist.

Versuch 2: Bestimmung der mittleren Frequenz von Filterlicht

Nach Abbildung des Leuchtpaltes auf die Projektionsfläche (Versuchsanordnung wie bei Versuch 1) wird ein Farbfilter in den Strahlengang gebracht und danach das Strichgitter vor das Objektiv gesetzt. Dann erfolgt die Messung des Abstandes der Maxima 1. Ordnung und die Berechnung der mittleren Frequenz nach der im Versuch 1 angegebenen Gleichung.

Versuch 3: Bestimmung der Gitterkonstanten eines Strichgitters

Variante a

Als Lichtquelle dient das gefilterte Licht des Bildwerfers. Die mittlere Wellenlänge des Lichtes wurde nach Versuch 2 bestimmt.

Vor das Objektiv wird das Gitter mit der unbekanntenen Gitterkonstanten gesetzt, der Abstand des Maximums 0. bis 1. Ordnung gemessen und die Gitterkonstante nach der Interferenzgleichung ausgerechnet.

Variante b

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 2.2.6./2. Als Lichtquelle dient die Natriumdampfampe. Der Leuchtpalt, dicht vor die Na-Dampfampe gesetzt, wird mit

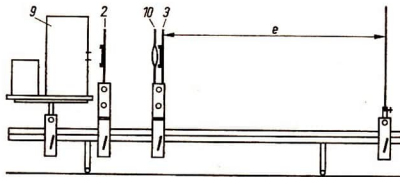


Abb. 2.2.6./2 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Gitterkonstanten unter Verwendung einer Natriumdampfampe

der Linse ($f = +100$ mm) scharf auf dem transparenten Schirm abgebildet. Unmittelbar hinter die Linse wird das Gitter in den Strahlengang gestellt. Nach Messung des Abstandes vom Maximum 0. Ordnung zu dem 1. Ordnung und des Abstandes Gitter – Schirm läßt sich die Gitterkonstante a aus der Beziehung

$$a = \frac{\lambda \cdot e}{s}$$

berechnen. Für die Wellenlänge des Natriumdampflichtes ist $5,89 \cdot 10^{-7}$ m einzusetzen.

Bemerkungen

1. Durch die nur angenäherte Einstellung des Meßschiebers schwanken die Ergebnisse relativ stark, erreichen aber eine Genauigkeit von ± 30 mm. Die zur Berechnung benutzte Gleichung $\lambda = \frac{s \cdot a}{e}$ gilt nur für kleine Winkel, deshalb kann man die Genauigkeit der Messung nicht dadurch erhöhen, daß man die Abstände in den Spektren höherer Ordnung zur Berechnung heranzieht.
2. Sollen die Versuche als Schülerexperimente ausgeführt werden, so sind die Teile der SEG zu benutzen. Statt des Bildwerfers sind die Experimentierleuchte und die Abbildungslinse mit $f = +100$ mm einzusetzen.

2.2.7. Erzeugung eines Beugungsspektrums durch ein Transmissionsgitter

1. Physikleuchte mit Glühfadenlampe (6 V; 30 W) mit Kondensator und Transformator
2. Spaltdrehblende oder verstellbarer Spalt
3. Linse ($f = +150$ mm)
4. Linse ($f = +250$ mm)
5. Gitterkopie (Transmissionsgitter) etwa 600 Linien je mm
6. Diapositivhalter
7. breiter, transparenter oder mattweißer Schirm (Karton)
8. optische Bank mit Reitern

Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann in der Oberstufe eingesetzt werden. Dabei kommt es darauf an, daß die durch Beugung und Interferenz entstehenden Spektren gezeigt werden.
2. Die Spektren sind mit Dispersionsspektren hinter Prismen zu vergleichen.

Versuch

Nach Abbildung 2.2.7./1 werden auf eine optische Bank die Physikleuchte, der verstellbare Spalt, die beiden Sammellinsen und der transparente Schirm gestellt. Spalt und Schirm stehen jeweils in den Brennebenen der entsprechenden Linsen;

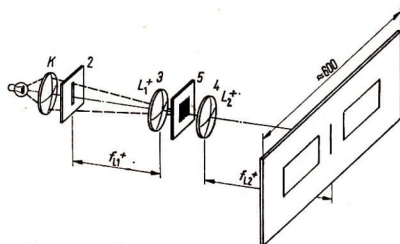


Abb. 2.2.7./1
Versuchsanordnung zum Erzeugen eines Beugungsspektrums mit Hilfe eines Transmissionsgitters

zwischen den Linsen ist nur ein schmaler Raum zum Aufstellen des Gitters zu lassen. Bei dieser Anordnung wird der Spalt scharf auf dem Schirm abgebildet. Das reelle Bild der Lichtquelle, erzeugt durch die Kondensorlinse, soll dabei zwischen den beiden Sammellinsen liegen. Bringt man nunmehr ein Transmissionsgitter zwischen die beiden Sammellinsen, so erhält man auf dem Schirm rechts und links des Spaltes Beugungsspektren 1. und 2. Ordnung, wobei die Spektren 2. Ordnung lichtschwächer sind. Da Glühlicht zur Erzeugung des Spektrums verwendet wird, ist das Spektrum kontinuierlich.

Bemerkung

Auch dieser Versuch ist zur Bestimmung der Grenzen des sichtbaren Spektralbereiches geeignet. Ist a die Gitterkonstante, α der Winkel zwischen dem zentralen

Spaltbild (Spektrum 0. Ordnung), dem Gitter und der jeweiligen Grenze des Spektrums n ter Ordnung, so gilt die Gleichung

$$n \cdot \lambda = a \cdot \sin \alpha. \quad (1)$$

Den Winkel α berechnet man aus seiner Tangensfunktion nach der Gleichung

$$\tan \alpha = \frac{s_n}{e}.$$

Hierin ist s_n der Abstand der Grenze des Spektrums n ter Ordnung vom zentralen Spaltbild und e die Entfernung des Schirmes vom Gitter. Steht das Gitter dicht an der zweiten Sammellinse, so ist e angenähert gleich f_2 . Somit ist

$$\tan \alpha = \frac{s_n}{f_2}. \quad (2)$$

Aus den beiden Gleichungen (1) und (2) folgt unter Berücksichtigung von

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$$

für die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{a \cdot s_n}{n \sqrt{f_2^2 + s_n^2}}.$$

2.2.8. Verwendung eines Schulspektralapparates als Gitterspektralapparat [SE]

1. Verschiedene Lichtquellen
2. Prismenspektralapparat
3. Gitterkopie (Transmissionsgitter) etwa 100 bis 600 Linien je mm
4. Winkelmesser zum Aufsetzen auf den Spektralapparat ⑧,
dazu erforderliches Material:
Vollkreiswinkelmesser aus Zelluloid (\varnothing max. 140 mm)
kleine Placrylscheibe
Zelluloidblättchen
5. Gitterhalter aus dünnem Blech ⑧

Methodischer Hinweis

Die Anordnung stellt für die quantitative Auswertung von V 2.2.7. einen festen Aufbau dar.

Versuch

Der Schulspektralapparat wird in der gleichen Weise verwendet wie im Versuch V 2.2.3., Variante b. Um exakte Messungen ausführen zu können, muß man eine Kreisteilung, eine Meßmarke und ein Fadenkreuz im Fernrohr anbringen. Als behelfsmäßige Kreisteilung genügt ein Vollkreiswinkelmesser, der, wie Abbildung 2.2.8./1 zeigt, auf den Spektralapparat aufgesetzt wird. Die Meßmarke befestigt man am Fernrohr; sie dreht sich mit ihm und ermöglicht ein Ablesen auf dem Vollkreiswinkelmesser. Als Fadenkreuz bringt man eine dünne runde Zelluloidscheibe

mit einem feinen eingeritzten Strich am Okular an. Da es sich um ein Ramsdensches Okular handelt, muß das Zelluloidblättchen dicht vor die Feldlinse gesetzt werden.

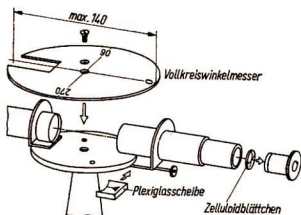


Abb. 2.2.8./1 Verwendung des Schulspektralapparates als Gitterspektralapparat

Man braucht dann lediglich den Winkel α zu messen, um den das Fernrohr vom zentralen Spaltbild bis zur auszu messenden Spektrallinie geschwenkt werden muß. Bei bekannter Gitterkonstante berechnet man die Wellenlänge nach der Gleichung

$$\lambda = \frac{a}{n} \cdot \sin \alpha ,$$

wenn n die Ordnungszahl des Beugungsspektrums ist.

Bei bekannter Lichtwellenlänge ergibt sich die Gitterkonstante a aus

$$a = \frac{n \cdot \lambda}{\sin \alpha} .$$

Als Lichtquellen benutzt man Spektralröhren oder eine Bunsenflamme, die man mit einem Salz färbt. Bei Bestrahlung des Spaltes mit Sonnenlicht über einen Heliostaten erhält man ein Absorptionsspektrum mit den bekannten Fraunhoferschen Linien.

Bemerkung

Es ist darauf zu achten, daß bei der Einstellung des Fernrohrs auf das zentrale Spaltbild die Winkelskala den Wert Null anzeigen muß. Um Meßfehler weitgehend auszuschalten, ist es zweckmäßig, beiderseitig des Spaltbildes abzulesen und mit dem Mittelwert zu rechnen.



2.2.9. Wellenlängenbestimmung des Lichtes mit einem Transmissionsgitter [SE]

1. Spektralröhren (z. B. Na, He)
2. Funkeninduktor oder Teslatransformator
3. Transmissionsgitter ($a = 0,01$ mm bis $0,005$ mm)
4. Diapositivhalter
5. 2 Hochspannungsisolatoren oder Spektralröhrenhalter ® (siehe V 2.2.3.)
6. Meßstab
7. Vertikalmeßstab mit 2 Reitern

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Abiturstufe bestimmt. Es wird eine Möglichkeit gezeigt, die Wellenlängen bestimmter Spektrallinien zu ermitteln.
2. Vergleiche V 2.2.8.!

Versuch

Der Versuchsaufbau ist aus Abbildung 2.2.9./1 zu ersehen. Der Meßstab wird vom Stativmaterial waagrecht gehalten, so daß seine Mitte (50 cm-Skalenstrich) vor der Kapillare der Spektralröhre steht. Das optische Gitter wird etwa 1 m vor der Mitte des Meßstabes mit einem Diapositivhalter aufgestellt.

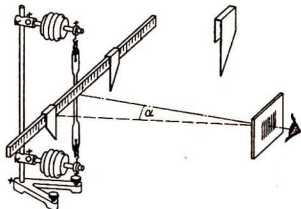


Abb. 2.2.9./1 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtes mit einem Transmissionsgitter

Blickt man im verdunkelten Raum durch das optische Gitter, so erkennt man rechts und links von der leuchtenden Kapillare der Spektralröhre die Spektrallinien der Beugungsspektren. Man schiebt die Reiter genau über die zu untersuchenden gleichfarbigen Spektrallinien gleicher Ordnung.

Zur Berechnung der Wellenlänge mißt man mit einem weiteren Meßstab die Entfernung e des Gitters vom waagrecht angebrachten Meßstab und liest den Abstand $2s_n$ der beiden Meßmarken ab. Bei richtiger Aufstellung und genauer Einstellung der Meßmarken müßte die Hälfte dieses Wertes gleich dem Abstand jeder Meßmarke von der Mitte sein. Das Verhältnis von s_n zu e ergibt den Tangens des Winkels:

$$\tan \alpha = \frac{s_n}{e}$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$$

ergibt sich für die Wellenlänge die Gleichung

$$\lambda = \frac{a \cdot s_n}{n \sqrt{e^2 + s_n^2}}$$

Bemerkung

Stellt man an die Stelle der Kapillare der Spektralröhre einen etwa 0,1 mm ... 0,2 mm breiten Spalt auf, so kann man das Licht einer Bunsenflamme untersuchen, die man hinter den Spalt stellt und mit einem Salz färbt.

2.2.10. Der Gebrauch des Gitterspektralapparates zur Spektralanalyse [SE]

1. Gitterspektralapparat mit Transmissionsgitter und Skalen
2. Bunsenflammen
3. Natriumsalz
4. Magnesiastäbchen oder statt 2., 3. und 4. Natriumdampfampe NAE 24 mit Drosselspule

Methodischer Hinweis

Dieser Versuch zeigt das gleiche wie V 2.2.9., aber unter Verwendung eines industriell gefertigten Gitterspektralapparates.

Versuch

Die Wirkungsweise des Gitterspektralapparates gleicht im Prinzip der der Versuchsanordnung nach V 2.2.9. Hinter den Blendschirm eines Gitterspektralapparates wird eine Natriumflamme gebracht, die den Spalt gut beleuchtet. Auch eine Natriumdampfampe ist dazu geeignet. Indem man mit dicht hinter das Gitter gebrachtem Auge das Beugungsspektrum beobachtet, wird der Gitterhalter so lange längs der optischen Achse verschoben, bis die Natriumlinien 1. Ordnung links und rechts vom Spalt mit den Eichmarken auf der Spaltwand zur Deckung kommen (Abb. 2.2.10./1).

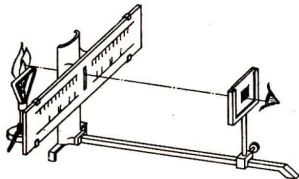


Abb. 2.2.10./1 Gitterspektralapparat

Nunmehr kann man an Stelle der Natriumlampe eine Lichtquelle bringen, deren spektrale Zusammensetzung man untersuchen will. Man kann deren Beugungsspektren entweder mit der Wellenlängenskale vergleichen und die Wellenlänge direkt ablesen, oder für spektralanalytische Untersuchungen die Linienskale verwenden, die eine Reihe markanter Spektrallinien enthält.

2.2.11. Beugung des Lichtes an einem Reflexionsgitter

Zu Variante a

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Spaltblende (0,2 mm ... 0,4 mm)
3. Linse ($f = +500$ mm)
4. Stück einer Langspielplatte (Mikrorille) als behelfsmäßiges Reflexionsgitter
5. Blendrahmen mit Diapositivhalter
6. transparenter Schirm

7. Farbfilter
8. Planspiegel (50 mm × 50 mm)

Zu Variante b

Geräte 1. und 2. wie bei a. Für 1. auch Natriumdampfampe mit Drossel oder Spektralröhren (He, Na) mit Funkeninduktor oder Teslatransformator, außerdem

9. ebenes Reflexionsgitter (Schulgitter)
10. Doppelkondensator ($f = +60$ mm)
11. Linse ($f = +250$ mm)
12. gewölbter, mattweißer Schirm Ⓢ,
dazu erforderliches Material:
rechteckiger Streifen aus dünnem Aluminiumblech
Zeichenkarton
13. optische Bank mit Reitern

Zu Variante c

Geräte 1., 2., 9., 11., außerdem

14. ebener Bildschirm Ⓢ,
dazu erforderliches Material:
Hartpapierplatte (600 mm × 350 mm)
4 Holzleisten (120 mm × 30 mm × 40 mm)
weißes Papier
15. Heliostat
16. Kleinbildwerfer
17. Quecksilberdampfampe mit Drossel und Lampengehäuse

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind für die Oberstufe und die Abiturstufe geeignet.
2. Interferenzspektren an Reflexionsgittern sind besonders breit auseinander gezogen, weil diese mit sehr kleinen Gitterkonstanten hergestellt werden können.
3. Die Versuche geben einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten, das Reflexionsgitter einzusetzen.

Variante a: Verwendung eines Stückes einer Langspielplatte als Reflexionsgitter

Dicht hinter eine Lichtwurflampe mit Kondensator stellt man die Spaltdrehblende oder einen verstellbaren Spalt. Der Glühfaden und der Spalt müssen parallel stehen. In einer Ebene mit dem Spalt ordnet man den transparenten Schirm an. Zum Vermeiden der Bestrahlung des Schirmes durch die Lichtquelle kann man gegebenenfalls eine Pappwand zwischen Spalt und Schirm bringen. Etwa 1 m von dieser Anordnung entfernt wird die Sammellinse aufgestellt. Dicht dahinter steht der Blendrahmen mit Diapositivhalter, in den senkrecht zum Lichteinfall ein Planspiegel geschoben ist. Durch Verschieben von Linse und Spiegel entwirft man ein scharfes Bild des Spaltes auf dem Schirm (Abb. 2.2.11./I). Die Lichtquelle wird nunmehr so eingestellt, daß ihr reelles, vom Kondensator entworfenes Bild auf dem Spiegel erscheint. Man ersetzt dann den Spiegel durch ein Randstück einer Langspielplatte mit Mikrorille, das man als Reflexionsgitter verwendet. Wird das Randstück so in den Diapositivhalter geschoben, daß die Rillen annähernd parallel zum Spalt stehen, so erscheinen auf dem transparenten Schirm als Beugungsfigur schmale

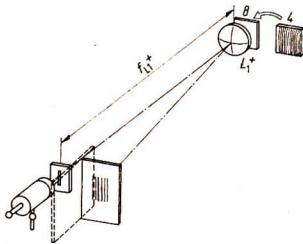


Abb. 2.2.11./1 Verwendung eines Stückes einer Langspielplatte als Reflexionsgitter

Spektren rechts und links des Spaltbildes. Durch Einschalten eines Farbfilters werden die Beugungstreifen einfarbig.

Variante b: Erzeugen eines Beugungsspektrums durch ein Reflexionsgitter — Verwenden eines gewölbten Bildschirms

Glühfadenlampe, Doppelkondensator, Spaltdrehblende, eine zweite Sammellinse und ein ebenes Reflexionsgitter werden auf einer optischen Bank angeordnet. Der Spalt steht in der Brennebene der Linse. Mit Hilfe des Kondensators wird das reelle Bild der Lichtquelle auf dem Reflexionsgitter entworfen. Das Gitter steht so dicht wie möglich hinter der Sammellinse. Bei dieser Einstellung und bei guter Justierung muß das reelle Bild des Spaltes genau auf dem Spalt liegen. Davon überzeugt man sich, indem man den Spalt zur Hälfte abdeckt. Über den Blendrahmen des Spaltes wird nunmehr der gewölbte, aus dünnem Aluminiumblech hergestellte und mit Zeichenkarton bezogene Schirm geschoben (Abb. 2.2.11./2).

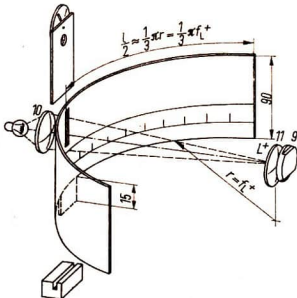


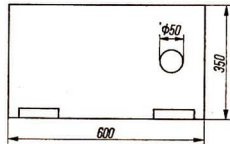
Abb. 2.2.11./2 Erzeugen eines Beugungsspektrums mit Hilfe des Reflexionsgitters

Der Krümmungsradius des Schirmes ist gleich der Brennweite der Sammellinse. Auf dem Schirm wird dann beiderseitig vom Spalt ein kontinuierliches Spektrum erzeugt. Ersetzt man die Glühfadenlampe durch eine andere lichtstarke Lichtquelle, so erhält man auf dem Schirm deren charakteristisches Spektrum.

Variante c: Erzeugen eines Beugungsspektrums durch ein Reflexionsgitter — Verwenden eines ebenen Bildschirms

Für die folgenden Versuche mit dem Reflexionsgitter ist nach Abbildung 2.2.11./3 ein Bildschirm anzufertigen. Eine Hartfaserplatte (600 mm \times 350 mm) wird mit einem kreisförmigen Ausschnitt versehen, mit weißem Papier beklebt und an je zwei beiderseits angeleimten Holzleisten aufgestellt. Das Reflexionsgitter hat ein sägezahnförmiges Profil, so daß die Interferenzbilder auf der einen Seite heller werden als auf der anderen. Der Schirm muß so angeordnet werden, daß man die helleren Bilder auffängt.

Abb. 2.2.11./3
Ebener Bildschirm für Versuche
mit einem Reflexionsgitter



1. Beugungsspektren des Sonnenlichtes

Nach Abbildung 2.2.11./4 läßt man Sonnenlicht durch den Spalt eines Heliostaten und durch den Ausschnitt im Bildschirm sowie durch eine Sammellinse auf das Reflexionsgitter fallen. Man arbeitet am besten mit senkrechtem Lichteinfall auf das Gitter und stellt diesen ein, indem man das Interferenzbild 0. Ordnung auf den Spalt des Heliostaten reflektiert. Es reicht über die Ränder des Ausschnittes im Bildschirm nach oben und unten hinaus. Die Sammellinse wird so eingestellt, daß dieses Bild des Spaltes auf dem Bildschirm scharf abgebildet wird.

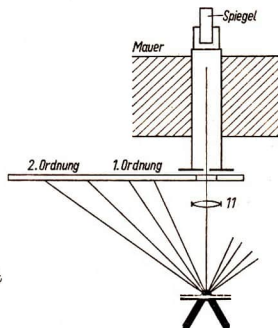


Abb. 2.2.11./4
Versuchsaufbau für Sonnenlicht

Auf dem Bildschirm sind bei kleiner Entfernung des Gitters die Interferenzspektren 1. und 2. Ordnung klar zu erkennen. Spektren höherer Ordnung lassen sich nicht mehr abbilden. Vergrößert man den Abstand des Gitters vom Bildschirm, so daß man nur noch das Spektrum 1. Ordnung auffängt, und stellt man den Spalt des

Heliostaten hinreichend schmal ein, so sind die Fraunhoferschen Absorptionslinien des Sonnenspektrums zu erkennen.

2. Kontinuierliche Spektren vom Licht der Glühlampen

Besonders einfach ist die Arbeit mit einem Kleinbildwerfer (Abb. 2.2.11./5a), in dessen Lichtschacht man eine Spaltblende (0,1 mm ... 0,2 mm) in Diaformat steckt.

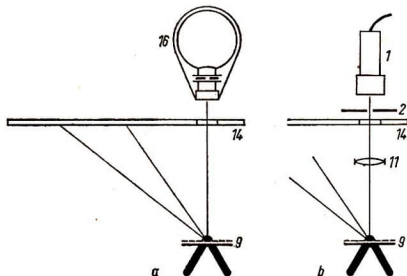


Abb. 2.2.11./5
Versuchsaufbau für Glühlicht
a) mit Bildwerfer,
b) mit Physikleuchte

Das Interferenzbild 0. Ordnung stellt man mit Hilfe des Objektivs des Bildwerfers auf dem Bildschirm scharf ein. An Stelle des Bildwerfers kann man eine Physikleuchte mit Kondensator, einen Spalt (0,1 mm ... 0,2 mm) und eine Abbildungslinse einsetzen (Abb. 2.2.11./5 b). Es werden die Spektren 1. und 2. Ordnung auf dem Bildschirm abgebildet. Beugungsspektren höherer Ordnung kann man objektiv schlecht wiedergeben.

3. Linien-Beugungsspektrum

Bei Verwendung einer Quecksilberdampfampe als Lichtquelle läßt sich ein kräftiges Linienspektrum demonstrieren. Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 2.2.11./5 b.

2.2.12. Ermittlung der Wellenlänge durch Beugung am Reflexionsgitter

Zu Versuch 1

1. Ebener Bildschirm © (s. V 2.2.11., Gerät 14.)
2. Schulgitter ($a \approx 1,5 \mu\text{m}$)
3. Kleinbildwerfer oder Physikleuchte mit Kondensator
4. Diapositiv mit Spalt
5. Meßstab

Zu Versuch 2

Geräte 1., 2., 5., wie bei 1, außerdem

6. Teslatransformator
7. Spektralröhren (He, Ne, H)

8. Spektralröhrenhalter ® (s. V 2.2.3.)

9. Linse ($f = +200 \text{ mm}$)

Versuch 1: Die Wellenlängen der Farben im kontinuierlichen Spektrum

Der Versuchsaufbau erfolgt nach V 2.2.11., Abbildung 2.2.11./5. Zur Berechnung vgl. Abbildung 2.2.12./1! Man mißt die Strecke s (Abstand des Beugungsbildes 0. Ordnung vom Farbstreifen im Spektrum 1. Ordnung) und die Strecke b (Abstand des Gitters vom Farbstreifen im Spektrum 1. Ordnung). Für die Gitterkonstante $a \approx 1,5 \mu\text{m}$ ergeben sich die Wellenlängen der verschiedenen Farbanteile des Spektrums in grober Näherung nach der Gleichung

$$\lambda = \frac{a \cdot s}{b}$$

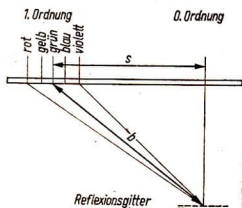


Abb. 2.2.12./1
Übersicht über die zu messenden Strecken

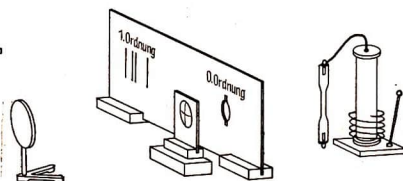


Abb. 2.2.12./2
Versuchsaufbau für Linienspektren

Versuch 2: Wellenlängen von Linienspektren

Zum Versuchsaufbau s. Abbildung 2.2.12./2. Als Lichtquellen werden Spektralröhren eingesetzt, die man am zweckmäßigsten mit einem Teslatransformator betreibt.

Bemerkungen

- Bei der objektiven Demonstration der Linien nach Versuch 2 läßt sich eine größere Helligkeit erzielen, wenn die Spektralröhren durch einen mit Wechselspannung erregten Funkeninduktor betrieben werden. Man informiere sich dazu in „Physikalische Schulversuche“, 11. Teil, V 4.1.1.
- Für Versuch 2 eignet sich sehr gut die Quecksilberdampf Lampe.

2.2.13. Beugung des Lichtes an einem Kreuz- oder Punktgitter

Zu Variante a

- Bildwerfer
- Lochblende (0,5 ... 1,0 mm) im Diaformat

3. fotografisch hergestellte Punkt- oder Kreuzgitter oder feines Seiden- oder Kunstfasergewebe
4. transparenter Schirm
5. Farbfilter
6. lange optische Bank mit Reitern

Zu Variante b

7. leichte Vogelfedern verschiedener Art
8. Diapositivdeckgläser
9. Kerze

Methodischer Hinweis

Der Versuch kann als Modellversuch vor der Behandlung der Lauediagramme eingesetzt werden.

Herstellen von Kreuz- oder Punktgittern

Nach dem in MB 2.0.2. angegebenen Verfahren werden Kreuz- oder Punktgitter fotografisch hergestellt. Es genügt aber auch, über das Loch (\varnothing 20 mm) des Blendrahmens ein feines Seiden- oder Kunstfasergewebe, möglichst in Leinenbindung, zu kleben. Ein Kreuzgitter kann leicht simuliert werden, indem 2 Strichgitter (SEG Optik, Nr. 2) gekreuzt übereinandergehalten werden.

Variante a: Objektive Beobachtung der Beugung

In den Lichtschacht des Bildwerfers steckt man die Lochblende mit einem Lochdurchmesser von 0,5 mm ... 1 mm. Mit Hilfe des Objektivs bildet man die Öffnung der Lochblende auf die mehrere Meter entfernte Projektionswand ab. Dicht hinter das Objektiv hält man das Kreuz- bzw. Punktgitter (Abb. 2.2.13./1). Auf dem

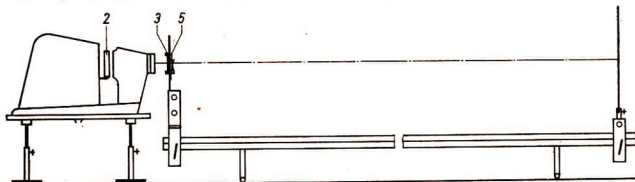


Abb. 2.2.13./1 Anordnung zur Demonstration der Beugung an Kreuz- oder Punktgittern

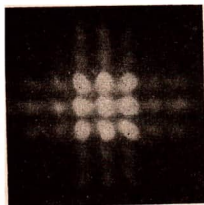


Abb. 2.2.13./2 Interferenzfigur bei der Beugung am Kreuzgitter

Schirm kann man die Beugungsfigur beobachten (Abb. 2.2.13./2). In den Strahlen-
gang kann noch ein Farfilter eingeschaltet werden.

Variante b: Subjektive Beobachtung der Beugung

Man kann die Beugungserscheinungen an Kreuzgittern auch in subjektiver Beobachtung an Vogelfedern wahrnehmen. Man legt ein Stück einer feinen Feder zwischen zwei Diapositivdeckgläser und umklebt die Ränder mit Papier. Blickt man im verdunkelten Zimmer durch die Federn auf eine brennende Kerze, so sieht man das Bild der Kerze, umgeben von einer Gruppe spektral gefärbter, zentralsymmetrisch angeordneter Beugungsbilder. Sie sind in 4 zähliger, seltener in 6 zähliger Symmetrie angeordnet und sind bis zur dritten, bisweilen bis zur fünften Ordnung zu erkennen. Die zu beobachtende Erscheinung ähnelt der Abbildung 2.2.13./2.

2.2.14. Beugung des Lichtes an einem schmalen Spalt [SE]

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A) oder Bildwerfer als Lichtquelle
2. Leuchtpalt – Spaltdrehblende (0,2 mm ... 0,4 mm)
3. Beugungsspalt (verstellbarer Spalt oder Spaltdrehblende)
4. transparenter Schirm
5. Farfilter
6. Meßstab oder Meßband
7. Meßschieber

Methodische Hinweise

1. Der Versuch gehört zu den Grundversuchen zum Nachweis der typischen Welleneigenschaften des Lichtes.
2. Vor diesem Versuch ist die Beugung von Wasserwellen am Spalt wiederholt zu demonstrieren.
3. Der Versuch ist als Schülerversuch in der Oberstufe geeignet.

Versuch

Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 2.2.14./1 zu ersehen.

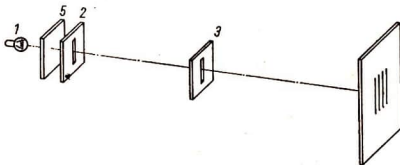


Abb. 2.2.14./1
Versuchsanordnung zur Beugung
des Lichtes an einem schmalen
Spalt

Der Abstand zwischen Leuchtpalt und Transparenzschirm sollte 2 m bis 3 m betragen. Der Beugungsspalt steht zunächst etwa in der Mitte zwischen Leuchtpalt und Schirm. Er kann dann bis auf 15 cm dem Leuchtpalt genähert werden. Ver-

ändert man die Breite des Beugungsspalt, so kann man damit ihren Einfluß auf den Streifenabstand demonstrieren. Durch Einschalten verschiedener Farbfilter läßt sich der Einfluß der Wellenlänge auf den Streifenabstand zeigen.

Soll mit dieser Versuchsanordnung die Wellenlänge des verwendeten Lichtes bestimmt werden, so muß man die Breite a des Beugungsspalt kennen. Gegebenenfalls muß sie auf mikroskopischem Wege bestimmt werden. Mit einem Meßstab oder Meßband mißt man die Entfernung e vom Beugungsspalt zum Bildschirm. Schließlich bestimmt man auf dem Bildschirm mit einem Meßschieber den Abstand s_n zwischen zwei symmetrisch zum zentralen Maximum gelegenen Interferenzstreifen n ter Ordnung.

Für Gebiete der Auslöschung gilt die Gleichung

$$\lambda = \frac{s_n \cdot a}{2 \cdot n \cdot e},$$

für Gebiete der Verstärkung

$$\lambda = \frac{s_n \cdot a}{(2n + 1) \cdot e}.$$

Bemerkung

An Stelle des verstellbaren Spalt oder der Spaltdrehblende können auch Spalte mit einer Breite von 0,1 mm, 0,2 mm und 0,3 mm verwendet werden, die man auf fotografischem Wege herstellt.

2.2.15. Beugung des Lichtes an einer kreisförmigen Öffnung

1. Kohlebogenlampe mit Widerstand
2. Kondensator
3. Lochdrehblende (0,3 mm ... 0,5 mm)
4. Linse ($f = +500$ mm)
5. transparenter Schirm
6. gut schließende Irisblende oder zweite Lochdrehblende
7. Farbfilter

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind für die Abiturstufe bestimmt.
2. Auch bei dieser einfachsten Form der Beugung treten Interferenzen bei Lichtwellen auf.
3. Vergleiche V 1.2.7.!

Versuch

Vor eine Kohlebogenlampe mit Kondensator wird die Lochdrehblende angeordnet. Mit der Sammellinse bildet man das Loch scharf auf den 3,5 m ... 4 m entfernten Schirm ab. Dicht hinter der Linse befindet sich die Irisblende oder eine zweite Lochdrehblende. In den Strahlengang kann noch ein Farbfilter eingeschaltet werden (Abb. 2.2.15./1). Schließt man die Irisblende, so kann man auf dem Schirm beobachten, daß bis zu einer bestimmten Öffnung zwar die Lichtstärke des Bild-

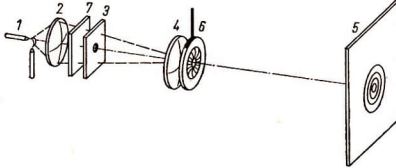


Abb. 2.2.15./1
Versuchsanordnung zur Beugung des Lichtes an einer kreisförmigen Öffnung

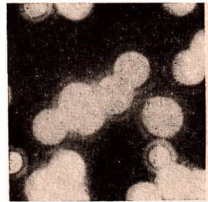


Abb. 2.2.15./2
Interferenzfigur bei der Beugung des Lichtes an kreisförmigen Öffnungen

punktes abnimmt, aber die Schärfe des Bildes erhalten bleibt. Erst wenn die Öffnung kleiner als die zentrale Fresnelsche Zone wird, beobachtet man die Beugungsfigur einer kreisförmigen Öffnung auf dem transparenten Schirm (Abb. 2.2.15./2). Diese Bedingung ist erfüllt, wenn

$$\frac{d}{2} = \sqrt{\lambda \cdot \frac{p \cdot q}{p + q}},$$

wobei p die Entfernung der beiden Lochblenden voneinander, q die Entfernung der Irisblende vom Schirm, λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und d der Durchmesser der beugenden Öffnung sind.

Bemerkungen

1. Die Beugungsfigur ist meist sehr lichtschwach; will man Maxima bis zu größeren Ordnungszahlen beobachten, so eignet sich nur die Anwendung eines fotografischen Registrierungsverfahrens. Man ersetzt den transparenten Schirm durch eine Spiegelreflexkamera ohne Objektiv. Die Belichtungszeiten muß man durch Probieren ermitteln.
2. Die Abbildung 2.2.15./2 ist so entstanden, daß nicht eine Lochblende als leuchtender Gegenstand verwendet wurde, sondern viele Löcher. Zu diesem Zweck sticht man mit einer Nadel ungeordnet viele Löcher in eine dünne Metallfolie, rahmt die fertige Folie wie ein Diapositiv und ersetzt durch sie die einfache Lochblende.
3. Der Versuch kann auch in subjektiver Beobachtung vorgenommen werden. Mit Hilfe der Sammellinse wird das durch die Blende tretende Licht parallel gemacht. In die optische Achse fluchtet man ein auf Unendlich eingestelltes Fernrohr ein. Setzt man dicht vor das Objektiv eine Irisblende oder eine zweite Lochdrehblende, so kann man, wenn die obengenannte Bedingung erfüllt ist, die Beugungsfigur im Fernrohr sehen.

2.2.16. Beugung des Lichtes am Schirmrand

1. Kohlebogenlampe mit Vorwiderstand
2. Leuchtpalt (Spaltdrehblende oder verstellbarer Spalt)

3. Schirm mit scharfem Rand [®],
dazu erforderliches Material:
rechteckige Tafel (190 mm × 90 mm) aus Hartpapier oder
Sperrholz mit kreisrunder Öffnung
(\varnothing 30 mm)
Rasierklinge
Alleskleber
4. 2 ebene, oberflächenversilberte Spiegel auf Stiel
5. transparenter Schirm
6. Farbfilter

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 2.2.15.!

Versuch

An der einen Schmalseite eines langen Experimentiertisches werden mit je einer Tischklemme eine Kohlebogenlampe und daneben ein Planspiegel auf Stiel befestigt.

Den zweiten Planspiegel und den transparenten Schirm ordnet man an der anderen Schmalseite des Tisches an (Abb. 2.2.16./1). Man justiert den Strahlengang so, daß

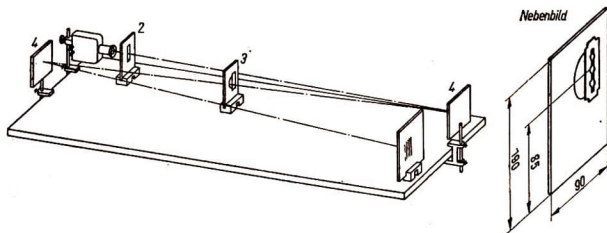


Abb. 2.2.16./1 Versuchsanordnung zur Beugung des Lichtes am Schirmrand; Nebenbild: Blendrahmen mit Rasierklinge

das Licht zweimal über den Experimentiertisch gespiegelt wird und zuletzt den Schirm trifft. Wenige Zentimeter hinter die Lichtquelle stellt man den Leuchtspalt auf. Die Spaltbreite (0,2 mm ... 0,3 mm) stellt man so ein, daß noch keine Beugungsfigur auf dem Schirm zu beobachten ist. In die Mitte des Strahlenganges bringt

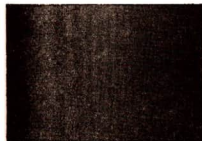


Abb. 2.2.16./2 Beugungsfigur hinter einem Schirmrand

man den beugenden Schirmrand (Nebenbild zu Abb. 2.2.16./1). Man kann ihn aus einem Blendrahmen mit einem Loch, das zur Hälfte mit einer Rasierklinge abgedeckt ist, leicht selbst herstellen. Auf dem transparenten Schirm beobachtet man dann eine mehrfarbige Beugungsfigur. Durch das Einschalten eines Farbfilters in den Strahlengang wird diese Beugungsfigur einfarbig (Abb. 2.2.16./2).

Bemerkungen

1. Da die Beugungsfigur am Schirmrand von der Randkrümmung nahezu unabhängig ist, kann man an Stelle der Rasierklinge auch den Rand eines Blendrahmens verwenden oder einen Stativstab in den Strahlengang bringen.
2. Stehen oberflächenversilberte Planspiegel nicht zur Verfügung, kann der Versuch auch ohne diese ausgeführt werden. Man wählt den Abstand zwischen Leuchtpalt und Transparenzschirm möglichst groß, damit die Interferenzstreifen deutlich sichtbar werden.

2.3. Polarisation von Lichtwellen — Elektro- und magneto-optische Effekte

2.3.1. Nachweis der Polarisierbarkeit von Licht

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. Lochblende (5 mm)
3. Kondensorlinse ($f = +120$ mm)
4. Polarisationsfilter in Blendrahmen, drehbar angeordnet
5. quaderförmiger Glastrog
6. wäßrige Lösung ©
7. optische Bank mit Reitern
8. Schirm

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist zur Einführung der Polarisation von Licht in Arbeitsgemeinschaften und im fakultativen Unterricht der Abiturstufe geeignet.
2. Der Versuch erbringt den Nachweis, daß für das Licht das Modell der Transversalwellen angemessen ist.
3. Vor diesem Versuch sollte man die Polarisation mechanischer Wellen demonstrieren.

Versuch

Die Geräte werden nach Abbildung 2.3.1./1 auf einer optischen Bank angeordnet. Mit dem Kondensator wird das Licht parallel gerichtet. Danach wird durch eine Lochblende (5 mm) ein Lichtbündel begrenzt. Das Lichtbündel läuft durch die Lösung und trifft auf den Bildschirm. Herstellung der Lösung: 400 ml Wasser, 1 Messerspitze NaCl, 1 Eiweiß von einem Hühner, umrühren und filtrieren. Durch Streuung wird der Verlauf des Lichtbündels innerhalb der Lösung für einen großen Beobachterkreis sichtbar.

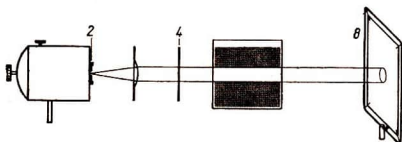


Abb. 2.3.1./1
Versuchsanordnung
zum Nachweis der Polarisier-
barkeit des Lichtes

Im linear polarisierten Licht erfolgt aber nur dann eine Streuung, wenn das Licht senkrecht zur Beobachtungsrichtung schwingt.

Fällt die Schwingungsrichtung mit der Beobachtungsrichtung zusammen, so erfolgt keine Streuung. Dreht man den Polarisator langsam um 360° , so wird das Lichtbündel im Glastrog zweimal sichtbar und verschwindet zweimal. Auf dem hinter dem Glastrog angeordneten Bildschirm ist der Lichtfleck stets mit gleicher Intensität zu erkennen.

Bemerkung

Gut geeignet ist auch alkoholische Mastixlösung. Wasser, das durch wenige Tropfen Milch schwach getrübt und filtriert wurde, ist ebenfalls brauchbar.

2.3.2. Nachweis der Polarisation des Lichtes durch einen Analysator [SE]

Zu Variante a

1. Physikleuchte mit Kondensator und Transformator
2. 3 Polarisationsfilter
3. transparenter Schirm

Zu Variante b

- Geräte 1. und 2. (nur ein Filter), außerdem
4. Polarisationsprisma oder Polarisationskegel ⑤

Zu Variante c

- Gerät 2., außerdem
5. Mehrfach-Diapositivhalter (SEG Optik)

Methodische Hinweise

1. Es werden mehrere Verfahren zur Herstellung von Analysatoren beschrieben.
2. Die Herstellung könnten Arbeitsgemeinschaften übernehmen.
3. Die Versuche sind als Einführungsversuche geeignet.

Variante a: Nachweis der Polarisation mit einem Polarisationsfilter als Analysator

Der Kondensator der Physikleuchte wird so eingestellt, daß ein paralleles Lichtbündel entsteht. Dicht hinter die Physikleuchte bringt man ein Polarisationsfilter als *Polarisator* in den Strahlengang. Man stellt es so ein, daß das polarisierte Licht in

einer vertikalen Ebene schwingt. In den Strahlengang bringt man ein zweites Filter als *Analysator* und schließlich einen Transparenzschirm (Abb. 2.3.2./1). Stimmen die Durchlaßrichtungen von Polarisator und Analysator überein, so ist auf dem Bildschirm ein Lichtfleck zu sehen. Dreht man den Analysator langsam, dann wird der Lichtfleck allmählich dunkler. Bei einer Drehung um 90° wird das Licht nahezu völlig ausgelöscht.

Durch ein drittes Polarisationsfilter, das man zwischen zwei um 90° gekreuzte Polarisationsfilter bringt, kann der Durchgang einer Komponente des Lichts erreicht werden. Dieser Teilversuch erleichtert später das Verständnis der Versuche zur Spannungsdoppelbrechung und zur optischen Aktivität.

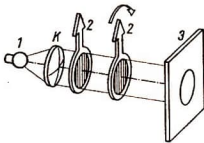


Abb. 2.3.2./1 Versuchsanordnung mit einem Polarisationsfilter als Analysator

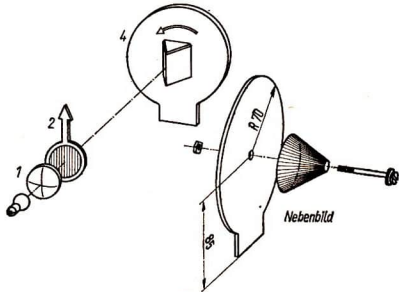


Abb. 2.3.2./2 Versuchsanordnung mit einem Polarisationsprisma als Analysator

Variante b: Nachweis der Polarisation mit einem Polarisationsprisma als Analysator

Aus der oben beschriebenen Versuchsanordnung entfernt man das zweite Polarisationsfilter und den Transparenzschirm und bringt dafür ein Polarisationsprisma in den Strahlengang (Abb. 2.3.2./2). Das Prisma besteht aus Schwarzglas und ist auf einem mattweißen Schirm drehbar gelagert. Es ist so beschaffen, daß das Licht unter einem Einfallswinkel von 56° auf die Prismenflächen trifft. Stellt man das Polarisationsprisma so, daß seine Vorderkante in der Schwingungsebene des polarisierten Lichtes liegt, dann wird das Licht von den Prismenflächen reflektiert, und auf dem Schirm sind neben diesen Flächen Aufhellungen zu sehen. Dreht man das Prisma um 90° , so daß die Prismenkante senkrecht zur Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes steht, so erfolgt keine Reflexion.

Verfügt man nicht über ein Polarisationsprisma, so kann man statt dessen leicht einen Polarisationskegel herstellen. Das Abtropfrohr eines Glasrichters wird abgeschnitten, der Trichter innen berußt und mit Hilfe einer langen Schraube auf einem mattweiß bestrichenen Schirm befestigt (Abb. 2.3.2./2, Nebenbild). Der Polarisationskegel braucht nicht gedreht zu werden. Die Reflexion erfolgt nur senkrecht zur Schwingungsebene des polarisierten Lichtes.

Variante c: Freihandversuch zum Nachweis der Polarisation

Die beiden Polarisationsfilter werden in einem Mehrfach-Diapositivhalter hintereinander eingeschoben. Blickt man durch die Anordnung gegen das Tageslicht oder gegen eine gut beleuchtete weiße Fläche, so kann man durch Drehen des Analysators auf Helligkeit oder Dunkelheit einstellen. An den Markierungen auf den Polarisationsfiltern kann man den Winkel der beiden Polarisationsrichtungen abschätzen.

Bemerkungen

1. In Variante a kann man den Transparentschirm auch durch ein Selen-Fotoelement ersetzen, das man an ein Demonstrations-Mikroamperemeter anschließt. Die vom Meßgerät angezeigte Stromstärke ist dann ein Maß für die Intensität des Lichtes.
2. Will man in Variante a auf dem Bildschirm einen größeren Lichtfleck zur Demonstration verwenden, so stellt man mit dem Kondensator ein konvergentes Lichtbündel her und bildet den Polarisator mit einer Sammellinse ($f = 200$ mm) auf dem Transparentschirm ab. Den Analysator stellt man dicht vor oder hinter die Linse.
3. Statt des Polarisationsprismas kann man als Analysator auch eine Polarisationspyramide verwenden.

2.3.3. Polarisation des Lichtes durch Reflexion und Brechung [SE]

Zu Variante a

1. Physikleuchte mit Glühfadenlampe
(6 V; 30 W) und Kondensator,
Spaltblende (2 mm bis
3 mm) und Transformator
2. Polarisationsfilter
3. runde optische Scheibe
4. halbzylindrischer Glaskörper
5. kurze optische Bank mit Reitern

Zu Variante b

- Geräte 1. bis 5., außerdem ein zweites Polarisationsfilter und
6. 2 transparente Schirme

Methodischer Hinweis

Aus dem Versuch kann das Brewstersche Gesetz hergeleitet werden.

Variante a: Reflexion und Brechung von linear polarisiertem Licht

Eine Physikleuchte mit Kondensator und Spaltblende, ein Polarisationsfilter und eine vertikal aufgestellte runde optische Scheibe werden auf einer kurzen optischen

Bank angeordnet (Abb. 2.3.3./1). An der optischen Scheibe wird der halbrunde Glaskörper an einen der beiden senkrecht aufeinanderstehenden Durchmesser der Scheibe ausgerichtet und festgeklemt. Die optische Scheibe wird etwas schräg in den Strahlengang gestellt, so daß das vom Kondensator parallel gerichtete schmale Lichtbündel die Scheibe streift und genau in ihrem Mittelpunkt auf den Glaskörper trifft.

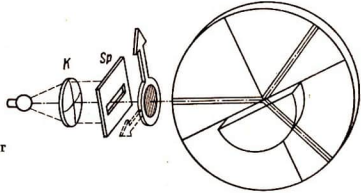


Abb. 2.3.3./1
Versuchsanordnung zur
Demonstration der Reflexion und der
Brechung linear polarisierten Lichtes

1. Teilversuch

Das polarisierte Licht schwingt in der Einfallsebene; der Polarisator ist auf vertikale Durchlaßrichtung gestellt.

Dreht man die optische Scheibe so, daß der Einfallswinkel des linear polarisierten Lichtes von 0° bis 90° anwächst, so beobachtet man, daß die Intensität der Lichtspur des reflektierten Strahlenbündels während der Drehung allmählich abnimmt, bei einem Einfallswinkel von $56,5^\circ$ ganz verschwindet und bei Überschreiten dieses Winkels wieder zunimmt. Das gebrochene Lichtbündel ist während der ganzen Drehung sichtbar.

2. Teilversuch

Das polarisierte Licht schwingt senkrecht zur Einfallsebene; der Polarisator ist auf horizontale Durchlaßrichtung gestellt. Läßt man durch Drehen der optischen Scheibe den Einfallswinkel von $0^\circ \dots 90^\circ$ anwachsen, so bleibt während der ganzen Drehung das reflektierte Lichtbündel sichtbar, während die Intensität des gebrochenen Lichtes bei dem gleichen Winkel von $56,5^\circ$ wie beim ersten Versuch ein Minimum zeigt.

3. Teilversuch

Die optische Scheibe steht so, daß der Einfallswinkel $56,5^\circ$ beträgt. Dies ist der Polarisationswinkel für Glas mit der Brechzahl $n = 1,5$. Dreht man den Polarisator von der lotrechten in die waagerechte Durchlaßrichtung, so verschwindet das gebrochene Lichtbündel, dagegen wird das reflektierte sichtbar. Markiert man die Richtung des reflektierten und des gebrochenen Strahles auf der optischen Scheibe, so kann man feststellen, daß beide Lichtbündel, das reflektierte und das gebrochene, rechtwinklig aufeinanderstehen (Brewstersches Gesetz).

Variante b: Polarisation des Lichtes durch Reflexion und Brechung

Die Versuchsanordnung unterscheidet sich von Variante a dadurch, daß der Polarisator weggelassen ist. Außerdem wird die optische Scheibe mit dem Glaskörper

in eine waagerechte Lage gebracht (Abb. 2.3.3./2). Der Spalt steht lotrecht. Man stellt auf den Polarisationswinkel $\alpha_p = 56,5^\circ$ ein. Auf zwei transparenten Schirmen fängt man sowohl das reflektierte als auch das gebrochene Licht auf. Stellt man nun vor die Schirme Polarisationsfilter als Analytoren, so erkennt man, dass der reflektierte Anteil des vorher unpolarisierten Lichtes senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist, der gebrochene Teil dagegen vorwiegend in der Einfallsebene schwingt. Wählt man einen anderen Einfallswinkel, so stellt man nur eine teilweise lineare Polarisation des reflektierten und des gebrochenen Anteils fest.

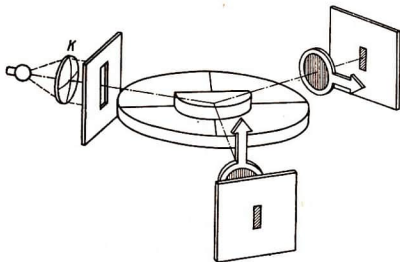


Abb. 2.3.3./2
Analyse des reflektierten und des gebrochenen Anteils des Lichtes, das unter dem Polarisationswinkel auf Glas fällt

2.3.4. Polarisation durch Doppelbrechung

Zu Variante a

1. Physikleuchte mit Kondensor
2. dickes, natürliches, rhomboedrisches Kalkspatstück
3. Kunststoffprismenstück, durchbohrt
4. Gummiringe
5. Polarisationsfilter
6. transparenter Schirm
7. kurze optische Bank mit Reitern
8. Gummischlauch

Zu Variante b

- Geräte 2. und 5., außerdem
9. bedrucktes Papier

Methodischer Hinweis

Die Doppelbrechung kann im fakultativen Unterricht der Abiturstufe behandelt werden. Man kann hier zeigen, daß die beiden Strahlengänge hinter dem Kristall senkrecht zueinander polarisiert sind.

Variante a: Doppelbrechung des Lichtes und Polarisation durch Doppelbrechung

Auf eine kurze optische Bank setzt man eine Physikleuchte, deren Licht man mit Hilfe des Kondensors parallel richtet. Dahinter befestigt man auf einem Rundfuß

mittels einer Stabhülse und einem kurzen Stativstab einen Kunststoffprismen-
tisch, den man vorher mit einer 2 mm-Bohrung in seiner Drehachse versehen hat.
Der Prismen-tisch soll sich in der Stabhülse mit leichter Reibung drehen; am Her-
ausfallen wird er durch ein kurzes Stück Gummischlauch gehindert. Man justiert
dieses Gerät so ein, daß das Licht durch die Bohrung fällt. Mit Gummiringen be-
festigt man nach Abbildung 2.3.4./1a das Kalkspatstück auf dem Prismen-
tisch. Dahinter stellt man den transparenten Schirm auf (Abb. 2.2.4./1b). Auf dem
Schirm kann man zwei, wenige Millimeter voneinander entfernte Lichtflecke beob-
achten, die durch die Doppelbrechung im Kalkspat hervorgerufen worden sind.
Beide haben gleiche Helligkeit.

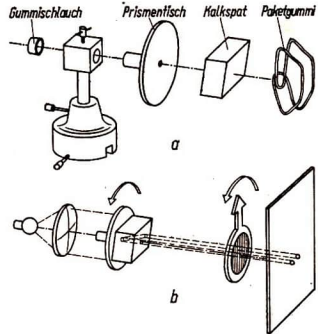


Abb. 2.3.4./1
Polarisation
durch Doppelbrechung:
a) Befestigung des Kalkspatstückes,
b) Versuchsanordnung

Dreht man den Prismen-tisch und damit den Kristall langsam um 360° , so bleibt bei guter Justierung ein Lichtfleck an seiner Stelle auf dem Schirm stehen. Er wird durch den ordentlichen Strahl hervorgerufen. Der zweite, zum außerordentlichen Strahl gehörige, beschreibt hingegen eine Kreisbewegung um den ersten Lichtfleck. Bringt man zwischen Kristall und Schirm ein Polarisationsfilter als Analytator und dreht dieses langsam, so verschwindet abwechselnd der vom ordentlichen und der vom außerordentlichen Strahl herrührende Lichtfleck; beide Strahlenbündel erweisen sich als senkrecht zueinander polarisiert.

Variante b: Freihandversuch zur Doppelbrechung und Polarisation durch Doppelbrechung

Auf ein bedrucktes Papier legt man ein Kalkspatkristall. Blickt man durch den Kristall auf die Unterlage, so erkennt man die Druckbuchstaben doppelt. Bringt man zwischen Auge und Kristall ein Polarisationsfilter und dreht dieses langsam, so verschwindet abwechselnd das durch die ordentliche und durch die außerordentliche Brechung hervorgerufene Bild der Druckbuchstaben. Es ist leicht festzustellen, daß die Polarisationsrichtungen von ordentlicher und außerordentlicher Brechung senkrecht aufeinanderstehen.

Bemerkung

Der Versuch kann auch als Schülerexperiment ausgeführt werden. Man setzt in den Mehrfach-Diapositivhalter (SEG Optik) der Reihe nach eine geschwärzte Diapositivplatte, in die man eine dünne Kreislinie eingeritzt hat, als Objekt, eine dünne Kalkspatplatte, ein Polarisationsfilter und eine Sammellinse als Lupe.

2.3.5. Chromatische Polarisation

1. Physikleuchte mit Kondensator und Transformator
2. 2 Polarisationsfilter
3. Linse ($f = +200$ mm)
4. doppelbrechende Kristallpräparate, wie Kalkspat, Quarz, Gips, Glimmer (parallel zur optischen Achse geschnitten)
5. transparenter Schirm
6. optische Bank mit Reitern
7. verschiedene Zellglaspräparate als Diapositive gerahmt ⊗, dazu erforderliches Material:
Zellophanfolie (Einmach-Zellglas)
Diapositivdeckgläser
Klebstreifen
8. Natriumthiosulfat
9. 2 Deckgläser

Methodischer Hinweis

Es wird das Prinzip des Polarisationsmikroskops erläutert.

Versuch

Bringt man zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren doppelbrechende Kristalle, so erfolgt eine farbige Aufhellung des Gesichtsfeldes. Dreht man dabei den Analysator um 360° , so tritt eine mehrmalige Farbänderung auf, ohne daß das Gesichtsfeld wieder vollständig dunkel wird.

Hinter die Physikleuchte mit Kondensator bringt man ein Polarisationsfilter, dicht dahinter das Kristallpräparat. Mit einer Sammellinse bildet man dieses vergrößert auf einem transparenten Schirm oder auf einer Projektionsfläche scharf ab (Abb. 2.3.5./1).

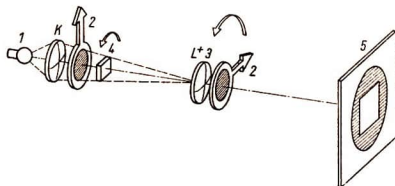


Abb. 2.3.5./1
Versuchsanordnung
zur Demonstration der chromatischen Polarisation

Der Kondensator wird so eingestellt, daß das Bild der Lichtquelle auf der Linse entsteht. Dicht vor oder hinter die Linse bringt man ein zweites, zum ersten gekreuztes Polarisationsfilter als Analysator in den Strahlengang. Untersucht man ein doppelbrechendes Kristallpräparat, etwa ein nicht senkrecht zur optischen Achse geschnittenes Quarz- oder Kalkspatstück, eine Glimmerscheibe oder ein Gipsblättchen, so hellt sich das Gesichtsfeld farbig auf. Dreht man bei unveränderter Polarisator- und Analysatorstellung das Kristallpräparat, so ändert sich die Farbe nicht, wohl aber die Leuchtkraft. Bei einer bestimmten Stellung ist die Sättigung der Farbe am größten; wenn die Schwingungsrichtungen des Polarisators und des Kristalls einen Winkel von 45° einschließen. Wechselt man das Präparat gegen ein dickeres oder ein dünneres aus oder setzt man beim Verwenden von Glimmerblättchen mehrere gleich dicke Blättchen hintereinander, so ändert sich lediglich die Farbe der Erscheinung. Uebene Präparate zeigen entsprechend ihrer Dicke an jedem Ort eine andere Farbe.

Sehr interessant ist die Vorführung des folgenden Versuches:

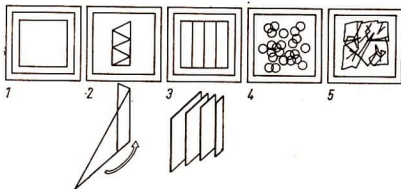
Man bringt zwischen zwei Objektträger einige Kristalle von Natriumthiosulfat; durch Befächeln mit dem Bunsenbrenner schmilzt man sie. Die zwischen den Deckgläsern befindliche Schmelze hält man zwischen den Polarisator und den Analysator. Durch Abkühlen kristallisiert das Salz langsam wieder aus. Diesen Vorgang kann man, verbunden mit prächtigen Farberscheinungen, nach kurzer Wartezeit beobachten.

An Stelle der Kristallpräparate kann man auch solche aus Zellglas (Zellophanfolie) — am einfachsten aus Einmach-Zellglas — verwenden. Auch Folien aus Polystyrol sind geeignet. Durch den Verarbeitungsprozeß erhalten nämlich die Zellulosemoleküle eine Vorzugsrichtung; die Folien werden dadurch doppelbrechend (Stäbchendoppelbrechung). Die Zellglaspräparate werden wie Diapositive zwischen Deckgläsern gerahmt. Abbildung 2.3.5./2 zeigt einige Möglichkeiten für die Anordnung und die Herstellung solcher Präparate.

Abb. 2.3.5./2

Verschiedene Zellglaspräparate:

1. Zellglasfolie,
2. Zellglasdreieck, mehrfach gefaltet,
3. Zellglasfolien mit unterschiedlicher Schichtdicke,
4. Zellglasscheibchen (Locher), ungeordnet,
5. Zellglasfolie, zerknüllt



Mit ihnen kann man die Abhängigkeit der Farberscheinung von der Dicke der doppelbrechenden Schicht zeigen, ebenso die mehrfarbigen Erscheinungen bei Präparaten mit verschiedener Schichtdicke.

Bemerkungen

1. Zur Projektion der oben beschriebenen Farberscheinungen im polarisierten Licht kann man auch einen Kleinbildprojektor verwenden. In den Lichtschacht des Projektors bringt man ein Polarisationsfilter und das doppelbrechende Präparat und stellt das zweite Filter dicht vor dem Objektiv auf.

2. Die Versuche können für subjektive Beobachtung auch mit einem Mehrfach-Diapositivhalter ausgeführt werden.

2.3.6. Elektrische Doppelbrechung — Kerr-Effekt

1. Natriumdampflampe mit Drossel oder Physikleuchte mit Blaufilter
2. transparenter Schirm
3. 2 Polarisationsfilter
4. schmale Kuvette
5. Kondensatorbleche $\text{\textcircled{S}}$,
dazu erforderliches Material:
2 Streifen aus dünnem Messing- oder Kupferblech
2 Telefonbuchsen
6. Spule (750/1500 Wdg.)
7. 2 Spulen (15000 Wdg.)
8. 2 U-Kerne, geblättert
9. Grundbrett mit Spannvorrichtung
10. kurze optische Bank mit Reitern
11. Nitrobenzol, chemisch rein
12. Schalter, zweipolig

Methodische Hinweise

1. Die Kerr-Zelle ist einer der ältesten elektro-optischen Umsetzer. Sie wurde zur Aufnahme der Tonspuren auf Tonfilmen in Sprossenschrift verwendet.
2. Man kann dazu ein Stück Tonfilm mit dem Tageslichtschreibprojektor zeigen.
3. Der Versuch zeigt den elektrischen Charakter der Lichtwellen.

Versuch

Der Versuchsaufbau und Einzelheiten für die Herstellung der Kondensatorplatten sind aus der Abbildung 2.3.6./1 zu ersehen.

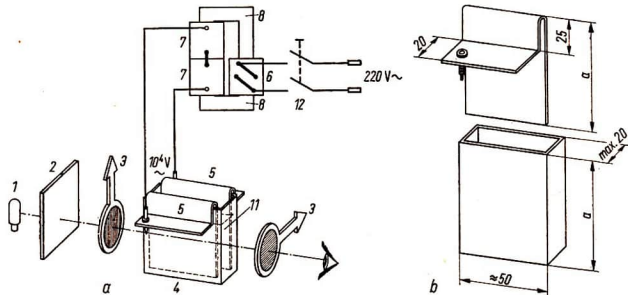


Abb. 2.3.6./1 Versuchsanordnung zur Demonstration des Kerr-Effektes;
a) Versuchsaufbau, b) Kuvette und Kondensatorplatte

Statt der Natriumdampflampe kann zur Beleuchtung des Transparenzschirms auch blaues Licht verwendet werden. Die Küvette wird mit chemisch reinem Nitrobenzol gefüllt. (Vorsicht! Siehe Bemerkung 1!) Aus den beiden U-Kernen und den Spulen wird ein Transformator zusammengesetzt, der primär 750 Wdg. und sekundär 30000 Wdg. enthält. Zwei Spulen zu 15000 Wdg. sind in Reihe geschaltet. Primärseitig erfolgt über einen Schalter der Anschluß an das Wechselstromnetz 220 V. Die Sekundärspannung in der Größenordnung bis zu 10^4 V wird an die beiden Kondensatorplatten gelegt (Abb. 2.3.6./1). (Vorsicht! Siehe Bemerkung 2!) Bei ausgeschaltetem Stromkreis wird durch Drehen des Analysators auf Dunkelheit eingestellt. Der Beobachter blickt durch die Küvette über den Analysator und den Polarisator gegen den beleuchteten transparenten Schirm. Schließt man nunmehr kurzzeitig den Primärstromkreis, so wird das Gesichtsfeld merklich aufgehellt. Die Aufhellung verschwindet beim Unterbrechen des Stromkreises.

Bemerkungen

1. Das Arbeiten mit Nitrobenzol erfordert größte Vorsicht; denn schon wenige Tropfen, auf die ungeschützte Haut gebracht, können zu Hautschädigungen führen.
Auch Dämpfe von Nitrobenzol sind gesundheitsschädigend.
2. Nach dem Anlegen der Spannung dürfen spannungsführende Teile, insbesondere solche des Sekundärkreises, auf keinen Fall berührt werden. Lebensgefahr!

2.3.7. Interferenz im konvergenten, polarisierten Licht

1. Kohlebogenlampe mit Kondensator oder Physikleuchte mit Kondensator und Transformator
2. Linse ($f = +50$ mm)
3. Kalkspat- oder Quarzscheibe (etwa 2 mm bis 3 mm dick), senkrecht zur optischen Achse geschnitten
4. Polarisationsfilter
5. Projektionswand oder transparenter Schirm
6. optische Bank mit Reitern

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuch

Das Licht einer Kohlebogenlampe wird mit Hilfe des Kondensators parallel gerichtet. Dicht hinter dem Kondensator bringt man in das parallele Lichtbündel ein Polarisationsfilter und eine kurzbrennweitige Sammellinse. In der Brennebene der Linse, im Konvergenzpunkt des polarisierten Lichtbündels, ordnet man eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Kalkspat- oder Quarzplatte an. Bringt man in den wieder divergent gewordenen Lichtkegel ein zum ersten gekreuztes, zweites Polarisationsfilter als Analysator, so beobachtet man auf dem Projektionsschirm, der einige Meter entfernt stehen kann, eine farbige Interferenzfigur (Abb. 2.3.7./1).

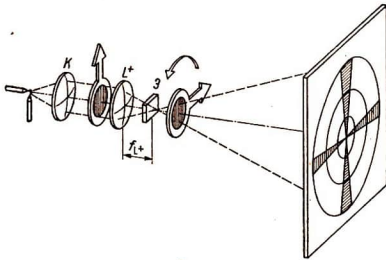


Abb. 2.3.7./1
Versuchsanordnung zur Demonstration der Interferenz im konvergenten, polarisiertem Licht

2.3.8. Drehung der Polarisationsebene durch eine Quarzplatte

1. Physikleuchte mit Kondensator und Transformator
2. 2 Polarisationsfilter
3. Linse ($f = +200$ mm)
4. 2 Quarzplatten, senkrecht zur optischen Achse geschnitten, 1 mm dick, rechtsdrehend
5. transparenter Schirm
6. Quarzplatten, linksdrehend
7. optische Bank mit Reitern
8. Farfilter (rot, grün, blau)

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt wie im Versuch 2.3.5. (vgl. Abb. 2.3.5./1). An Stelle des Kristallpräparates verwendet man eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Quarzplatte. Zusätzlich ordnet man zwischen Kondensator und Polarisator ein Rotfilter an. Vor dem Einbringen der Quarzplatte stellt man den Analysator auf Dunkelheit. Bringt man den Quarz in den Strahlengang, so hellt sich das Gesichtsfeld auf, der Analysator muß um etwa 18° nachgedreht werden, um wieder Dunkelheit zu erreichen. Verdoppelt man die Schichtdicke des Quarzes durch Einbringen einer zweiten, gleichartigen Quarzplatte, so erfolgt die Verdunkelung erst bei einem Drehwinkel von etwa 36° . Er ist also der Schichtdicke proportional. Das Drehvermögen je Millimeter Schichtdicke eines kristallinen Stoffes nennt man spezifische Drehung.

Um die Abhängigkeit der spezifischen Drehung von der Lichtwellenlänge vorzuführen, tauscht man bei unveränderter Plattendicke das Rotfilter gegen ein Grünfilter und anschließend gegen ein Blaufilter aus. Man beobachtet, daß mit kleiner werdender Wellenlänge die Drehung zunimmt. Sie ist bei 1 mm Schichtdicke für rotes Licht etwa 18° , für grünes etwa 27° und für blaues etwa 33° .

Verwendet man das ungefilterte weiße Licht der Glühlampe, so erscheinen statt der Auslöschung bei der Drehung des Analysators der Reihe nach die Farben grün, blau, rot, gelbrot und gelb. Ersetzt man den Rechtsquarz durch einen Linksquarz, so kann man zeigen, daß man den Analysator in entgegengesetztem Sinn drehen muß, um die gleichen Effekte zu erzielen.

2.3.9. Drehung der Polarisationssebene durch Zuckerlösung [SE]

1. Physikleuchte mit Kondensator und Transformator
2. 2 Polarisationsfilter
3. Linse ($f = +200$ mm)
4. quaderförmige Glasküvette
5. transparenter Schirm
6. Rotfilter
7. verschiedene Zuckerlösungen (25 g, 50 g, und 70 g Rohrzucker in 100 ml Lösung)
8. optische Bank mit Reitern

Methodische Hinweise

1. Der Versuch klärt die Wirkungsweise der Polarimeter in Medizin und Industrie.
2. Der Versuch ist als Praktikumsversuch geeignet.

Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach der Abbildung 2.3.9./1. Nachdem mit dem Analysator auf Dunkelheit eingestellt wurde, füllt man die Küvette mit der Zuckerlösung geringster Konzentration. Das Gesichtsfeld hellt sich auf; der Analysator

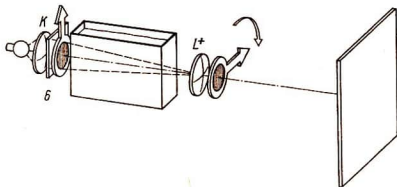


Abb. 2.3.9./1
Versuchsanordnung zum Nachweis der Drehung der Polarisationssebene in Zuckerlösung

muß um einen bestimmten Winkel gedreht werden, damit wieder Dunkelheit eintritt. Füllt man die Küvette nacheinander mit den Lösungen höherer Konzentration, so vergrößert sich mit der Konzentration jeweils auch der erforderliche Drehwinkel des Analysators.

Stellt man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Abhängigkeit des Drehwinkels von der Konzentration der Zuckerlösung grafisch dar, so kann man an Hand dieses Diagrammes die Konzentration einer Lösung der gleichen Zuckerart ermitteln.

Es gilt $\alpha \sim C$, für $d = \text{konstant}$.

Dabei bedeuten:

α = Drehwinkel, C = Konzentration, d = Schichtdicke der Lösung.

Soll die Abhängigkeit des Drehwinkels von der Schichtdicke demonstriert werden, so stellt man mehrere gleiche Küvetten in den Strahlengang und füllt sie nacheinander mit Zuckerlösung gleicher Konzentration.

Es ergibt sich:

$$\alpha \sim d, \quad \text{für } C = \text{konstant.}$$

Beide Proportionalitäten zusammengefaßt, führt zu

$$\alpha \sim C \cdot d,$$

als Gleichung gilt dann

$$K = \frac{\alpha}{C \cdot d}, \quad K = \text{spezifisches Drehvermögen.}$$

Bemerkungen

1. Will man die Drehung der Polarisations Ebene in der Lösung selbst veranschaulichen, dann verwendet man ein möglichst langes Glasgefäß und setzt der Zuckerlösung einige Tropfen alkoholischer Mastixlösung zu. Durch die Streuung des polarisierten Lichtes an den Mastixteilchen erhält man den optischen Eindruck einer Schraubenwendel im Gefäß. Ein geeignetes Gefäß kann man aus einem Glasrohr, zwei durchbohrten Gummistopfen und zwei passend gedrehten Piacrilscheiben herstellen (Abb. 2.3.9./2).

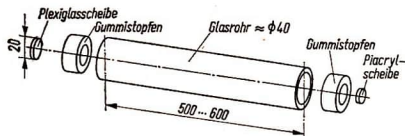


Abb. 2.3.9./2 Einzelteile zur Anfertigung eines Gefäßes für Versuche zur Demonstration der Drehung der Polarisations Ebene durch Zuckerlösung

2. Verwendet man nacheinander Lösungen von Traubenzucker (Dextrose) und Fruchtzucker (Lävulose), läßt sich zeigen, daß die Schwingungsebene des Lichtes nach rechts oder nach links gedreht werden kann.
3. Zur subjektiven Beobachtung eignet sich der Mehrfach-Diapositivhalter. Zwischen zwei Polarisationsfilter setzt man in die breite Rille des Halters eine kleine Küvette mit Zuckerlösung.

2.3.10. Magnetische Drehung der Polarisations Ebene — Faraday-Effekt

1. Natriumdampfampe mit Drossel oder notfalls Physikleuchte und blaues Farbfilter
2. Stromversorgungsggerät (30 V—)
3. transparenter Schirm
4. 2 Polarisationsfilter
5. 2 Spulen (500 Wdg.)

6. U-Kern, geblättert
7. 2 durchbohrte Polschuhe $\text{\textcircled{R}}$,
dazu erforderliches Material:
2 Weicheisenklötze ($30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$)
2 Eisenstifte (Länge 20 mm , $\varnothing 6 \text{ mm}$)
8. Küvette (25 mm breit)
9. Schwefelkohlenstoff, chem. rein oder an Stelle von 8. und 9. Glaswürfel (Kantenlänge 25 mm) oder 20 mm dicke Piacrilscheibe
10. einpoliger Schalter

Methodischer Hinweis

Es handelt sich hier um den einzigen Versuch zum Nachweis des magnetischen Charakters der Lichtwellen, der mit schulischen Mitteln ausgeführt werden kann.

Versuch

Die Rückseite eines transparenten Schirmes wird mit dem monochromatischen Licht einer Natriumdampflampe bestrahlt. Vor dem Schirm steht ein Polarisationsfilter. Das linear polarisierte Licht durchdringt anschließend die Längsbohrungen der beiden Polschuhe des Elektromagneten und gelangt dann zum Analysator. Der Elektromagnet besteht aus einem U-Kern mit zwei Spulen von 500 Wdg. Die Polschuhe stellt man aus Weicheisen nach den Angaben der Abbildung 2.3.10./1 her. Der Elektromagnet wird über einen einpoligen Schalter an eine Gleichspannung von etwa 30 V gelegt (Abb. 2.3.10./2). Dabei werden die Spulen stark überlastet; es empfiehlt sich deshalb, den Strom nur kurzfristig einzuschalten.

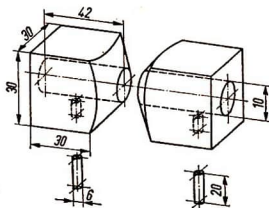


Abb. 2.3.10./1 Durchbohrte Polschuhe

Blickt man durch die gekreuzten Polarisatoren gegen die Lichtquelle, so bleibt das Gesichtsfeld auch dann dunkel, wenn der Stromkreis des Elektromagneten geschlossen ist. Setzt man dagegen eine mit Schwefelkohlenstoff gefüllte Küvette zwischen die Polschuhe des Magneten, so beobachtet man nach dem Einschalten eine Aufhellung des vorher dunklen Gesichtsfeldes. Durch Nachdrehen des Analysators kann wieder auf Dunkelheit eingestellt werden. Beim Verwenden von Glühlicht gelingt der Versuch wegen der Abhängigkeit der spezifischen Drehung von der Lichtwellenlänge nicht.

Die Küvette mit Schwefelkohlenstoff kann durch einen Glaswürfel oder einen aus Objektträgern zusammengesetzten Glasplattensatz oder auch durch eine dicke Piacrilscheibe ersetzt werden. Auch dann erfolgt im Magnetfeld eine Drehung der Polarisationssebene.

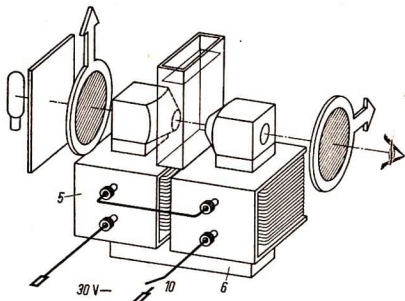


Abb. 2.3.10./2
Versuchsanordnung zum Nachweis des Faraday-Effektes

Bemerkungen

1. Zur objektiven Demonstration des Effektes ist eine starke Lichtquelle erforderlich (Quecksilberdampf- oder Kohlebogenlampe mit Farbfilter). Der Versuchsaufbau ist aus der Abbildung 2.3.10./3 ersichtlich.

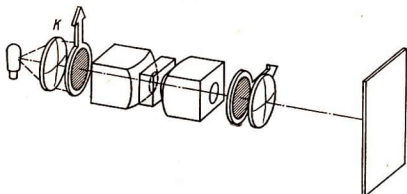


Abb. 2.3.10./3
Versuchsanordnung zur objektiven Vorführung des Faraday-Effektes

2. Der Versuch gelingt auch ohne durchbohrte Polschuhe, wenn man eine große Küvette an Stelle des Jochs auf die beiden Schenkel des U-Kerns stellt. Wegen des stark inhomogenen Magnetfeldes tritt der Effekt jedoch nur dicht über dem Boden des Gefäßes auf.

2.3.11. Versuche zur Spannungsdoppelbrechung [SE]

1. Große Optikleuchte (12 V; 50 W) mit Stromversorgungsgerät (0 ... 20 V; 4 A)
2. große Kondensorlinse (plankonvex, $f = +120$ mm)
3. 2 Polarisationsfilter
4. verschiedene Körper aus Kunststoff zur Demonstration der Spannungsdoppelbrechung \otimes , schnell gekühlte Gläser, gespritzte, durchsichtige Kunststoffstücke

5. Spannvorrichtung \otimes auf kurzem Stativstab mit M8-Gewinde,
dazu erforderliches Material:
großer, kräftiger Metallring
3 lange Rändelschrauben M 6
2 kurze Schrauben M 6
6. Linse ($f = +250$ mm)
7. großer, transparenter Schirm oder Projektionswand
8. optische Bank mit Reitern

Methodische Hinweise

1. Die Schüler sollen hier das Verfahren kennenlernen, mit dem in der Industrie die zweckmäßigsten Formen von Werkstücken gesucht werden.
2. Die wesentlichen Geräte zum Versuch sind im SEG Wellenoptik vorhanden.

Herstellung von Körpern zur Demonstration der Spannungsdoppelbrechung

Man stellt verschieden geformte Körper aus einem durchsichtigen Kunststoff her, die man in eine Spannvorrichtung einspannen und der Einwirkung von Druckkräften aussetzen kann. Als Kunststoffe eignen sich besonders gut Phenolharze, Epoxydharze und Polyesterharze in Plattenform. Solche Platten kann man zwischen zwei Glasplatten gießen. Man setzt Harz und Härter in einem Verhältnis an, daß die Härtung, und zwar ganz gleich ob Warm- oder Kältehärtung, nur sehr langsam erfolgt, damit die Platten möglichst spannungsfrei entstehen. Gegossene und gehärtete Epoxydharzplatten kann man durch nachfolgende Erwärmung und ganz langsame Abkühlung im Trockenschrank vollständig spannungsfrei erhalten. Weniger gut geeignet sind Körper aus Platten von Piacryl, Zelluloid oder Polystyrol. Diese Stoffe zeigen bei Belastung zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren keine Isochromaten, sondern lediglich die neutrale Faser.

Die spannungsoptischen Bilder, die man erhält, sind um so besser, je dicker das Material ist, aus dem man die Körper herstellt. Für Zwecke der Schulphysik genügen Plattendicken von 5 mm ... 10 mm. Vorschläge für Formen der zur Demonstration der Spannungsdoppelbrechung dienenden Körper zeigt Abbildung 2.3.11./1. An einigen Körpern lassen sich dabei direkt Beispiele für die technische Anwendung der Spannungsdoppelbrechung als fotoelastisches Prüfverfahren vorführen.

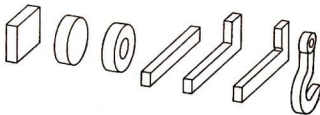


Abb. 2.3.11./1 Körper aus durchsichtigem, spannungsdoppelbrechendem Kunststoff

Herstellung der Spannvorrichtung

Zur Belastung müssen die Körper in eine Spannvorrichtung eingesetzt werden. Eine Universalvorrichtung stellt man nach den Angaben von Abbildung 2.3.11./2 aus einem dicken Metallring her. Der Innendurchmesser des Ringes soll dabei mindestens die Größe der freien Öffnung der Kondensorlinse haben. Mit Hilfe eines kurzen Stativstabes mit M 8-Gewindeansatz wird die Spannvorrichtung gehalten.

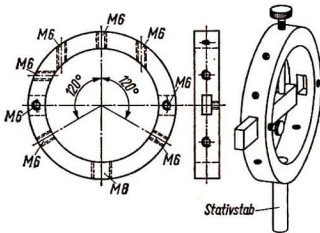


Abb. 2.3.11./2 Spannvorrichtung für Versuche zur Spannungsdoppelbrechung

Versuche zur Spannungsdoppelbrechung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach der Abbildung 2.3.11./3. Mit Hilfe der Sammellinse wird auf der Projektionswand oder auf einem großen transparenten Schirm das vergrößerte, reelle Bild des doppelbrechenden Körpers scharf abgebildet. Das von der Kondensorlinse (Planseite zur Lichtquelle) entworfene reelle Bild der Lichtquelle liegt dabei in der als Objektiv wirkenden Sammellinse. Der Polarisator steht so, daß er eine volle Ausleuchtung der Kondensorlinse ermöglicht; der Analysator wird dicht hinter der Sammellinse angeordnet.

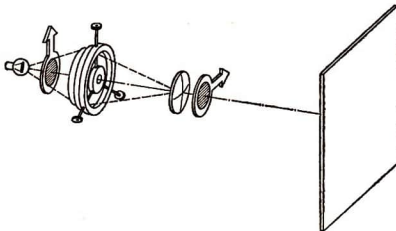
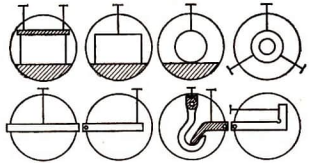


Abb. 2.3.11./3 Versuchsanordnung zur Demonstration der Spannungsdoppelbrechung

Polarisator und Analysator werden in gekreuzte Stellung gebracht. Das Gesichtsfeld erscheint dunkel, lediglich die Umrissse des eingespannten, aber noch nicht belasteten Kunststoffkörpers sind sichtbar. Man beginnt zweckmäßig mit einem Kunststoffquader. Läßt man eine oder mehrere Druckkräfte auf den doppelbrechenden Körper wirken, so erscheinen in der Projektion die Isochromaten. Lage und Dichte dieser Linien geben Aufschluß über den Spannungsverlauf im Körper. Bei Steigerung der Druckkräfte nimmt die Anzahl der Linien zu. Dreht man den Polarisator und den Analysator gleichsinnig um den gleichen Winkelbetrag, so entstehen neue Kurvenscharen.

Durch Einspannen und Belasten anderer Kunststoffkörper, beispielsweise einer Kreisscheibe, einer Kreisringscheibe, eines Winkels mit und ohne Kehlbohrung, eines Kranhakens, und Deuten der Spannungsbilder läßt sich überzeugend die Bedeutung des fotoelastischen Prüfverfahrens für die Lösung konstruktiver Aufgaben im Maschinenbau demonstrieren (Abb. 2.3.11./4).

Abb. 2.3.11./4 Beispiele für das Einspannen der Kunststoffkörper



Bringt man an Stelle der Kunststoffkörper schnell gekühlte Glasstücke, etwa dickes Fensterglas, Auto-Sicherheitsglas, Flaschenglas, Glastränen, Bologneser Fläschchen usw., in den Strahlengang, so kann man „eingefrorene“ Spannungen vorführen. Ähnliche Bilder erhält man, wenn man Stücke durchsichtiger, thermoplastisch verformter oder gespritzter, spannungsdoppelbrechender Kunststoffe in den Strahlengang bringt.

3. Hertzische Wellen

3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. Zur Durchführung von Versuchen zu diesem Stoffgebiet stehen den Schulen verschiedene Gerätesätze zur Verfügung, die von der Unterrichtsmittelindustrie entwickelt wurden oder aber im Selbstbau entstanden. Dabei zeichnet sich in den letzten Jahren eine rasche Weiterentwicklung der Unterrichtsmittel ab.

Für die Versuche zur Elektrizitätslehre stehen die bewährten Aufbausätze aus Einzelteilen zur Verfügung, deren Teile bei den Versuchen zu den Hertzischen Wellen mitbenutzt werden.

Für die Untersuchungen von Schwingungen und Wellen sind besondere Hochfrequenzlehrmittelsätze entwickelt worden, wie der EMB Hochfrequenzsatz, der auf größeren Schaltplatten eine vorgegebene Verdrahtung besitzt. Nach Auflegen entsprechender Schablonen werden Schaltelemente und Brückenstecker eingesetzt, so daß ein Versuchsaufbau entsteht, der weitgehend den gezeichneten Schaltbildern entspricht. So ermöglichen diese Gerätesätze einen schnellen und übersichtlichen Aufbau. Die Variationsmöglichkeiten sind dagegen erheblich eingeschränkt. Nahezu jeder Versuch erfordert eine andere Schablone. Durch Selbstanfertigung neuer Schablonen und einiger Schaltelemente kann man die vom Hersteller gebotenen Möglichkeiten wesentlich erweitern. Dabei kommt man aber durch die vorgegebene Verdrahtung der Schaltplatten leicht zu methodisch ungünstigen Versuchsanordnungen. Durch die Einbeziehung von Schaltelementen aus den Aufbausätzen für Elektrizitätslehre kann man weitere Variationsmöglichkeiten schaffen.

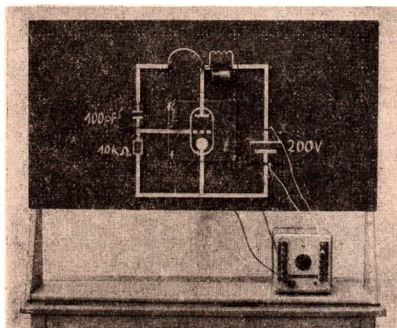


Abb. 3.0.0./1
Vertikaldemonstrationstafel
mit Buchsenplatte (Selbstbau)

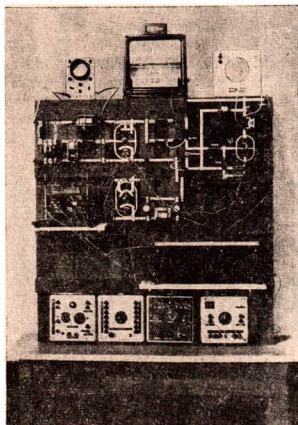


Abb. 3.0.0./2 Vertikaldemonstrationstafel mit Einschubmöglichkeiten (Selbstbau). Der umfangreiche Versuchsaufbau soll zeigen, wie hier Teile älterer Aufbausätze zu verwenden sind.

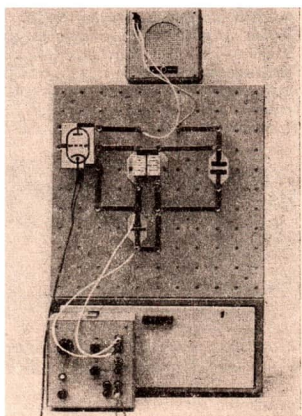


Abb. 3.0.0./3 Tafelschaltgerät des VEB Labormöbelwerke Apolda

Die neueren Entwicklungen zielen auf universell zu verwendende Vertikaldemonstrationstafeln hin, an denen in übersichtlicher Weise Versuche zur allgemeinen Elektrizitätslehre und zur Hochfrequenztechnik aufgebaut werden können. Das allgemeine Merkmal der verschiedenartigen Entwicklungen in dieser Richtung ist die große Variationsmöglichkeit und die gute Übersichtlichkeit aller Versuchsanordnungen. Die Tafeln tragen dabei meist in einer quadratischen Gitteranordnung Buchsen mit einer Verdrahtung oder Bohrungen zum Einstecken von Buchsen oder Federklemmen für Schaltpunkte (Abb. 3.0.0./1). Andere Tafeln haben Einschubmöglichkeiten für vorverdrahtete Schaltplatten mit Buchsen (Abb. 3.0.0./2). Die Leitungsführung erfolgt im allgemeinen durch farbige Blechstreifen, die Verbindung und das Einsetzen der Schaltelemente durch Verschrauben mit Meßklemmen, durch Federklemmen oder durch Stecker. Die Schaltelemente liegen dabei teils offen sichtbar, teils sind sie durch Platten mit den Schaltzeichen abgedeckt. In jedem Fall entstehen Versuchsaufbauten, die der Anordnung im gezeichneten Schaltplan entsprechen, ja, die zum Teil den gezeichneten Schaltplan vollständig ersetzen.

In Abbildung 3.0.0./3 ist das vom VEB Labormöbelwerke Apolda gefertigte Tafelschaltgerät gezeigt. Es wurde schon in den Teilen 6 und 9 der „Physikalischen Schulversuche“ für Experimente der Elektrizitätslehre verwendet. Im Teil 9 sind in den Abschnitten 4.0.4. und 5.0.4. Adapter für Teile des SEG und Zusatzteile

beschrieben, die auch hier für die Versuche auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik erforderlich sind. Im Abschnitt 3.0.5. werden weitere Adapter beschrieben. Für die Versuche zur Hochfrequenztechnik ist das SEG Elektrik durch das SEG Halbleiter- und Hochfrequenztechnik (HH) erweitert worden. Einzelne verdrahtete Schaltbretter lassen sich zu größeren Schaltflächen zusammensetzen und werden durch eingesteckte Schaltelemente und Brückenstecker zu den verschiedenartigen Versuchsaufbauten zusammengefügt. Entsprechend der Arbeitsweise bei Schülerexperimenten liegen die Versuchsanordnungen in der Horizontalebene (Abb. 3.0.0./4).

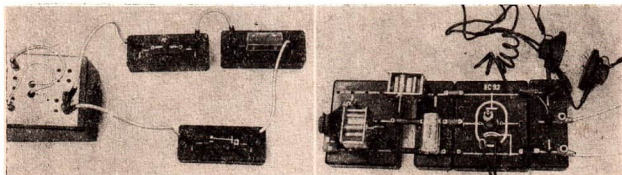


Abb. 3.0.0./4 a) Aufbau eines Stromkreises, b) Aufbau einer Audionschaltung mit den Teilen der SEG Elektrik und Halbleiter-Hochfrequenz

An Schulen, die nicht über den EMB Hochfrequenzsatz verfügen, sollten die Teile der SEG Elektrik und Halbleiter-Hochfrequenz auch für die Demonstrationen verwendet werden. Eine vertikale Anordnung ist mit Hilfe von Stativmaterial, mit mehrstufigen Teppenaufsätzen oder durch das Anbringen an Hafttafeln durch Bekleben der Grundbretter mit magnetischen Materialien zu erreichen. Für die Arbeit in den Arbeitsgemeinschaften und im fakultativen Unterricht sind neben dem SEG-HH die Baukästen Elektronik des VEB Polytronik geeignet. Hier werden die Schaltelemente mechanisch auf einer Grundplatte mit einem Lochraster gehalten. Die Verbindung erfolgt an Stiften mit Hilfe von Klemmen an Verbindungsleitern (Abb. 3.0.0./5 a, b).

Die Versuche zu elektrischen Schwingungen und Hertzischen Wellen sind besonders dazu geeignet, mit den neuen Geräten aufgebaut zu werden. Da zur Zeit neben neuen Geräten auch noch viele ältere Gerätesätze in den Schulen benutzt werden, sind in

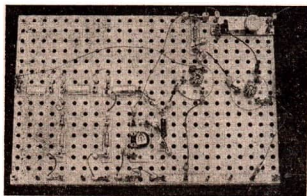


Abb. 3.0.0./5a
Aufbau mit Teilen des Elektronik-
baukastens, Stufe V

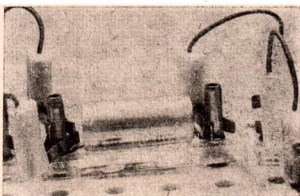


Abb. 3.0.0./5b
Verbindungen einzelner Bauteile vom
Elektronikbaukasten, Stufe V

allen Versuchen zu diesem Stoffgebiet keine Anweisungen für die Benutzung bestimmter Gerätesätze gegeben. Die Versuchsanordnungen werden durch die Schaltpläne dargestellt. Der Aufbau mit den verschiedenen Gerätesätzen bleibt jedem Lehrer nach den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln überlassen. Aufbaumöglichkeiten mit dem EMB-Satz werden bei den Versuchsbeschreibungen ohne nähere Beschreibung in den Abbildungen gezeigt. Die Herstellung zusätzlicher Schablonen wird in MB 3.0.5. erläutert. Bestimmte Typen von Elektronenröhren und Transistoren werden nur dort angegeben, wo ihre Verwendung für den Versuch von ausschlaggebender Bedeutung ist. Für die meisten Versuche kann man mit den verschiedensten Typen die notwendigen Ergebnisse erzielen. Es ist jedoch darauf zu achten, daß der Anodenstrom und der Kollektorstrom die zulässigen Höchstwerte nicht überschreiten. Röhren sind in dieser Beziehung weniger empfindlich als Transistoren. Man wählt eine entsprechende Höchstspannung oder setzt in den Stromkreis einen entsprechenden Begrenzungswiderstand ein. Da es nur wenige zweckentsprechende Röhrentrioden gibt, werden bei Schulversuchen häufig Pentoden verwendet, die zu Trioden umgeschaltet werden, indem g_3 mit Katode und g_2 mit Anode verbunden werden.

In älteren Gerätesätzen hat sich die EF 12 in dieser Schaltung bewährt. In neueren Gerätesätzen arbeitet man mit der EL 83 oder EF 80 in gleicher Weise. Auch die Triode EC 92 liefert gute Versuchsergebnisse.

Tabelle der gebräuchlichsten Röhren

Typ	$\frac{U_{a \max}}{V}$	$J_{a \max}$ mA	$\frac{P_{\max}}{W}$
EF 12	300	10	1,5
EF 80	300	15	2,5
EL 83	300	70	9
EC 92	300	15	2,5

Die meisten Schulversuche mit Transistoren lassen sich mit den preisgünstigen Bastlertransistoren ausführen, die nicht exakt typisiert sind. Sie werden als NF- oder HF-Transistoren angegeben und sollen Transistoren mittlerer Leistung ($P = 200 \text{ mW}$) sein.

3.0.1. Als Voraussetzung zur Abstrahlung von Hertzschen Wellen ist es notwendig, hochfrequente elektrische Schwingungen zu erzeugen. Da die Erzeugung von niederfrequenten Schwingungen prinzipiell mit den gleichen Schaltungen wie bei hochfrequenten Schwingungen erfolgt und da tonfrequente Schwingungen häufig als Modell für hochfrequente Schwingungen benutzt werden, sind alle Versuche zur Erzeugung elektrischer Schwingungen im Abschnitt 3.1. zusammengefaßt.

Bei den verschiedenen Schaltungen wurde auf Feinheiten, wie sie in technischen Schaltungen üblich sind, weitgehend verzichtet, um mit wenigen Schaltelementen übersichtlich das Wesentliche der Schaltungen zu demonstrieren. So wird in Röhren- und Transistorschaltungen kein Wert auf eine genaue Anpassung an die Kenndaten gelegt.

Alle Versuchsanordnungen, in denen HF-Schwingungen auftreten, sind im Sinne der Gesetzgebung als funkstörende HF-Anlagen zu betrachten. Dementsprechend sind die gesetzlichen Bestimmungen der Funk-Entstörungsordnung (Gesetzblatt

der DDR II vom 6. 4. 1967, Nr. 28) und des DDR-Standards TGL 20885 Blatt 5, Funk-Entstörung vom Dezember 1971, unbedingt zu beachten. Der Sinn dieser Bestimmungen liegt darin, daß Störungen des Funkempfangs vermieden oder auf ein Minimum herabgemindert werden.

Nach der Funk-Entstörungsordnung sind *alle* Geräte und Aufbausätze, mit denen die Erzeugung von HF-Schwingungen möglich ist, genehmigungs- und anmeldepflichtig. Für die industriell gefertigten Lehrmittel dieser Art liegen die Genehmigungen nach einer Typenprüfung durch das Ministerium für Post- und Fernmeldewesen vor. Jede Schule ist aber verpflichtet, ihre Geräte bei der zuständigen Bezirksdirektion der Deutschen Post anzumelden. Für alle Geräte und Aufbausätze, die im Selbstbau gefertigt werden sollen, ist eine Genehmigung über die Bezirksdirektion der Deutschen Post zu beantragen. Die Fertigstellung des Gerätes ist dann dort zu melden, und das Gerät darf nach einer Überprüfung und Erteilung der Genehmigung betrieben werden.

Für die Versuchsanordnungen zur Erzeugung von HF-Schwingungen sind die Grenzwerte der Funk-Störspannungen und Funk-Störfeldstärken nach den Kurven aus Bild 1 und 2 der TGL 20885, Blatt 5, zu entnehmen.

Sender für die Fernsteuerung von Modellen unterliegen den Bestimmungen der Landfunkordnung des Post- und Fernmeldegesetzes. Die zulässigen Grenzwerte für Ober- und Nebenwellen sind aus der Landfunkordnung zu entnehmen.

Falls eine Anlage in einer Stunde weniger als 5 Kurzstörungen mit einer Dauer von weniger als 2 s erzeugt, so unterliegt die Amplitude keiner Begrenzung, unabhängig von der Frequenz.

Die Genehmigungs- und Anmeldepflicht ist unabhängig von der Einhaltung dieser Grenzwerte.

Aus diesen Bestimmungen ergibt sich für den praktischen Betrieb in den Schulen, daß mit genehmigten und angemeldeten Geräten Röhren- und Transistorgeneratoren für alle HF-Bereiche aufgebaut werden können, wenn keine Antenne für die Abstrahlung angeschlossen wird und die Speisespannungen nicht höher gewählt werden, als es für den Nachweis der Schwingungen in unmittelbarer Nähe des Generators notwendig ist. Es ist auch ohne weiteres statthaft, die Schwingungen zu modulieren, aber es darf kein Nachrichtenaustausch erfolgen. Die Generatoren dürfen nur für die Frequenzbereiche aufgebaut werden, die gemäß Versuchsanleitung hierzu vorgesehen sind bzw. für die eine Genehmigung der Bezirksdirektion der Deutschen Post vorliegt.

Besondere Beachtung ist den Versuchen mit UHF-Schwingungen zu widmen. Bei der Arbeit mit Dipolen werden die zulässigen Grenzwerte sehr leicht überschritten, wenn man Glüh- oder Glimmlampen zum Leuchten bringen will. Darum sollte man es bevorzugen, die Schwingungen bei möglichst kleiner Leistung des Generators mit Germaniumdioden und empfindlichen Meßgeräten nachzuweisen. Beim Selbstbau von UHF-Generatoren sollte man sich auf die Frequenz von 433,92 MHz orientieren. Mit der hier zulässigen Leistung ist es möglich, auf Lecherleitungen und in Dipolen in unmittelbarer Nähe des Generators Glühlampen (3,8 V; 0,07 A) zum Leuchten zu bringen. Um Glimmlampen zu zünden, kann man unter den angegebenen Bedingungen für eine Kurzstörung vorübergehend die Anodenspannung erhöhen.

Es ist unbedingt notwendig, die Schüler im Unterricht auf die gesetzlichen Bestimmungen hinzuweisen, da sie auf Grundlage der Versuche im Unterricht mit verhältnismäßig einfachen Mitteln unzulässige HF-Anlagen basteln könnten.

Dem Versuch 3.1.1. kann man zweckmäßig eine einfache Kondensatorentladung über einen Ohmschen Widerstand voranschicken.

Aus den beiden Versuchen (V 3.1.1. und 3.1.2.) kann man schon qualitativ die Abhängigkeit der Frequenz von Induktivität und Kapazität herleiten. Der Versuch 3.1.4. gibt dann am Spezialfall mit einer Erregung durch Wechselstrom von 50 Hz die Möglichkeit, die Thomsonsche Schwingungsgleichung herzuleiten und damit die quantitativen Zusammenhänge zu erfassen. Die Verallgemeinerung auf andere Frequenzen muß daraus deduktiv entwickelt werden. Falls man induktiv vorgehen will, müßte man die Versuchsanordnung nach V 3.1.4. mit einer Anordnung nach V 3.1.14. kombinieren, um den Schwingkreis mit verschiedenen Frequenzen erregen zu können.

V 3.1.5. lehnt sich eng an V 3.1.4. an und zeigt für den Spezialfall mit Netzfrequenz die Kopplungsmöglichkeiten von Schwingkreisen, von denen besonders die induktive und die kapazitive Kopplung in den folgenden Versuchen häufig eingesetzt werden. Darum muß im Unterricht die Kopplung frühzeitig erläutert werden. Sie kann dann mit später folgenden Versuchen für andere Frequenzbereiche gezeigt werden.

Im Physikunterricht der allgemeinbildenden Schule ist es wichtig, das Grundprinzip der Erzeugung elektrischer Schwingungen zu demonstrieren und sich nicht in technischen Einzelheiten zu verlieren. Die Versuchsbeschreibungen sind so gehalten, daß nach dem gleichen Schaltplan durch Auswechseln der Schaltelemente Schwingungen unterhalb des Tonbereiches, im Tonfrequenzbereich und im Hochfrequenzbereich erzeugt werden können. Möglichkeiten zur Erzeugung von Ultraschwingungen folgen im Abschnitt 3.2. In V 3.1.11. sind eine Reihe von Nachweismöglichkeiten für hochfrequente Schwingungen zusammengefaßt, die in den vorangehenden Versuchen eingesetzt werden können. Bei der Durchführung der Versuche sollte man wenigstens einmal demonstrieren, daß beim Einschalten im Schwingkreis eine Einschalterschwingung entsteht, indem man die Rückkopplungsleitung zum Gitter der Röhre bzw. zur Basis des Transistors unterbricht und so die Betriebsspannung einschaltet. An der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung ist besonders leicht zu zeigen, daß bei richtiger Polung der Rückkopplungsspule durch die phasenrichtige Energiezufuhr eine Aufschaukelung der Einschalterschwingung zu einer ungedämpften Schwingung erfolgt, während eine falsche Polung der Rückkopplungsspule eine unmittelbare völlige Dämpfung der Schwingung auslöst.

Durch V 3.1.12. wird der Begriff „Kopplung“ wieder aufgegriffen und vertieft behandelt, indem die Resonanz quantitativ erfaßt wird. Da die Resonanz Voraussetzung für das Verständnis der Schwingungsgeneratoren ist, sollte man daran denken, eine Resonanzkurve schon früher, etwa mit V 3.1.4., wenigstens qualitativ darzustellen. Dort ist es aber nur möglich, zu zeigen, daß bei einem Minimum an Energiezufuhr ein maximaler Schwingkreisstrom fließt, da man die Abstimmung des Schwingkreises durch Verschieben des Eisenkerns nicht quantitativ erfassen kann. Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit des Nachweises der Frequenzabhängigkeit des kapazitiven und des induktiven Widerstandes nach der Bemerkung 2 zu V 3.1.13., da man hier mit sinusförmigem Wechselstrom arbeiten kann, was nach den Versuchsbeschreibungen im 9. Teil der „Physikalischen Schulversuche“, Abschnitt 4.2., nicht möglich ist.

In den Versuchen von V 3.1.15. ab werden einige andere Schaltungen aufgenommen, die allein für Arbeitsgemeinschaften bestimmt sind.

Der Schmitt-Trigger, der monostabile und der bistabile Multivibrator dienen zwar nicht der Erzeugung von Schwingungen; die Multivibratoren stehen jedoch alle in

einem engen Zusammenhang, so daß sie nur hintereinander behandelt werden können. Der Schmitt-Trigger dient als Schwellwertschalter, aber auch als Impulsformer, um den rechteckförmigen Verlauf von Schwingungen wiederherzustellen.

3.0.2. Im zweiten Abschnitt sind die Versuche zur Abstrahlung und zum Nachweis der Vorgänge bei der Ausbreitung Hertzscher Wellen zusammengefaßt. Auch bei diesen Versuchen sind die in 3.0.1. gegebenen Hinweise auf die gesetzlichen Bestimmungen zu beachten. Die Versuche sind am besten mit Wellenlängen im UHF-Bereich auszuführen. In der ersten Gruppe der Versuchsanleitungen wird mit einem UHF-Röhrengenerator gearbeitet, der im Selbstbau herzustellen ist. Die gleichen Versuche können mit Generatoren aus Aufbauteilen ausgeführt werden, jedoch wird dabei die Wellenlänge leicht unzuweckmäßig groß. In V 3.2.1. bis 3.2.3. werden zunächst Aufbau und Betrieb des Generators besprochen sowie die Abstrahlung von Wellen und der Einfluß verschiedener Medien auf die Ausbreitung gezeigt. Aufbau und Wirkungsweise des Generators sind aus der Dreipunktschaltung nach V 3.1.9. mit verkleinerter Induktivität und Kapazität zu erklären.

In den folgenden drei Versuchen sind Schwingungsvorgänge in Form von elektromagnetischen stehenden Wellen auf der Lecherleitung und in Dipolen zu untersuchen. Der Wert dieser Versuche liegt besonders in der Veranschaulichung der Verknüpfung elektrischer und magnetischer Wechselfelder in der elektromagnetischen Welle. Außerdem bieten sie die Möglichkeit einer angenäherten Bestimmung der Wellenlänge. Während in diesen Versuchen die Wellenvorgänge noch unmittelbar an Leiter gebunden sind, zeigt V 3.2.7. die freien Wellen im Raum, die vom Sendedipol abgestrahlt werden. Die einzelnen Teilversuche geben den Schülern eine direkte Veranschaulichung des materiellen Charakters der elektromagnetischen Wellen, indem ihre wichtigsten Ausbreitungseigenschaften und der mit ihnen verbundene Energietransport gezeigt werden. Wenn auch bei der zulässigen Leistung des Generators am Empfangsdipol meist mit Germaniumdiode und Meßgerät gearbeitet wird, sollte man auf jeden Fall auch zeigen, daß wenigstens in unmittelbarer Nähe des Senders noch so viel Energie einfällt, um eine Glühlampe im Empfangsdipol aufleuchten zu lassen.

Die letzte Versuchsgruppe ist besonders interessant. Hier werden mit modernen Mitteln die Originalversuche von *Heinrich Hertz* nachgestaltet. Entsprechend der Resonanzbedingung kurzer Dipole erhält man Wellen mit sehr kleiner Wellenlänge aus den Schwingungen einer sehr kurzen Funkenstrecke, so daß die Ausbreitungseigenschaften der elektromagnetischen Wellen in mancher Hinsicht besser zu zeigen sind als mit einem Röhrengenerator. Insbesondere ist es möglich, die Brechung in Isolierstoffen zu demonstrieren. Im übrigen vermitteln diese Versuche die gleichen Erkenntnisse wie die Versuche mit Dipolen am Röhrengenerator.

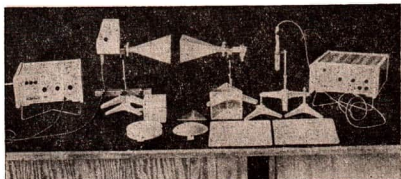


Abb. 3.0.2./1
Mikrowellen-Vorführungssatz

Den Schulen steht neuerdings der von der Unterrichtsmittelindustrie gefertigte Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3 (Import aus der VR Polen) zur Verfügung (Abb. 3.0.2./1). Die Schwingungserzeugung erfolgt mit einem Reflexklystron. Dabei entsteht eine Frequenz von etwa 10 GHz, was einer Wellenlänge von etwa 3 cm entspricht. Das Senden und Empfangen der Mikrowellen geschieht mit Wellenleitern und pyramidenstumpfähnlichen Trichterantennen, wodurch eine sehr gute Gerichtetheit erreicht wird. Für den Empfang steht außerdem eine Detektorsonde zur Verfügung. Der Nachweis der Mikrowellen kann durch ein Mikroampere-meter vorgenommen werden. Da die Schwingungen im Sender mit einer Tonfrequenz (500 Hz bis 1500 Hz) moduliert werden, ist auch ein akustischer Nachweis möglich.

Mit diesem Sender lassen sich die Versuche zu den Ausbreitungseigenschaften Hertzscher Wellen besonders eindrucksvoll gestalten. In den entsprechenden Versuchen (V 3.2.11. bis 3.2.15.) wird die Benutzung des industriell gefertigten Mikrowellensenders als eine Variante beschrieben. Alle Hinweise für das Ingangsetzen der Geräte und alle Bedingungen für den Umgang mit dem Sender sind dem Begleitheft des Herstellerwerkes zu entnehmen. Für den Betrieb des Senders ist eine Genehmigung bei der zuständigen Bezirksdirektion der Deutschen Post einzuholen.

3.0.3. Im Abschnitt 3.3. werden Möglichkeiten zur Signal- und Nachrichtenübermittlung mit Hertzischen Wellen beschrieben. V 3.3.1. soll zeigen, daß es prinzipiell möglich ist, Signale von einem Sender zu einem Empfänger drahtlos durch Hertzische Wellen zu übertragen.

In V 3.3.2. wird gezeigt, wie eine akustische Wiedergabe der HF-Signale durch Erzeugen eines Schwebungstones möglich ist. Die Tonhöhe wird aber durch die Einstellung des Empfängers bestimmt. Als Vorversuch sollte man noch einmal V 1.3.22. heranziehen, um das Prinzip der Schwebung zu erläutern. Mit V 3.3.3. kann man der in den folgenden Versuchen beschriebenen Amplitudenmodulation eine einfache Überlagerung von Schwingungen gegenüberstellen. In V 3.3.4. wird zunächst das Prinzip der Amplitudenmodulation über Gitter- und Anodenkreis gezeigt. Der Versuch kann nach Bemerkung 4 zu einem Modellversuch für modulierten Tastfunk erweitert und V 3.3.2. gegenübergestellt werden. Der akustische Nachweis der modulierten Hochfrequenzschwingungen kann zur Einführung der für den Empfang notwendigen Hochfrequenzgleichrichtung herangezogen werden. In V 3.3.5. werden zur Modulation Schallquellen und Schallaufzeichnungsgeräte verwendet und so die Möglichkeiten einer Erweiterung der drahtlosen Informationsübertragung demonstriert. In V 3.3.6. wird ein Transistorgenerator für die Trägerfrequenz eingesetzt. In V 3.3.7. und V 3.3.8. werden interessante Modellversuche zur drahtlosen Übertragung von Meßwerten der Beleuchtungsstärke und der Temperatur beschrieben, die Verfahren darstellen, wie sie in Wettersonden und Satelliten angewendet werden können. Während in V 3.3.7. eine mit dem Meßwert veränderliche Kippfrequenz aufmoduliert wird, erfolgt in V 3.3.8. eine Frequenzmodulation der Trägerfrequenz. In V 3.3.8. wird weiter in einfacher Weise das Prinzip der Frequenzmodulation dargestellt, um ein Modell für die im UKW-Hörrundfunk übliche Modulation zu geben. In V 3.3.9. wird diese Modellbetrachtung durch die Umsetzung in eine Amplitudenmodulation fortgesetzt. Mit V 3.3.10. beginnen Versuche zu Empfängerschaltungen, indem zunächst durch einen Modellversuch die Notwendigkeit der Demodulation zur Wiedergabe des aufmodulierten Signals erläutert wird.

Bisher wurde in den Versuchen mit selbsterzeugten Schwingungen und Wellen gearbeitet. Infolge des gesetzlichen Verbots, an nicht lizenzierte HF-Generatoren Antennen anzukoppeln, konnten nur kurze Entfernungen überbrückt werden. In den folgenden Versuchen werden Empfängerschaltungen aufgebaut, um die von Rundfunksendern abgestrahlten Wellen zu empfangen. Um die Verbindung mit den vorangehenden Versuchen herzustellen, ist es methodisch zweckmäßig, an den Empfängerschaltungen zunächst in dem abstimmbaren Schwingkreis die modulierten Schwingungen zu zeigen, die sich durch die vom Sender abgestrahlten und von der Antenne aufgenommenen Wellen bei Resonanzabstimmung bilden. Dazu dient ein Katodenstrahloszillograf mit hoher Verstärkung. In V 3.3.11. erfolgt die HF-Gleichrichtung durch eine Germaniumdiode. Durch die Ankopplung eines Röhren- und Transistorverstärkers ist zu demonstrieren, wie in Rundfunkempfängern durch NF-Verstärkung eine für die Lautsprecherwiedergabe hinreichende Lautstärke erreicht wird. In V 3.3.12. und V 3.3.13. werden Audionschaltungen mit Triode bzw. Transistor beschrieben. Das Wesentliche an der Audionschaltung ist, daß in der Röhre bzw. in dem Transistor gleichzeitig die Gleichrichtung und eine Verstärkung erfolgen und die Möglichkeit der Empfangsverbesserung durch die Rückkopplung besteht. Bei der Demonstration dieser Versuche sollte man schrittweise aufbauen und mit dem Oszillografen die Umwandlung der Schwingung innerhalb der Schaltung verfolgen. Die Selbsterregung und die Entstehung eines Schwebungstones ist im allgemeinen ein Nachteil der Schaltung, kann aber für den Empfang unmodulierten Tastfunks nach V 3.3.1. ausgenutzt werden. Im letzten Versuch werden verschiedene Ankopplungsmöglichkeiten von Antennen gezeigt, die in Verbindung mit den Empfängerschaltungen auf Empfindlichkeit und Trennschärfe untersucht werden können. Es wird bewußt darauf verzichtet, weitere Empfängerschaltungen in diesem Buch zu beschreiben, da es im Unterricht nur auf die prinzipielle Darstellung der Funktion der Empfänger ankommt. Mit den modernen Hochfrequenzaufbausätzen kann man ohne weiteres andere Empfängerschaltungen aufbauen. Falls man in Arbeitsgemeinschaften davon Gebrauch machen will, ist es verhältnismäßig leicht möglich, diese nach Schaltplänen der einschlägigen Fachliteratur zu realisieren.

3.0.4. Dem Fernsehen sind die Versuche des 4. Abschnittes gewidmet. Wie schon beim Hörfunk, so gilt auch hier in noch höherem Maße die Notwendigkeit der Beschränkung auf das Wesentliche. Von diesen Versuchen behandelt der erste die Nipkowscheibe. Wenn auch die Nipkowscheibe für die heutige Bildübertragung ganz ihre Bedeutung verloren hat, so hat doch ihre Vorführung immer noch einen hohen Wert; denn durch die Bildzerlegung und die Zusammensetzung auf rein mechanischer Grundlage wird den Schülern das Verstehen der Bildübertragung erleichtert. Eigentlich müßte die Versuchsanordnung mit zwei Nipkowscheiben und zwei Antriebsvorrichtungen, je einer für die Bildzerlegungs- und die Bildzusammensetzungseinrichtung ausgestattet sein. Doch würde dies für diesen Versuch einen zu hohen Aufwand bedeuten, zumal sich die Synchronisierung der beiden Antriebsvorrichtungen nur sehr schwer durchführen läßt. Es beeinträchtigt den Wert des Versuches als Modellversuch nicht im geringsten, wenn man die beiden Nipkowscheiben zu einer zusammenfaßt.

Im Gegensatz zu V 3.4.1. wird in den folgenden Versuchen auf rein elektronischer Grundlage gearbeitet. In V 3.4.2. werden zunächst Bauanleitungen für Aufbauhaltbretter gegeben. Nach den Versuchsbeschreibungen in V 3.4.3. werden sie benutzt, um stufenweise die einzelnen Teilschritte der Abtastung und der Wieder-

gabe zu erläutern. Die Anlage entspricht im Prinzip dem industriellen Fernsehen. Zur Vereinfachung wird auf das Aufmodulieren auf eine Trägerfrequenz verzichtet, so daß von der Anlage kaum Störungen ausgehen können. In V 3.4.4. ist eine Reihe von Varianten zusammengefaßt, in denen an Stelle der Selbstbauteile Oszillografen und industriell gefertigte Verstärker zu den gleichen Versuchen wie in V 3.4.3. eingesetzt werden, so daß eine Auswahl nach den Möglichkeiten an den verschiedenen Schulen getroffen werden kann.

3.0.5. Selbstbau von Zusatzteilen für Lehrmittelsätze zur Hochfrequenztechnik

Zum Aufbau von Resonanzkreisen und Zusatzteilen zum EMB-Hochfrequenzsatz ist eine Buchsenplatte aus Hartpapier nach Abbildung 3.0.5./1 vorteilhaft.

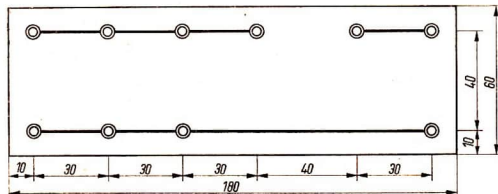


Abb. 3.0.5./1 Buchsenplatte

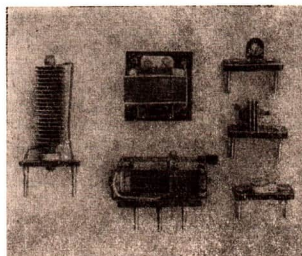


Abb. 3.0.5./2 Verschiedene Schaltelemente auf Steckerbretchen

Häufig sind Schaltelemente notwendig, die nicht in den industriell gefertigten Lehrmittelsätzen vorhanden sind. Diese sollte man am besten auf Steckbrettern nach Abbildung 3.0.5./2 montieren. Der Steckerabstand von 40 mm findet sich sowohl im EMB-Satz wie im SEG Elektrik, Halbleiter- und Hochfrequenzelektronik. In Hartpapierstücke (20 mm × 55 mm) werden zwei Bohrungen mit Gewinde M 5 gebracht, in die man Bananenstecker schraubt. Kleine Schaltelemente werden nur mit ihren Anschlußdrähten in den Bananensteckern festgeschraubt, größere werden zusätzlich mit dem Hartpapier verschraubt. Vierpolige Schaltelemente werden auf entsprechenden quadratischen Platten montiert.

Für den Einsatz von Transistoren im EMB-Satz wird der Bau eines Transistorbretts aus Plast oder Hartpapier nach Abbildung 3.0.5./3 empfohlen.

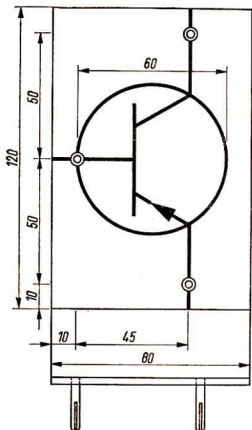


Abb. 3.0.5./3 Transistorbrett zum EMB-Hochfrequenzsatz

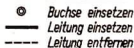
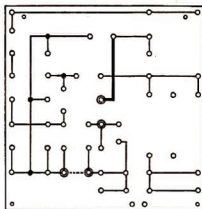
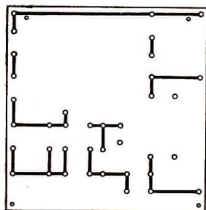
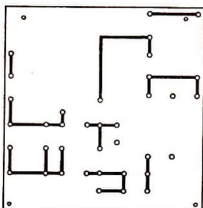


Abb. 3.0.5./4 Änderung einer Schaltplatte zum EMB-Hochfrequenzsatz

Die Schaltplatten des EMB-Hochfrequenzsatzes sind in ihrer Originalausführung schlecht geeignet, einfache Schaltungen zur Erzeugung elektrischer Schwingungen übersichtlich aufzubauen. Darum ist zu empfehlen, mindestens eine der beiden Platten nach Abbildung 3.0.5./4 zu ändern. Es ist eine Verbindung herauszunehmen, durch die zwangsläufig der Schwingkreis mit der Katode verbunden würde. Dort werden zwei Buchsen eingesetzt, so daß durch einen Verbindungsstecker jederzeit die Originalschaltung wiederhergestellt werden kann. Für den Aufbau einer Spannungsteilerschaltung für die Basisspannung von Transistoren ist das Einsetzen zweier weiterer Buchsen und einer Verbindung zweckmäßig, die für die Verwendung der Originalschablonen keinerlei Beeinträchtigung mit sich bringen.



a



b

Abb. 3.0.5./5 Schablonen zum EMB-Hochfrequenzsatz für a) Schwingungsgeneratoren b) Diodenempfänger mit Verstärker

Für die Selbstanfertigung von Schablonen zum EMB-Satz ist es zweckmäßig, die Zeichnung der Schablone mit schwarzer Tusche auf Transparentpapier anzufertigen und diese im Kontaktverfahren auf Vergrößerungspapier zu pausen. Die Löcher für die Stecker werden mit einem Locheisen herausgeschlagen. Von der Zeichnung kann man bei Bedarf wieder neue Pausen anfertigen. Es sind für die in diesem Buch beschriebenen Versuche zwei Zusatzschablonen nach Abbildung 3.0.5./5 zu fertigen.

Für den Aufbau von Schaltungen im Unterricht ist es methodisch günstig, wenn man sich einen vollständigen zweiten Schablonensatz aus PVC-Folie fertigt. Die Schablonen erhalten die notwendigen Lochungen und werden mit Tafellack gestrichen, so daß man während des Unterrichts den Schaltplan mit Kreide auch mehrfarbig darauf zeichnen kann.

Für den Aufbau von Rückkopplungs- oder Dreipunktschaltungen sind die HF-Spulen des EMB-Hochfrequenzsatzes unzuweckmäßig. Man muß entweder Spulen des Aufbausatzes Elektrizitätslehre außerhalb des Schaltbrettes verwenden oder aber die HF-Spulen des SEG Halbleiter-Hochfrequenz einsetzen. Dazu werden Adapter nach Abbildung 3.0.5./6a, b, c empfohlen. Sie gestatten es, die Spulen dicht nebeneinander anzuordnen, wie es die induktive Kopplung verlangt.

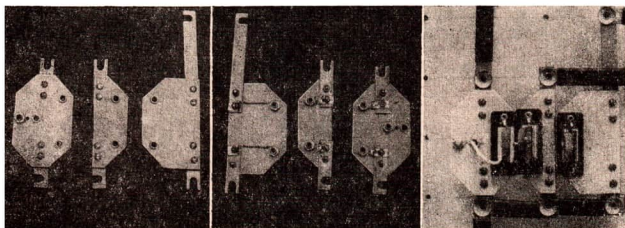
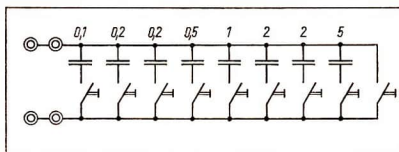


Abb. 3.0.5./6a, b, c Adapter für EMB Hochfrequenzsatz zur Nutzung von Spulen des SEG HH

Abb. 3.0.5./7
Kondensatorbatterie



Für die Arbeit mit Kondensatoren verschiedener Kapazität in einer Versuchsanordnung ist es zweckmäßig, sich nach Abbildung 3.0.5./7 eine Kondensatorbatterie mit Abstufung nach Art eines Wägesatzes anzufertigen.

Zur Ergänzung des SEG HH, besonders für den Einsatz in Arbeitsgemeinschaften, wird die Anfertigung von Gummibuchsenplatten empfohlen. Man fertigt sie aus drei Schichten Schuhsohlengummi (7 mm dick), die man übereinanderklebt. Sie werden in einem quadratischen Netz mit Bohrungen (4,5 mm \varnothing), den Gummi-

buchsen, versehen. Dazu muß man wegen der Elastizität des Gummis einen Bohrer von 5 mm Durchmesser benutzen. Die Bohrungen sollen nur durch zwei Schichten des Gummis hindurchgehen. Der Abstand der Bohrungen beträgt 20 mm. Die Größe der Platten ist bei 5 mal 5 Bohrungen 120 mm mal 120 mm (Abb. 3.0.5./8). Kleinere Schaltelemente, wie Widerstände, Kondensatoren und Transistoren, werden einfach mit ihren Anschlußdrähten in die Bohrungen gesteckt. Größere Schaltelemente (Drehkondensatoren, Drehwiderstände, Röhrensockel) erfordern eine zusätzliche Halterung. Dazu werden sie, wenn es möglich ist, direkt mit einer Schraube M 3 versehen, oder es wird aus Blech oder Plast ein Winkel gefertigt, der mit solch einer Schraube versehen ist (Abb. 3.0.5./9). Die Schrauben werden dann

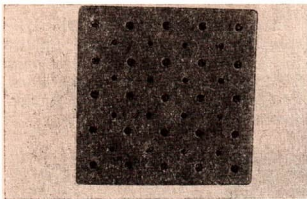


Abb. 3.0.5./8 Gummibuchsenplatte

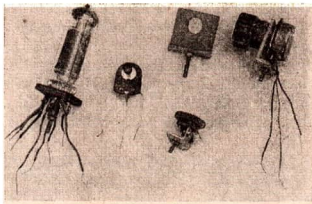


Abb. 3.0.5./9 Teile zum Einsatz auf der Gummibuchsenplatte

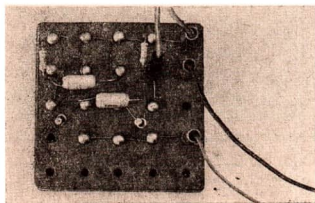


Abb. 3.0.5./10 Astabiler Multivibrator auf der Gummibuchsenplatte

in Bohrungen (3 mm \varnothing) gesteckt, die jeweils in der Mitte der Gummibuchsenquadrate anzuordnen sind. Verbindungen zwischen den einzelnen Schaltpunkten auf der Platte werden durch entsprechend gebogene Drahtbrücken hergestellt, die wie die Anschlußdrähte der Schaltelemente durch Stecker in den Buchsen gehalten und leitend verbunden werden. Als Stecker benutzt man Al-Rundkopfniete (4 mm mal 15 mm). Für den Anschluß der Stromversorgung, Kopfhörer und Meßgeräte benutzt man die Bananenstecker der Verbindungsleitungen (Abb. 3.0.5./10). Jeder Schüler sollte zwei Gummibuchsenplatten zur Verfügung haben. Die Schaltelemente, Drahtbrücken und Stecker werden in einem gefächerten Kasten aufbewahrt, wie er als Anglerbedarf gehandelt wird.

Es ist empfehlenswert, mit den Gummibuchsenplatten dann zu arbeiten, wenn man nach der Fachliteratur oder einem eigenen Entwurf ein Gerät mit gedruckter Schaltung fest aufbauen will. Man kann die Schaltung auf der Gummibuchsenplatte

erproben, Schaltelemente noch leicht auswechseln und die Anordnung der Schaltelemente in der gedruckten Schaltung planen. Danach kann man dieselben Schaltelemente auf die vorbereitete Leiterplatte löten.

3.1. Elektrische Schwingungen



3.1.1. Erzeugen von gedämpften Schwingungen

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1. Stromversorgungsgerät (200 V—) | 7. Spule (500 Wdg.) |
| 2. Umschalter | 8. Spule (750/1500 Wdg.) |
| 3. Kondensator (2 μ F) | 9. U-Kern, geblättert |
| 4. Kondensator (4 μ F) | 10. I-Kern, geblättert |
| 5. Kondensator (10 μ F) | 11. Lautsprecher, hochohmig |
| 6. 2 Spulen (125/250 Wdg.) | 12. Katodenstrahloszillograf |

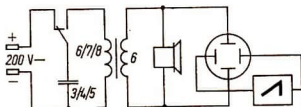
Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist zur Einführung geeignet.
2. In dem Versuch wird gezeigt, daß nach einmaliger Energiezufuhr freie gedämpfte elektrische Schwingungen zustandekommen. Ein Vergleich mit dem Fadenpendel wird empfohlen.

Versuch

In dem Versuchsaufbau nach Abbildung 3.1.1./1 wird der Kondensator in der eingezeichneten Schalterstellung aufgeladen.

Abb. 3.1.1./1
Schaltplan zum Erzeugen
gedämpfter Schwingungen



Durch das Umlegen des Schalters wird der Schwingkreis geschlossen, und es entsteht eine kurzzeitige gedämpfte Schwingung. Im Lautsprecher ist ein kurzer Ton zu hören. Bei passender Einstellung der Kippfrequenz des Oszillografen ist das Bild der Schwingung auf dem Bildschirm zu sehen. Durch Auswechseln des Kondensators oder der Spulen und durch Verschieben des I-Kerns erzielt man unterschiedliche Frequenzen, die man akustisch und am Oszillografen qualitativ beobachten kann.

3.1.2. Erzeugen von gedämpften Schwingungen durch die Kippschwingungen eines Oszillografen

1. Katodenstrahloszillograf
2. Kondensator (0,1 μ F)

3. Kondensator (0,2 μF)
4. Kondensator (0,5 μF)
5. Kondensator (0,01 μF)
6. Spule (750/1500 Wdg.)
7. I-Kern, geblättert

Methodische Hinweise

1. Bei diesem Versuch werden stehende Bilder von gedämpften elektrischen Schwingungen erzeugt.
2. Durch Verändern der Spule und des Schwingkreiskondensators kann man schon die Abhängigkeit der Frequenz von der Induktivität und der Kapazität vorführen.

Versuchsordnung

Aus einem Kondensator (0,1 μF) und einer Spule (1500 Wdg. ohne Kern) wird ein Schwingkreis zusammengestellt und nach Abbildung 3.1.2./1 mit dem Y-Eingang des Katodenstrahloszillografen verbunden. Über einen Kondensator (0,01 μF) wird die Kippspannung des Oszillografen angelegt. Die Kippfrequenz liegt im Bereich von 35 Hz ... 100 Hz. Der Oszillograf ist zu erden.

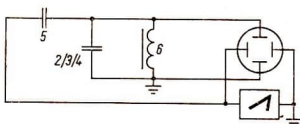


Abb. 3.1.2./1 Erregen gedämpfter Schwingungen durch Kippspannungen

Bemerkung

Durch die Kippspannung wird der Schwingkreis zu Schwingungen angeregt und führt jeweils während des langsamen Anwachsens der Kippspannung eine Eigenschwingung aus. Infolge des stets vorhandenen Ohmschen Widerstandes klingen die Schwingungen ab. Auf dem Bildschirm des Oszillografen ist eine Kurve nach Art von Abbildung 3.1.2./2a zu sehen.

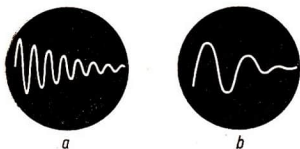


Abb. 3.1.2./2 Oszillogramme gedämpfter Schwingungen

Ersetzt man den Schwingkreiskondensator durch einen solchen von 0,2 μF , so entsteht eine Kurve nach Art von Abbildung 3.1.2./2b. Dabei ist die Verstärkung am Oszillografen nachzustellen. Im gleichen Zeitraum sind weniger Schwingungsperioden zu beobachten; die Frequenz ist kleiner geworden. Entsprechendes gilt, wenn man einen Kondensator von 0,5 μF einsetzt. Führt man in die Spule den I-Kern ein und vergrößert dadurch die Induktivität, so sinkt die Frequenz eben-

falls. Beim Auswechseln der Kondensatoren ist die Verbindung zur Kippspannung des Oszillografen jedesmal zu unterbrechen.

3.1.3. Einfluß eines Dämpfungswiderstandes auf gedämpfte Schwingungen

1. Katodenstrahloszillograf
2. Kondensator ($0,1 \mu\text{F}$)
3. Kondensator ($0,01 \mu\text{F}$)
4. Spule ($750/1500 \text{ Wdg.}$)
5. I-Kern, geblättert
6. Schiebewiderstand ($3 \text{ k}\Omega$)

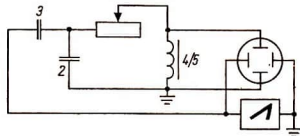
Methodischer Hinweis

Durch Verändern des Ohmschen Widerstandes im Schwingkreis kann gezeigt werden, was die Ursache für die Dämpfung elektrischer Schwingungen ist.

Versuchsordnung

Aus dem Kondensator ($0,1 \mu\text{F}$), einer Spule (1500 Wdg.) und einem in Reihe geschalteten Schiebewiderstand wird ein Schwingkreis aufgebaut (Abb. 3.1.3./1). Wie bei V 3.1.2. erfolgt die Anregung durch die Kippfrequenz des Oszillografen. Dieser ist zu erden.

Abb. 3.1.3./1
Schaltplan der Versuchsanordnung



Versuch

Zunächst wird der Widerstand auf 0 eingestellt. Am Oszillografen erscheint eine Kurve nach Art von Abbildung 3.1.3./2a. Die Kippfrequenz wird so eingestellt, daß etwa vier Schwingungsperioden sichtbar sind. Vergrößert man den Wider-

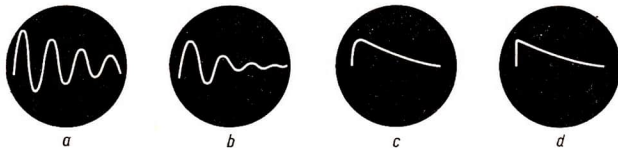


Abb. 3.1.3./2 Oszillogramme gedämpfter Schwingungen:

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| a) schwach gedämpfte Schwingungen, | c) aperiodischer Grenzfall, |
| b) stark gedämpfte Schwingungen, | d) Kriechfall |

stand, so erscheint bei etwa 300Ω eine Kurve wie in Abbildung 3.1.3./2b; die Dämpfung nimmt zu. Damit man die Kurven miteinander vergleichen kann, muß man bei jeder Änderung des Widerstandes die Verstärkung des Oszillografen nachstellen, um bei allen Oszillogrammen die gleiche Ausgangsamplitude zu erhalten. Weiteres Vergrößern des Widerstandes bis etwa 1200Ω führt zur Kurve der Abbildung 3.1.3./2c, dem sogenannten aperiodischen Grenzfall, bei dem gerade keine volle Schwingung mehr entsteht. Volles Einschalten des Widerstandes verursacht den Kriechfall, wie ihn Abbildung 3.1.3./2d zeigt.



3.1.4. Resonanz eines Schwingkreises mit technischem Wechselstrom

1. Netzanschluß (220 V~)
2. Schiebewiderstand (300Ω)
3. Kondensator ($4 \mu\text{F}$)
4. Spule ($750/1500 \text{ Wdg.}$)
5. U-Kern, geblättert
6. I-Kern, geblättert
7. Spannungsmesser (250 V~)
8. 3 Glühlampen (6 V; 0,4 A) in Fassungen (E 10) auf Brettern
9. zweipoliger Schalter

Methodische Hinweise

1. Der Versuch dient der Herleitung der Thomsonschen Schwingungsgleichung.
2. Er kann auch als Beweis dafür, daß Resonanz bei einer Zuführung minimaler Energie erfolgt, eingesetzt werden.

Versuchsordnung

Aus einem Kondensator von $4 \mu\text{F}$ und einer Spule von 1500 Wdg. auf einem mit Joch versehenen U-Kern wird ein Schwingkreis zusammengesetzt. Die Schaltung wird nach Abbildung 3.1.4./1 aufgebaut, anfangs ohne den I-Kern.

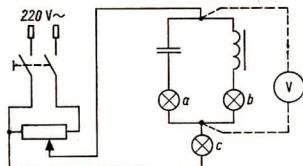


Abb. 3.1.4./1 Schaltplan der Versuchsordnung (Galvanische Kopplung)

Versuch

Zunächst wird das Potentiometer so eingestellt, daß beim Einschalten am Schwingkreis keine Spannung liegt.

Dann schaltet man ein und stellt mit dem Potentiometer die Spannung so ein, daß die Lampen b und c hell leuchten, die Lampe a bleibt dunkel. Legt man nun den I-Kern als Joch auf den U-Kern, so verlöschen zunächst beide Lampen. Erhöht man die Spannung, so leuchten jetzt die Lampen a und c auf. Dann verschiebt man den I-Kern so weit, daß schließlich die Lampen a und b gleich hell leuchten, während die Lampe c ganz erlischt. Der Schwingkreis befindet sich jetzt in Resonanz mit dem Netzwechselstrom; er ist auf die Netzfrequenz 50 Hz abgestimmt.

Bemerkungen

1. Es ist darauf zu achten, daß vor dem Abnehmen des Joches die Spannung wieder verkleinert werden muß; sonst brennen die Lampen b und c durch.
2. An Stelle der Glühlampen kann man Strommesser einsetzen. Das ist besonders für die Lampe c günstig, da die Stromstärke bei Resonanz nicht gleich 0 wird, wie die Lampe vortäuscht. Aus der Gleichheit der Stromstärken im Kondensator und in der Spule im Resonanzfall ist die Thomsonsche Schwingungsgleichung herzuleiten.

$$\text{Aus } I_C = I_L \text{ folgt } \frac{1}{\omega \cdot C} = \omega L \text{ und aus } \omega = 2\pi \cdot f$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \cdot L}}$$



3.1.5. Demonstration der Kopplungsarten

1. Netzanschluß (220 V~)
2. Schiebewiderstand (330 Ω)
3. 3 Kondensatoren (4 μF)
4. 3 Spulen (750/1500 Wdg.)
5. 2 U-Kerne, geblättert
6. 2 I-Kerne, geblättert
7. Spannungsmesser (250 V~)
8. Glühlampen (6 V; 0,4 A)
9. zweipoliger Schalter

Methodische Hinweise

1. Die verschiedenen Arten der Antennenkopplung lassen sich klären (Vergleich mit V 3.3.14.).
2. Das Verständnis für die Wirkungsweise des Abstimmkreises wird vorbereitet.

Versuchsordnung

Der Aufbau erfolgt entsprechend den Abbildungen. Dabei sind die Angaben von V 3.1.4. zu beachten.

Versuche

Ist der Schwingkreis wie in V 3.1.4. durch Leitungsdrähte mit der Spannungsquelle verbunden, so besteht eine galvanische Kopplung. Liegt in den Zuleitungen je ein Kondensator (Abb. 3.1.5./1), so ergibt sich kapazitive Kopplung.

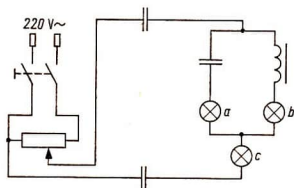


Abb. 3.1.5./1 Kapazitive Kopplung

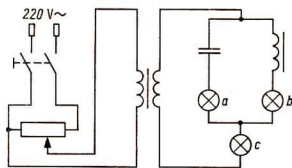


Abb. 3.1.5./2 Induktive Kopplung

Ersetzt man die beiden Kondensatoren durch einen aus zwei Spulen mit 1500 Wdg. und den Kernen zusammengesetzten Transformator, so ergibt sich eine induktive Kopplung (Abb. 3.1.5./2).

Mit jeder der drei Kopplungsarten läßt sich V 3.1.4. durchführen. Zwischen den einzelnen Versuchen ist die Spannung mit Hilfe des Potentiometers immer wieder auf den Wert 0 einzustellen und auszuschalten.



3.1.6. Erregen eines Schwingkreises mit Hilfe eines Teslatransformators

1. Teslatransformator
2. Spule (60 Wdg.)
3. Drehkondensator (500 pF)
4. Glühlampe (3,8 V; 0,07 A)
5. Glimmlampe (ohne Vorwiderstand)
6. Kondensator (100 pF ... 200 pF)
7. verschiedene Platten aus Metall, Holz, Hartpapier, Glas u. ä. (etwa 150 mm × 150 mm)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt, daß in Funkenstrecken elektrische Schwingungen auftreten.
2. Er sollte als Modellversuch zeigen, wie Elektromotoren und Zündfunken von Kraftfahrzeugen den Rundfunkempfang stören können.

Versuchsordnung

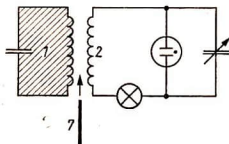
Aus dem Teslatransformator wird die lange Sekundärspule herausgeschraubt. Nachdem man den Hebel an der Primärspule auf die oberste Windung eingestellt hat, legt man den Teslatransformator auf die Seite. Man stellt den Schwingkreis, bestehend aus einer Spule mit 60 Wdg., einem Drehkondensator und einer Kleinspannungsglühlampe so auf, daß sich die Spulen mit einem Abstand von wenigen Zentimetern mit parallelen Spulenebenen gegenüberstehen.

Versuch

Der Teslatransformator ohne Sekundärspule ist ein Schwingkreis, der durch eine Funkenstrecke angestoßen wird.

Zu dem zweiten Schwingkreis besteht eine induktive Kopplung. Durch Einstellung am Drehkondensator kann er auf Resonanz zu den Schwingungen des Teslatransformators abgestimmt werden. Im Resonanzfall fließt im Sekundärkreis ein Maximalstrom. Die Glühlampe leuchtet hell auf. Die Resonanz kann auch durch eine parallel zur Spule geschaltete Glimmlampe sichtbar gemacht werden. Da nicht alle Teslatransformatoren mit der gleichen Frequenz schwingen, ist es mitunter notwendig, die Resonanz durch Parallelschalten eines weiteren Kondensators von 100 pF ... 200 pF zum Drehkondensator herbeizuführen. Hält man zwischen die beiden Spulen nacheinander Platten aus verschiedenem Material, so läßt sich die Abschirmwirkung von Metallen gut zeigen.

Abb. 3.1.6./1
Schaltplan der Versuchsanordnung



Bemerkung

Es empfiehlt sich, mit einem Rundfunkempfänger zu zeigen, daß die Schwingungen in der Funkenstrecke des Teslatransformators Störungen auf allen Wellenbereichen hervorrufen, weil neben der Grundschwingung zahlreiche andere Frequenzen überlagert sind.



3.1.7. Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Röhrengenerator in Rückkopplungsschaltung [SE]

1. Stromversorgungsgerät (40 V ... 100 V—; 6,3 V~)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
3. Röhrenbrett für Triode
4. Widerstand (1 kΩ ... 5 kΩ)
5. Katodenstrahloszillograf
6. Schalter
7. Strommesser (zu Versuch 1 10 mA—, zu Versuch 2 und 3 10 mA~)
8. *Zu Versuch 1:* Spule (15000 Wdg.)
Zu Versuch 2: Spule (250 Wdg. bis 1500 Wdg.)
Zu Versuch 3: Spule (60 Wdg. ... 250 Wdg.)
9. *Zu Versuch 1:* Spule (15000 Wdg.)
Zu Versuch 2: Spule (125 Wdg. bis 750 Wdg.)
Zu Versuch 3: Spule (25 Wdg. bis 125 Wdg.)
10. *Zu Versuch 1:* Kondensatoren (2 μF bis 30 μF)
Zu Versuch 2: Kondensatoren (0,1 μF bis 10 μF)
Zu Versuch 3: Drehkondensator (500 pF)

Zu Versuch 1 und 2

11. U-Kern, geblättert
12. I-Kern, geblättert
13. Lautsprecher, hochohmig

Methodische Hinweise

1. Die Versuche zeigen, wie durch die Rückkopplung die Dämpfungsenergie dem Schwingkreis wieder zugeführt werden kann, so daß ungedämpfte Schwingungen entstehen.
2. Durch die einzelnen Teilversuche wird der Frequenzbereich, in dem die Meißnerschaltung eingesetzt werden kann, umrissen.
3. Die Schüler sollen erkennen, daß die Phasenverschiebung im Verstärkerbauelement durch den Rückkopplungstransformator bei richtiger Polung aufgehoben wird.

Versuchsordnung

In Abbildung 3.1.7./1 ist der Schaltplan einer Meißnerschen Rückkopplungsschaltung gegeben. Die Frequenz der ungedämpften Schwingungen wird durch die Werte der eingesetzten Induktivität und Kapazität bestimmt. Die Schwingungen aller Frequenzbereiche können durch einen Katodenstrahloszillografen nachgewiesen werden. Weitere Nachweismöglichkeiten für die verschiedenen Frequenzbereiche werden in den Teilversuchen und in V 3.1.11. beschrieben.

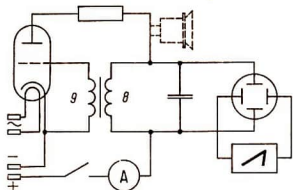


Abb. 3.1.7./1 Schaltplan der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung. Bei HF-Schwingungen entfallen der Lautsprecher und der Eisenkern.

Die Anodenspannung wird erst eingeschaltet, nachdem die Röhren geheizt sind. Ungedämpfte Schwingungen treten nur auf, wenn die Rückkopplungsspannung in der richtigen Phasenlage zwischen Gitter und Katode liegt. Da der Wicklungssinn der Spulen schwer zu überschauen ist, findet man den richtigen Anschluß der Rückkopplungsspule durch probeweises Austauschen ihrer Anschlüsse an Gitter und Katode.

Die Anodenstromstärke wird mit einem Strommesser überwacht. Beim Auswechseln von Spulen und Kondensatoren ist die Anodenspannung auszuschalten.

Versuch 1: Erzeugen sehr kleiner Frequenzen

Auf geschlossenem U- und I-Kern werden Spulen mit 15000 Wdg. eingesetzt. Zum Nachweis der Schwingungen kann man in den Schwingkreis ein weiteres Drehspulmeßgerät (10 mA-) mit Nullpunktmittellage schalten. Am Oszillografen schaltet man bei den kleinen Frequenzen die Kippspannung am besten aus.

Durch Verschieben des I-Kerns und Auswechseln des Kondensators mit Werten von $2 \mu\text{F}$... $30 \mu\text{F}$ läßt sich die Frequenz von etwa 1 Hz ... 10 Hz verändern. Es empfiehlt sich, bei Frequenzen von 1 Hz ... 2 Hz zwei Strommesser einzusetzen, um den Verlauf der Schwingungen und den Phasenunterschied zwischen Anoden- und Schwingkreisstrom beobachten zu können.

Versuch 2: Erzeugen tonfrequenter Schwingungen

Die Spulen werden gegen Spulen mit 1500 Wdg. ... 250 Wdg. ausgetauscht. Als Rückkopplungsspule schaltet man eine Spule mit etwa der halben Windungszahl der Schwingkreisspule. Bei dem Kondensator kann man Werte zwischen $0,1 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$ wählen. Der Nachweis der Schwingungen erfolgt mit dem Oszillografen oder mit einem Lautsprecher, der zwischen Anode und Schwingkreis geschaltet wird.

Versuch 3: Erzeugen hochfrequenter Schwingungen

Der Aufbau erfolgt ohne Eisenkerne. Spulen mit 125/250 Wdg. werden induktiv gekoppelt, indem man sie mit gemeinsamer Längsachse dicht nebeneinander- oder aufeinanderstellt. Als Kondensator benutzt man zweckmäßig einen Drehkondensator mit 500 pF.

Bemerkungen

- Die Versuche 2 und 3 können gut mit Hochfrequenzaufbausätzen aufgebaut werden. Für den Versuch 2 verwendet man als Schwingkreis- und Rückkopplungsspule den NF-Übertrager. Für den Versuch 3 werden die zu diesen Sätzen gehörigen HF-Spulen eingesetzt (Abb. 3.1.7./2).

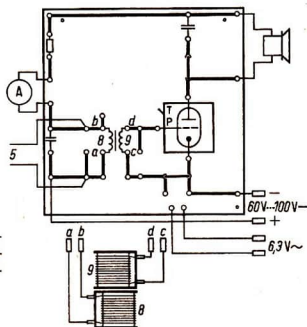


Abb. 3.1.7./2 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz (Schaltplatte nach 3.0.5. geändert), Nebenbild: Spulenordnung für HF-Schwingungen

- Um die Wirkungsweise der Rückkopplungsschaltung zu erläutern, ist es zweckmäßig, bei nicht angeschlossener Rückkopplungsspule den Anodenstromkreis zu schließen. Auf dem Bildschirm des Oszillografen ist eine gedämpfte Einschalterschwingung zu beobachten.

3. Zur Bestätigung der Thomsonschen Schwingungsgleichung kann man in Versuch 2 den Schwingkreiskondensator in einer Abstufung von $0,25 \mu\text{F}$, $1 \mu\text{F}$ und $4 \mu\text{F}$ einsetzen und erhält jeweils die Oktave des vorhergehenden Tones.
4. Bei Schülerexperimenten darf die Anodenspannung nicht größer als 42 V sein

3.1.8. Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Transistorgenerator in Rückkopplungsschaltung [SE]

1. Gleichspannungsquelle ($6 \text{ V} \dots 12 \text{ V}$)
2. Transistoren für NF bzw. HF
3. Transistorbrett \otimes , siehe MB 3.0.5.
4. bis 13. wie bei 3.1.7.
14. Widerstand ($3 \text{ k}\Omega \dots 5 \text{ k}\Omega$)
15. Kondensator zu 1) und 2) $1 \mu\text{F}$, zu 3) 5 nF
16. Kondensator ($0,01 \mu\text{F}$)

Methodische Hinweise

1. Als Verstärkerbauelement dient hier ein Transistor, der an seiner Basis eine Spannung benötigt, die durch den Widerstand 14 erzeugt wird.
2. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
3. Vergleiche MH V 3.1.7.!

Versuchsanordnung

Der Schaltplan in Abbildung 3.1.8./1 zeigt im Prinzip den gleichen Aufbau wie in V 3.1.7. Die Röhre ist durch einen Transistor ersetzt und dementsprechend wird eine niedrigere Spannung angelegt. Über den Widerstand (14) erhält die Basis die nötige Vorspannung, während der Kondensator (15) dem Wechselstrom nur einen kleinen Widerstand bietet. Falls keine Schwingungen einsetzen, ist hier die Spule zwischen Emitter und Basis umzupolen.

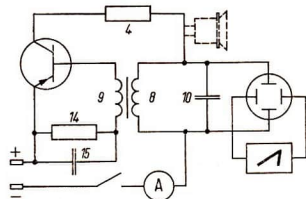


Abb. 3.1.8./1 Transistorgenerator in Rückkopplungsschaltung. Bei HF-Schwingungen entfällt der Lautsprecher.

Die Kollektorstromstärke wird mit einem Strommesser überwacht und darf die für den Transistor zulässigen Werte nicht überschreiten.

Versuche

Es können bei gleichem Aufbau der Schwingkreise alle Versuche wie in V 3.1.7. ausgeführt werden.

Im Versuch zur Erzeugung von hochfrequenten Schwingungen muß ein HF-Transistortyp eingesetzt werden. Nachweismöglichkeiten der Schwingungen s. V 3.1.11.



3.1.9. Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Röhrengenerator in Dreipunktschaltung (Hartley-Schaltung) [SE]

1. Stromversorgungsgerät (40 V ... 100 V—; 6,3 V~)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
3. Röhrenbrett
4. Widerstand (1 k Ω ... 5 k Ω)
5. Katodenstrahloszillograf
6. Schalter
7. Strommesser (50 mA—)
8. *Zu Versuch 1:* Spule (750/1500 Wdg.)
Zu Versuch 2: Spule (125/250 Wdg.) oder HF-Spulen mit Abgriff (20/40 Wdg.)
9. *Zu Versuch 1:* Kondensatoren (0,1 μ F bis 4 μ F)
Zu Versuch 2: Drehkondensator (500 pF)
10. *Zu Versuch 1:* Kondensator (0,1 μ F bis 1 μ F)
Zu Versuch 2: Kondensator (100 pF)
11. *Zu Versuch 1:* Widerstand (30 k Ω)
Zu Versuch 2: Widerstand (50 k Ω)

Zu Versuch 1

12. U-Kern, geblättert
13. I-Kern, geblättert
14. Lautsprecher, hochohmig
15. Kondensator (10 nF)

Methodische Hinweise

1. Die Dreipunktschaltung stellt eine Form der Rückkopplung dar, bei der die rückgekoppelte Schwingung direkt dem Schwingkreis entnommen wird.
2. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
3. Vergleiche V 3.1.7.!

Versuchsordnung

Der Aufbau der Versuche erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.9./1. Die Frequenzen der Schwingungen werden durch die Werte der Kapazität und Induktivität im Schwingkreis bestimmt. Die Schwingkreisspule muß einen Abgriff besitzen, so daß etwa ein Drittel, maximal die Hälfte der Windungszahl am Gitter der Röhre liegt. Stehen derartige Spulen nicht zur Verfügung, so kann man zwei entsprechende Spulen mit gleichem Wicklungssinn mit gemeinsamer Achse zusammensetzen und in Reihe schalten.

Zunächst ist immer die Heizspannung anzulegen, dann erst die Anodenspannung. Die Anodenstromstärke ist mit einem Strommesser zu überwachen, damit sie die für die Röhre zulässigen Werte nicht übersteigt.

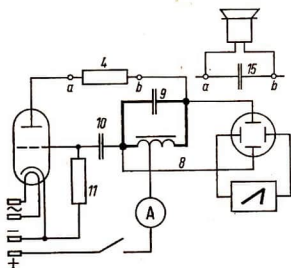


Abb. 3.1.9./1 Röhrengenerator in Dreipunktschaltung, Nebenbild: Anschluß eines Lautsprechers für TF-Schwingungen

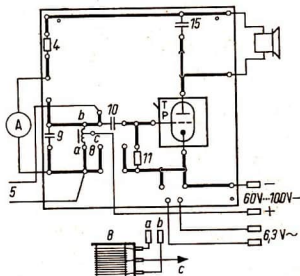


Abb. 3.1.9./2 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz (Schaltplatte nach 3.0.5. geändert), Nebenbild: Spule für HF-Schwingungen

Versuche

Die Teilversuche und die Nachweismöglichkeiten entsprechen V 3.1.7., Versuch 2 und 3. Es können erzeugt werden:

- a) Tonfrequenzen,
- b) Hochfrequenzen.

Die Werte für Spulen und Kondensatoren sind der Geräteaufzählung zu entnehmen. In Abbildung 3.1.9./2 wird die Möglichkeit dargestellt, die Versuche mit dem EMB-Hochfrequenzsatz mit einer selbstgefertigten Schablone aufzubauen.

Bemerkung

Bei Schülerexperimenten darf die Anodenspannung nicht größer als 42 V sein.

3.1.10. Erzeugen ungedämpfter Schwingungen durch einen Transistorgenerator in Dreipunktschaltung [SE]

1. Gleichspannungsquelle (6 V ... 12 V)
2. Transistor für NF bzw. HF
3. Transistorbrett ® siehe MB 3.0.5.
4. bis 10. und 12. bis 15. wie in V 3.1.9.
11. Widerstand 50 kΩ ... 100 kΩ

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.1.7., V 3.1.8. und V 3.1.9.!

Versuchsordnung

Der Aufbau der Schaltungen erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.10./1. Die Schaltelemente für ton- und hochfrequente Schwingungen sind wie in V 3.1.9.

nach der Geräteaufzählung einzusetzen. Mit einem HF-Transistor kann man auch Tonfrequenzen erzeugen, während ein NF-Transistor im Hochfrequenzbereich gar nicht oder sehr schlecht arbeitet.

Die Werte von Koppelkondensator (10) und Basiswiderstand (11) sind von der Frequenz und vom Transistortyp abhängig. Bei kleineren Frequenzen muß der Koppelkondensator eine größere Kapazität haben, und der Widerstand kann klein gewählt werden.

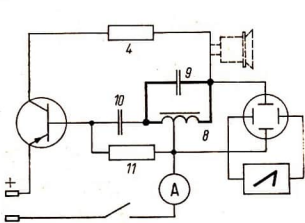


Abb. 3.1.10./1
Transistorgenerator in Dreipunktschaltung

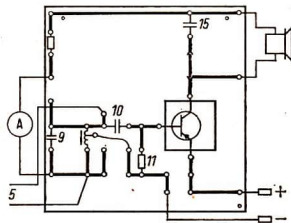


Abb. 3.1.10./2 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz (Schaltplan nach 3.0.5. geändert)

Versuch

Die Spannung wird langsam erhöht, bis die Schwingungen einsetzen. Die Kollektorstromstärke wird mit dem Strommesser überwacht, so daß die für den Transistor zulässige Stromstärke nicht überschritten wird. Der Widerstand (4) schützt den Transistor vor Überlastung.

Die Schwingungen werden mit dem Oszillografen nachgewiesen. Um die Tonfrequenzen hörbar zu machen, wird ein Lautsprecher eingesetzt. Weitere Nachweismöglichkeiten gibt V 3.1.11. an.

3.1.11. Nachweisen von hochfrequenten elektrischen Schwingungen

Geräte wie bei V 3.1.7. bis V 3.1.10., außerdem

Zu Variante a

16. Spule (125/250 Wdg.)
17. Drehkondensator (500 pF)
18. Germaniumdiode
19. Strommesser (1 mA—)
20. Strommesser (1 mA~)

Zu Variante b

21. Spule (10 Wdg.)
22. Strommesser (1 mA ... 50 mA)
23. Glühlampe (3,8 V; 0,07 A) auf Lampenbrett E 10

Zu Variante c

24. Glimmlampe ohne Vorwiderstand
25. Glimmlampenoszillograf nach 9. Teil, V 4.1.3.
26. Drehspiegel

Methodische Hinweise

1. Es werden verschiedene Möglichkeiten gezeigt, elektrische Schwingungen außerhalb des Schwingkreises nachzuweisen.
2. Die Versuche können als Beispiele für Resonanz aufgefaßt werden.
3. Der Versuch mit der Diode ist das Modell eines Empfängers.

Variante a: Resonanzschwingkreis

Nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.11./2 wird ein Resonanzschwingkreis aufgebaut, an den über eine Germaniumdiode ein Strommesser (1 mA-) angeschlossen wird. Die Spule im Resonanzkreis muß etwa die gleiche Windungszahl haben wie die Spule im Schwingkreis des Generators.

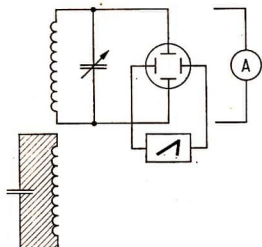


Abb. 3.1.11./1 Resonanzkreis mit Oszillograf oder Wechselstrommesser

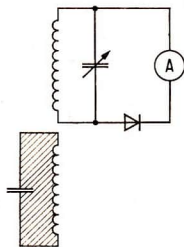


Abb. 3.1.11./2 Resonanzkreis mit Diode und Strommesser

Die beiden Spulen werden mit gemeinsamer Achse dicht aneinandergebracht. Mit dem Drehkondensator wird Resonanz hergestellt, so daß der Strommesser eine maximale Stromstärke anzeigt. Man kann auch den Katodenstrahlloszillografen parallel zum Resonanzkreis anschließen, da er bei einem direkten Anschluß an den Schwingkreis des Generators die Frequenz beeinflusst (Abb. 3.1.11./1). Der Oszillograf kann auch durch einen Strommesser für Wechselstrom ersetzt werden.

Variante b: Spule mit Wechselstrommesser oder Glühlampe

Eine Spule mit 10 Wdg. wird wie in Variante a an die Schwingkreisspule gekoppelt (Abb. 3.1.11./3). Der angeschlossene Strommesser zeigt den induzierten Wechselstrom an. Man kann den Strommesser durch eine Kleinspannungsglühlampe ersetzen. Die Glühlampe leuchtet auf, wenn man die höchstzulässige Anodenstromstärke einstellt oder die Röhre kurzzeitig überlastet. Bei Transistorschaltungen reicht die Energie im allgemeinen nicht dazu aus.

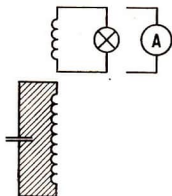


Abb. 3.1.11./3 Induktionsspule mit Glühlampe oder Wechselstrommesser

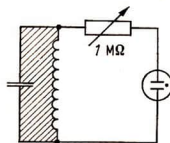


Abb. 3.1.11./4 Anschluß einer Glimmlampe

Variante c: Glimmlampe oder Glimmlampenzillograf

Diese Nachweismöglichkeiten sind bei Transistorschaltungen und bei Röhrenschaltungen mit kleiner Anodenspannung nicht anwendbar.

Mit einer Stabglimmlampe, die man an einem Ende in der Hand hält, berührt man den Anodenanschluß der Spule. Sie leuchtet an beiden Elektroden auf, was der Nachweis für das Vorhandensein einer Wechselspannung ist; der Generator schwingt. Leuchtet nur eine Elektrode schwach, so ist das lediglich der Nachweis des Vorhandenseins der Anodengleichspannung.

Bei dem Glimmlampenzillografen nach 9. Teil, V 4.1.3., schließt man eine Glimmlampe über den zunächst voll eingeschalteten Einstellwiderstand von $1\text{ M}\Omega$ parallel zum Schwingkreis und verkleinert dann den Widerstand, bis beide Elektroden aufleuchten (Abb. 3.1.11./4). Die hochfrequente Wechselspannung ist daran zu erkennen, daß in einem Drehspiegel auch bei schnellsten Umdrehungen keine Auflösung in Einzelschwingungen erfolgt. Siehe dazu auch V 3.1.13.!

3.1.12. Aufnahme der Resonanzkurve eines Schwingkreises [SE]

Geräte wie bei V 3.1.11., Variante a

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist als Praktikumsversuch geeignet. Der Aufbau kann mit dem SEG erfolgen (Abb. 3.1.12./1).

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach V 3.1.11., Variante a (Abb. 3.1.11./2). Der Drehkondensator des Resonanzkreises muß mit einer Skale für den Drehwinkel ausgerüstet sein.

Zunächst stellt man ihn auf einen Mittelwert ein. Dann verstellt man den Drehkondensator im Generatorkreis so, daß das Meßgerät im Resonanzkreis einen Maximalausschlag zeigt. Dreht man nun den Kondensator über den ganzen Bereich durch, so zeigt der Strommesser zunächst ein Ansteigen der Stromstärke, die dann wieder absinkt. Man stellt den Ausschlag des Strommessers als Funktion des Dreh-

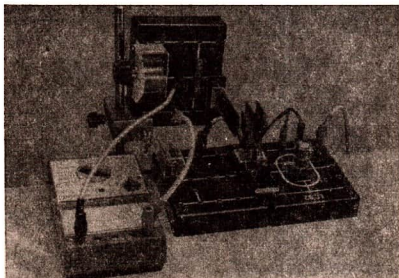


Abb. 3.1.12./1
Versuchsaufbau mit dem SEG

winkels des Kondensators und damit als Funktion der Eigenfrequenz des Resonanzkreises fest. Ein Beispiel einer Meßreihe ergibt die nachstehende Tabelle:

Drehwinkel in °	Zeigerausschlag in Skalenteilen
0	2
20	3
40	5
60	11
80	31
100	26
120	15
140	10
160	8
180	5

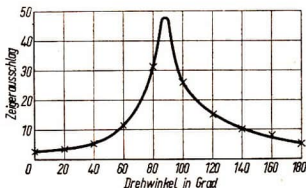


Abb. 3.1.12./2 Resonanzkurve

Nach ihr ist die Resonanzkurve (Abb. 3.1.12./2) gezeichnet. Die Resonanzkurve ist auch mit einem Katodenstrahloszillografen aufzunehmen. An Stelle des Zeigerauschlages des Meßgerätes wird die Bildhöhe des Oszillogramms verwendet.



3.1.13. Bestimmen der Frequenz durch Vergleich mit einer bekannten Frequenz

Zu Variante a

Geräte wie bei V 3.1.7., V 3.1.8., V 3.1.9. oder V 3.1.10.

Zu Variante b

Geräte wie bei V 3.1.7. b oder V 3.1.9. a und

16. U-Kern, geblättert
17. I-Kern, geblättert
18. Spule (125/250 Wdg.)
19. Spule (750/1500 Wdg.)
20. Schiebewiderstand (28 Ω)

21. Glimmlampenzillograf mit Drehspiegel nach 9. Teil, V 4.1.3.

22. Spule (15000 Wdg.)

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Variante a: Vergleich mit der Kippfrequenz eines Katodenstrahlzillografen

In allen Schaltungen nach V 3.1.7. bis V 3.1.10. kann man die Schwingungen mit dem Katodenstrahlzillografen abbilden. Für die verschiedenen Frequenzen ist dazu die Kippschwingung so einzustellen, daß stehende Bilder mit einer leicht abzählbaren Anzahl von Schwingungsperioden entstehen. Aus dem eingeschalteten Kippfrequenzbereich kann man die Größenordnung der Frequenz der erzeugten Schwingung abschätzen.

Kontinuierliche Frequenzänderungen können durch Verschieben des Eisenkerns oder Einstellung des Drehkondensators herbeigeführt werden. Vergrößert oder verkleinert man die Frequenz, bis nach laufenden Bildern wieder ein stehendes Bild entsteht, so erkennt man, daß sich die Anzahl der abgebildeten Perioden um eine vergrößert bzw. verkleinert hat.

Variante b: Vergleich mit der Netzfrequenz von 50 Hz

Nach V 3.1.7., Versuch 1, oder V 3.1.9., Versuch 2, wird ein Röhrengenerator zur Erzeugung einer tonfrequenten Schwingung aufgebaut. (Schwingkreisspule 1500 Wdg., Schwingkreiskondensator $0,1 \mu\text{F}$... $1 \mu\text{F}$). (Abb. 3.1.13./1).

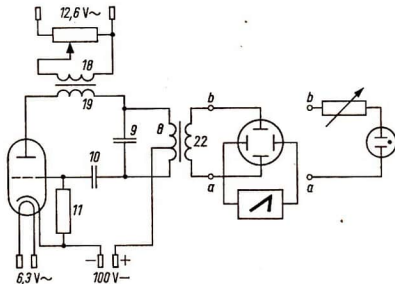


Abb. 3.1.13./1
Schaltung zur Modulation einer
Tonfrequenz mit 50 Hz

In die Anodenleitung wird die Sekundärspule eines Aufbautrafos mit 750 Wdg. gelegt. Die Primärspule mit 250 Wdg. wird über einen Spannungsteiler an die Wechselspannung 12,6 V; 50 Hz aus dem Stromversorgungsgerät angeschlossen. Dadurch wird die erzeugte Schwingung moduliert.

Die modulierte Schwingung wird auf dem Bildschirm des Katodenstrahlzillografen abgebildet. Die Kippfrequenz wird so eingestellt, daß das Bild steht und daß man auszählen kann, wie viele Perioden der Schwingung auf eine Periode der Netzfrequenz entfallen.

Man kann an Stelle des Katodenstrahloszillografen nach V 3.1.11. auch einen Glimmlichtoszillografen verwenden. In der Dreipunktschaltung ist es dabei zweckmäßig, die Glimmlampe über den Einstellwiderstand an eine Spule mit 15000 Wdg. anzuschließen, die auf den freien Schenkel des U-Kerns gesetzt wird.

Bemerkungen

1. Das gleiche Verfahren kann man für höhere Frequenzen anwenden, indem man eine Modulation mit einer bekannten Tonfrequenz von einer Stimmgabel über ein Kristallmikrofon mit Vorverstärker ausführt.
2. Es ist auch möglich, vom Lautsprecher her in einer Kundtschen Röhre Staubfiguren zu erzeugen und daraus die Frequenz der Schwingung zu bestimmen. Siehe V 1.3.23.!



3.1.14. Frequenzmessung durch Bestimmen des kapazitiven Widerstandes

1. Stromversorgungsgeräte (250 V—; 6,3 V~; 20 V~)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
3. Röhrenbrett
4. 3 Spulen (1500/750 Wdg.)
5. 2 U-Kerne, geblättert
6. 2 I-Kerne, geblättert
7. Kondensator (5000 pF)
8. Kondensator (0,01 µF ... 0,25 µF)
9. Widerstand (5 kΩ)
10. Widerstand (100 kΩ)
11. Potentiometer (200 kΩ)
12. Schulverstärker
13. Spule (250/125 Wdg.)
14. Kondensator (1 µF)
15. Strommesser (60 mA~)
16. Spannungsmesser (30 V~)
17. Katodenstrahloszillograf

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Vorversuch

Nach Abbildung 3.1.14./1 wird ein Kondensator an eine Wechselspannung von etwa 20 V und 50 Hz angeschlossen. Aus der Spannungs- und Stromstärkemessung wird der Scheinwiderstand berechnet, der praktisch gleich dem kapazitiven Blindwiderstand ist:

$$X_C = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}$$

Daraus wird die Kapazität des Kondensators berechnet:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} \quad \text{mit } \omega = 100\pi \text{ s}^{-1}.$$

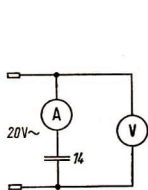


Abb. 3.1.14./1
Bestimmen des kapazitiven Widerstandes

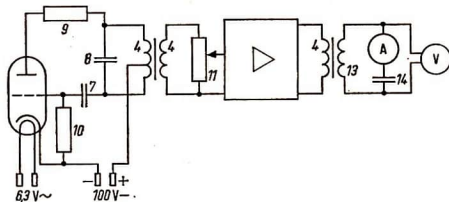


Abb. 3.1.14./2
Schaltplan der Versuchsanordnung

Versuchsanordnung

Nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.14./2 wird ein Dreipunktgenerator zur Erzeugung einer Tonfrequenz aufgebaut. Auf den freien Schenkel des U-Kerns wird eine Spule von 1500 Wdg. gesetzt und über ein Potentiometer an den Eingang des Schulverstärkers angeschlossen. Der Verstärker wird auf eine mittlere Verstärkungsstufe geschaltet. An seinen hochohmigen Ausgang wird über einen Transformator aus Aufbauteilen der Kondensator mit Strom- und Spannungsmesser angeschlossen, dessen Kapazität im Vorversuch bestimmt worden ist.

Versuch

Nach dem Einschalten der Heiz- und Anodenspannung für den Generator und den Verstärker entsteht eine tonfrequente Schwingung, die man durch Verschieben des Eisenkerns und Auswechseln des Schwingkreiskondensators verändern kann. Die Schwingung wird so verstärkt, daß man am Kondensator eine gut meßbare Spannung und Stromstärke erhält.

Die Ankopplung an den Verstärker und die Verstärkung müssen mit den Potentiometern vor und am Verstärker so eingestellt werden, daß die Schwingung sinusförmig bleibt. Dies wird am Oszillografen beobachtet.

Aus der bekannten Kapazität, der Spannung und der Stromstärke am Kondensator ist die Frequenz zu berechnen:

$$f = \frac{I_{\text{eff}}}{2\pi \cdot C \cdot U_{\text{eff}}}$$

Bemerkungen

1. Bei konstanter Spannung ist $I_{\text{eff}} \sim f$. Legt man zunächst die Netzfrequenz mit 50 Hz an das Potentiometer vor dem Verstärker und stellt mit ihm die Ausgangsspannung so ein, daß der Anschlag des Strommessers 50 Skalenteile beträgt, so kann man am Strommesser unmittelbar die Frequenz ablesen, wenn man bei Frequenzänderung immer wieder die gleiche Ausgangsspannung einstellt.

2. Die Versuchsanordnung ist auch gut dazu geeignet, die Frequenzabhängigkeit des kapazitiven und induktiven Widerstandes nachzuweisen. Durch Auszählen der Schwingungsperioden (P_1) auf dem Bildschirm des Oszillografen kann man bei unveränderter Kippfrequenz die Verhältniszahlen verschiedener Frequenzen bestimmen. Für einen Kondensator ergibt sich

$$\frac{X_{C_1}}{X_{C_2}} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{P_2}{P_1},$$

und für eine Spule mit zu vernachlässigendem Ohmschen Widerstand

$$\frac{X_{L_1}}{X_{L_2}} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{P_1}{P_2}.$$

3. Der Schulverstärker neigt zu Verzerrungen. Darum ist es zu empfehlen, in ihm den Eingangskondensator und den Koppelkondensator zwischen den beiden Verstärkerstufen gegen Kondensatoren mit $0,1 \mu\text{F}$ auszutauschen. Die Zuleitungen zum Verstärker müssen möglichst kurz gehalten werden.



3.1.15. Erzeugen von Kippschwingungen mit Hilfe einer Glimmlampe

1. Stromversorgungsgerät (250 V—)
2. Glimmlampe (220 V) in Fassung (E 27) auf Brett
3. 2 Widerstände (1 M Ω)
4. Widerstand (500 k Ω)
5. verschiedene Kondensatoren zwischen 2 μF und 200 pF
6. Lautsprecher, hochohmig
7. Katodenstrahloszillograf
8. Schalter
9. Hebelumschalter

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchsanordnung

Die Anordnung erfolgt nach Abbildung 3.1.15./1. Der Lautsprecher kann bei Bedarf eingeschaltet werden.

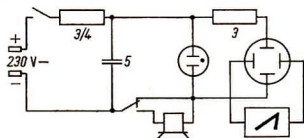


Abb. 3.1.15./1 Nachweis der Kippschwingungen durch einen Lautsprecher und durch einen Katodenstrahloszillografen

Versuch

Man nimmt zunächst Kondensatoren von hoher Kapazität (2 μF). Dann ist die entstehende Kippfrequenz so niedrig, daß man die Schwingungen am Aufblinken

der Glimmlampe beobachten kann. Die Spannung wird, mit 150 V beginnend, bis maximal 250 V gesteigert, bis die Schwingung einsetzt. Beim Verringern der Kapazität steigt die Frequenz, so daß das Blinken nicht mehr beobachtbar ist. Dann ist der Lautsprecher einzuschalten; die Kippschwingungen können als Ton wahrgenommen werden. Tauscht man den Widerstand von 1 M Ω gegen einen solchen von 500 k Ω aus, so steigt die Frequenz ebenfalls.

Mit einem Katodenstrahloszillografen kann man den Verlauf der Kippschwingungen sichtbar machen.



3.1.16. Erzeugen von Rechteckimpulsen durch einen instabilen Multivibrator in Röhrenschtaltung

1. Stromversorgungsgerät (150 V—; 6,3 V~)
2. 2 Trioden oder Pentoden in Triodenschaltung
3. 2 Röhrenbretter für Trioden
4. 2 Widerstände (1 M Ω)
5. 2 Kondensatoren (200 pF)
6. Widerstand (400 k Ω)
7. Widerstand (50 k Ω)
8. Katodenstrahloszillograf
9. Schalter

Methodische Hinweise

1. Die phasenrichtige Rückkopplung erfolgt hier durch einen zweiten Verstärker. Sie erfolgt aber für alle Frequenzen, so daß Rechteckschwingungen entstehen. Die Schaltung ist vollkommen symmetrisch. Der eine Verstärker schaltet immer den anderen aus.
2. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchsanordnung

Ein Multivibrator ist ein aus zwei Röhren bestehender Widerstandsverstärker, bei dem je eine Anode durch einen Kondensator mit dem Gitter der anderen Röhre verbunden ist. Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 3.1.16./1. Dabei ist darauf zu ach-

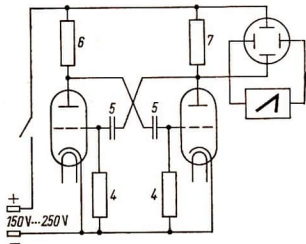


Abb. 3.1.16./2 Oszillogramm der Rechteckimpulse

Abb. 3.1.16./1 Schaltplan eines Multivibrators

ten, daß sich die Verbindungsleiter nicht berühren, damit keine Fehlkopplungen entstehen. Diese äußern sich in einer Verzerrung des Impulsbildes. Die Spannung beträgt 100 V bis 150 V.

Versuch

Rechteckimpulse, wie die hier erzeugten (Abb. 3.1.16./2), spielen in der Elektronik eine große Rolle. Die Frequenz der entstehenden Schwingung hängt von der Zeitkonstanten ab. Diese ist durch die Größe der Widerstände und durch die Größe der Kondensatoren gegeben. Es gilt für die Zeitkonstante τ die hier ohne Beweis mitgeteilte Gleichung

$$\tau = R \cdot C .$$

3.1.17. Der astabile Multivibrator mit Transistoren

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (12 V)
2. 2 Transistoren (200 mW)
3. 2 Widerstände (5 k Ω)
4. 2 Widerstände (100 k Ω)
5. 2 Kondensatoren (200 pF ... 0,5 μ F)
6. Katodenstrahloszilloskop
7. Kopfhörer

Zu Variante b

- Geräte 1. und 2., außerdem
8. 2 Widerstände (100 Ω)
 9. 2 Glühlampen (4 V; 0,05 A oder 6 V; 0,1 A)
 10. 2 Kondensatoren (200 μ F ... 5000 μ F) Ⓢ

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Man kann den Aufbau entwickeln, indem man zwei einstufige Transistorverstärker koppelt. Man verbindet dazu den Ausgang jedes Verstärkers (Kollektor) mit dem Eingang (Basis) des anderen durch einen Kondensator.
3. Der astabile Multivibrator dient zur Erzeugung von Rechteckspannungen (Prüfspannung) oder zur Herstellung von Blinkerschaltungen (Variante b).

Versuchsdurchführung

Variante a

Die gegenständliche Anordnung erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.17./1. Die Abbildung 3.1.17./2a und 2b zeigen einen Aufbau mit dem SEG bzw. mit Bauteilen auf einer Gummibuchsenplatte.

Durch Verändern der Kapazitäten kann man die erzeugte Frequenz wesentlich verändern. Im Bereich von 200 pF bis 0,5 μ F erhält man eine tonfrequente Schwin-

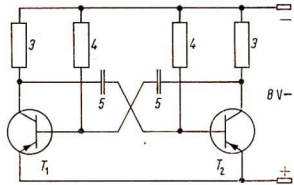


Abb. 3.1.17./1 Astabiler Multivibrator
(Grundschaltung)

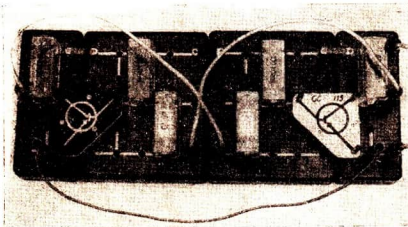


Abb. 3.1.17./2a Aufbau nach Schaltplan 3.1.17./1 mit den Teilen der SEG

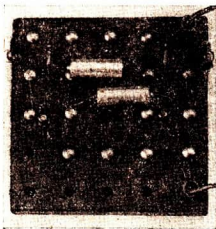


Abb. 3.1.17./2b Aufbau nach Schaltplan
3.1.17./1 auf einer Gummibuchsenplatte

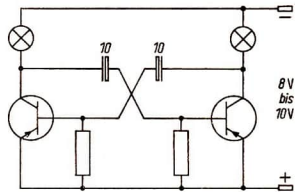


Abb. 3.1.17./3 Astabiler Multivibrator
als Blinkschaltung

gung. Diese kann man mit dem Oszillograf oder mit Kopfhörern nachweisen, die parallel zu einem Widerstand 3 anzuschließen sind.

Variante b

Der Aufbau erfolgt nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.17./3. Die Anzeige geschieht durch Glühlampen.

3.1.18. Erzeugen harmonischer Schwingungen durch RC-Phasenschieberkette

1. Stromversorgungsgerät (6 V ... 12 V—)
2. 3 Widerstände (2 k Ω)
3. Widerstand (50 k Ω)
4. Einstellwiderstand (100 k Ω)
5. 3 Kondensatoren (0,1 μ F)
6. 2 Transistoren (200 mW)
7. Katodenstrahlloszillograf
8. Kopfhörer

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Durch die Kombination von Ohmschen und kapazitiven Widerständen wird das auf den Eingang zurückgekoppelte Ausgangssignal um 180° phasenverschoben.

Versuch

Nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.18./1 wird der Versuch aufgebaut.

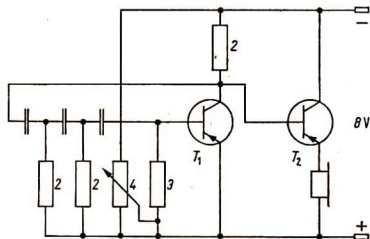


Abb. 3.1.18./1 R-C-Phasenschieberkette

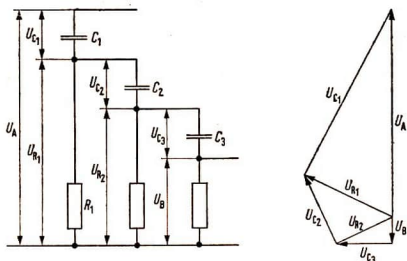


Abb. 3.1.18./2 R-C-Phasenschieberkette: links: Spannungen an den einzelnen Gliedern, rechts: Darstellung der Spannungen im Zeigerdiagramm

Der zweite Transistor dient zur Verstärkung. Parallel zu ihm kann ein Oszillograf angeschlossen werden. Die Schwingung ist sinusförmig, weil die Rückkopplungsbedingung nur für eine Frequenz erfüllt ist (Abb. 3.1.18./2). Ändert man den ersten Widerstand etwas, so erhält man eine andere Frequenz. Den Mittelabgriff des Einstellwiderstandes von $100\text{ k}\Omega$ stellt man zuerst auf den positiven Pol der Spannungsquelle ein. Nach dem Einschalten dreht man ihn langsam in Richtung Minuspol, bis die Schwingung einsetzt.

3.1.19. Der monostabile Multivibrator

1. Stromversorgungsgerät (12 V—)
2. 2 Widerstände ($2\text{ k}\Omega$)
3. 2 Widerstände ($5\text{ k}\Omega$)
4. Kondensator ($50\text{ }\mu\text{F}$... $1000\text{ }\mu\text{F}$)
5. Kondensator ($1\text{ }\mu\text{F}$)
6. Ein-Taster
7. Glühlampe (4 V; 0,05 A oder 6 V; 0,1 A)
8. 2 Transistoren

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Obwohl hier keine Schwingungen erzeugt werden, steht der Versuch an dieser Stelle, weil es methodisch zweckmäßig ist, den monostabilen Multivibrator aus dem astabilen zu entwickeln. Er unterscheidet sich vom letzten dadurch, daß die eine Kopplung über einen Widerstand erfolgt.
3. Eine Anwendung des monostabilen Multivibrators ist das Zeitverzögerungsglied. Erst nach der Zeit von etwa $0,7 R_3 \cdot C_4$ kommt ein Eingangsimpuls zur Wirkung.
4. Der monostabile Multivibrator dient weiterhin als Impulsformer, das heißt unabhängig von der Form und in gewissen Grenzen auch von der Größe des Eingangsimpulses ist der Ausgangsimpuls immer gleich. So können beispielsweise unterschiedliche Zählrohrimpulse immer den gleichen Beitrag zum Meßwert liefern.

Versuch

Der monostabile Multivibrator wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.19./1 aufgebaut. Über den Widerstand von $5\text{ k}\Omega$ und den Kondensator von $1\text{ }\mu\text{F}$ wird

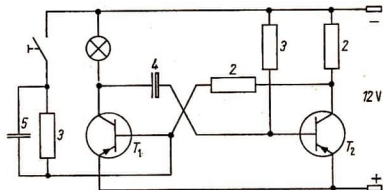


Abb. 3.1.19./1
Monostabiler Multivibrator

durch den Ein-Taster der negative Impuls gegeben, der den Multivibrator aus seinem stabilen Zustand heraus in einen anderen kippt. Vorübergehend wird Transistor 1 leitend, die Lampe brennt und Transistor 2 sperrt. Das hält an, bis sich der Kondensator 4 entladen hat. Die Zeit dieses Zustandes kann durch die Wahl der Kapazität des Kondensators 4 verändert werden.

3.1.20. Der bistabile Multivibrator

1. Ein-Taster
2. Widerstand (100 k Ω)
3. 3 Transistoren
4. 2 Widerstände (2 k Ω)
5. 2 Widerstände (5,1 k Ω)
6. 2 Widerstände (39 k Ω)
7. 3 Kondensatoren (0,1 μ F)
8. 2 Dioden
9. Glühlampe (4 V; 0,05 A oder 6 V; 0,1 A)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Der bistabile Multivibrator dient als Frequenzteiler.
3. Identifizieren wir das Leuchten der Lampe mit „Ziffer 1“ und das Nichtleuchten als „Ziffer 0“, so demonstrieren wir die Anwendung des bistabilen Multivibrators als Dualspeicher (Teil der digitalen Rechner).

Versuch

Der bistabile Multivibrator wird nach dem Schaltplan in Abbildung 3.1.20./1 aufgebaut. Durch Betätigen des Ein-Tasters wird ein negativer Impuls an der Basis desjenigen Transistors (T_1 oder T_2) wirksam, der bisher gesperrt war. Durch diesen Impuls öffnet der Transistor, die Spannung bricht an ihm zusammen, und der über

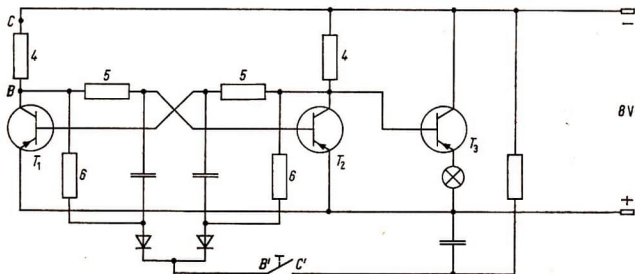


Abb. 3.1.20./1 Bistabiler Multivibrator

den Koppelwiderstand verbundene zweite Transistor sperrt. Der nächste negative Impuls wirkt sich auf den gesperrten Transistor aus und öffnet ihn, wodurch der andere sperrt. Der dritte Transistor dient nur zum Verstärken der Signale. Die Lampe leuchtet nur bei jedem zweiten Impuls (Frequenzteilung). Sind mehrere bistabile Multivibratoren unabhängig voneinander aufgebaut, lassen sie sich koppeln. Dazu müssen die Punkte B und C des ersten mit B' und C' des zweiten Multivibrators verbunden werden. So entsteht eine Zählkette zur elektronischen Darstellung von Dualzahlen.

3.1.21. Der Schmitt-Trigger zur Umformung einer harmonischen Schwingung in eine Rechteckschwingung

1. Stromversorgungsgerät (6 V—; 4 V~)
2. 2 Transistoren
3. 3 Widerstände (2 k Ω)
4. 3 Widerstände (5 k Ω)
5. Widerstand (100 Ω)
6. Drehwiderstand (100 k Ω)
7. 2 Kondensatoren (0,1 μ F)
8. Glühlampe (4 V; 0,05 A oder 6 V; 0,1 A)

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Der Schmitt-Trigger wird zunächst als Impulsformer eingesetzt. Hierbei wird aus sinusförmiger Wechselspannung eine Rechteckspannung erzeugt.
3. Der Schmitt-Trigger arbeitet auch als Schwellwertschalter (Dämmerungsschalter, Zeitvorwahlschalter bei fotografischer Belichtungsuhr).

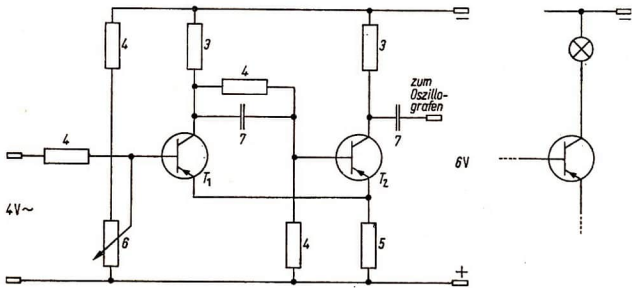


Abb. 3.1.21./1 Schmitt-Trigger, Nebenbild: Schaltung der Glühlampe

Versuch

Der Aufbau erfolgt nach Schaltplan in Abbildung 3.1.21./1. Danach kommt in die Kollektorleitung des Transistors T_2 die Glühlampe. Der Schleifkontakt des Drehwiderstandes liegt zunächst am positiven Pol der Spannungsquelle. Verstellt man ihn, so erreicht man einen Punkt (Schwellwert), an dem die Glühlampe aufleuchtet. Sie verlöscht wieder, wenn man den Drehwiderstand zurückstellt.

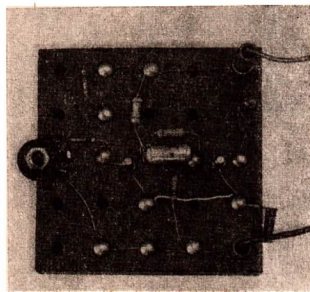


Abb. 3.1.21./2
Schmitt-Trigger auf einer Gummibuchsenplatte

Legt man dann nach dem Schaltplan eine Wechselfspannung an den Eingang und schließt einen Oszillografen an den Ausgang, so erhält man am Ausgang Rechteckschwingungen, wenn der Drehwiderstand entsprechend eingestellt wurde.



3.2. Die Ausbreitung Hertzscher Wellen

3.2.1. Aufbau und Betrieb von UHF-Generatoren

Zu Variante a

1. Stromversorgungsgerät (250 V—; 6,3 V~)
2. Hartpapierplatte (120 mm × 100 mm × 5 mm)
3. Röhre (EC 92, EL 83, EF 80)
4. Röhrenfassung
5. Kupferdraht (10 mm²)
6. Kupferdraht (∅ 0,5 mm)
7. Trimmer (15 pF ... 40 pF)
8. Widerstand (1 kΩ)
9. Potentiometer (10 kΩ)
10. 4 Telefonbuchsen
11. 1 Schraube M 4 mit Mutter
12. 2 Schrauben M 3 mit Muttern
13. Strommesser (30 mA—)
14. Schalter

Zu Variante b

Geräte 1., 3., 13. u. 14. wie bei Variante a, außerdem

15. Schaltplatte

16. Röhrenbrett

17. Kondensator (20 pF ... 100 pF)

18. Widerstand (2 k Ω ... 10 k Ω) oder Potentiometer (10 k Ω)

19. HF-Spule (100 Wdg.)

20. Schwingbügel

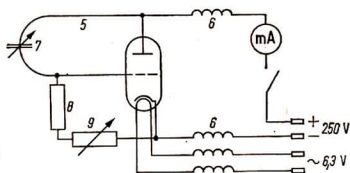
Methodische Hinweise

1. UHF-Generatoren können dazu dienen, die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen auf engem Raum zu demonstrieren.
2. Für ihren Betrieb sind die Funk-Entstörungsvorschriften zu beachten, vergleiche MB 3.0.1.!

*Aufbau von UHF-Generatoren**Variante a: Selbstbau des UHF-Generators*

Der Schaltung nach Abbildung 3.2.1./1 liegt eine Dreipunktschaltung zugrunde. Dabei besteht die Schwingkreisspule in einer einzigen Windung, dem Schwingbügel. Die Kapazität liegt in der Gitter-Anodenkapazität der Röhre und in der Leitungsführung. Der Kondensator am Gitter hält die Gleichspannung vom Gitter fern. Die negative Gitterspannung wird durch einen Widerstand von 10 k Ω ... 15 k Ω erzeugt. Die Zuleitungen von der Spannungsquelle zur Anode und zur Katode werden mit HF-Drosseln ausgerüstet, um ein Abfließen der Schwingungsenergie zu verhindern. Aus dem gleichen Grunde können auch in die Heizungsleitungen HF-Drosseln eingesetzt werden.

Abb. 3.2.1./1
Schaltplan eines UHF-Generators



Als Röhren sind geeignet: EC 92, EF 80, EL 83. Im Interesse einer einfachen Schaltung sind die Pentoden als Trioden zu schalten (s. MB 3.0.1.).

Der Aufbau erfolgt auf einem Hartpapierbrett etwa in der Art nach Abbildung 3.2.1./2 in möglichst gedrängter Form. Der Schwingbügel wird aus Kupferdraht (10 mm²) gebogen, so daß er einen Durchmesser von etwa 3 cm bekommt. Es wird ein Stück herausgeschnitten und der Trimmer eingelötet. Schließlich lötet man ihn an die Lötflächen der Röhrenfassung (g, a) an. Die HF-Drosseln werden aus Kupferdraht (\varnothing 0,5 mm) gefertigt, indem man etwa 20 Wicklungen um einen runden Bleistift legt. Die Frequenz hängt von dem Röhrentyp und von der Form des Schwingbügels ab. Sie kann in gewissen Grenzen durch den keramischen Trimmer eingestellt werden. Sie soll möglichst genau 433,92 MHz betragen, das entspricht

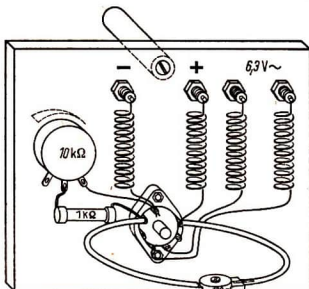


Abb. 3.2.1./2 Aufbau eines UHF-Generators im Selbstbau mit EC 92

einer Wellenlänge von 0,692 m (s. MB 3.0.1. und 3.0.2.). Das ist am besten mit der EC 92 zu erreichen.

Variante b: Aufbau mit Unterrichtsmittelsätzen

In der Abbildung 3.2.1./3 werden Möglichkeiten gezeigt, die Schaltung nach Abbildung 3.2.1./1 mit Unterrichtsmittelsätzen für HF-Technik aufzubauen. Bei diesen Anordnungen erhält man allerdings durch die längeren Leitungen kleinere Frequenzen.

Den für die verwendete Röhre zweckmäßigen Kondensator und Widerstand findet man durch Erprobung in den angegebenen Grenzen der Werte.

Für die EL 83 erwiesen sich 50 pF und 5,1 kΩ als günstig. Die Wellenlänge liegt dann zwischen 3 m und 4 m.

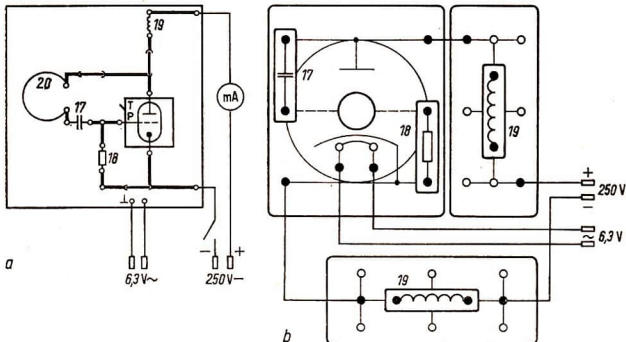


Abb. 3.2.1./3 Aufbau von UHF-Generatoren: a) EMB-Hochfrequenzsatz, b) SEG Halbleiter-Hochfrequenzelektronik

Betrieb von UHF-Generatoren

Zunächst wird die Röhre geheizt, dann schaltet man die Anodenspannung ein und stellt die Gitterspannung so ein, daß maximale Schwingungen auftreten. Das Auftreten der Schwingungen kann man feststellen, indem man mit einer Glimmlampe den an die Anode angeschlossenen Teil des Schwingbügels berührt. Durch die HF-Schwingungen leuchten beide Elektroden hell auf.

Um eine möglichst große Schwingungsenergie zu erhalten, kann man die Röhren kurzzeitig mit einer Anodenspannung von 300 V überlasten, das kommt besonders bei Verwendung leistungsschwacher Röhren in Frage. Die Anodenstromstärke überwacht man mit einem Strommesser. Es ist auf jeden Fall darauf zu achten, daß Gitter und Anodenblech nicht zu glühen beginnen.



3.2.2. Nachweis der UHF-Schwingungen durch einen induktiv gekoppelten Schwingkreis

Geräte wie bei V 3.2.1., außerdem

21. Koppelbügel Ⓢ oder EMB-Satz
22. Glühlampe auf Steckerbrett (3,8; 0,07 A)
23. Drehkondensator (500 pF)
24. Buchsenplatte Ⓢ

Methodischer Hinweis

Die Versuche sollen zunächst zeigen, daß der UHF-Generator elektromagnetische Schwingungen erzeugt.

Vorbemerkungen

Der Versuch wird mit einem UHF-Röhrengenerator nach V 3.2.1. durchgeführt. Einen Koppelbügel, der auch für die folgenden Versuche gebraucht wird, kann man aus einem etwa 4 mm dicken Kupferdraht anfertigen (Abb. 3.2.2./1). Er soll etwa die gleiche Größe haben wie der Schwingbügel des Generators aus V 3.2.1.



Abb. 3.2.2./1 Koppelbügel

Versuch 1: Verwenden eines nicht abstimmbaren Schwingkreises

Der Koppelbügel, ein Verbindungsstecker und eine Kleinspannungsglühlampe mit möglichst geringer Leistung werden auf eine Buchsenplatte gesteckt, so daß ein Schwingkreis entsteht. Nach dem Einschalten des Generators nähert man diesen Schwingkreis dem Schwingbügel, wobei die Ebenen der Bügel parallel zu halten sind. Die Glühlampe leuchtet auf (Abb. 3.2.2./2). Man entfernt den Schwingkreis langsam vom Schwingbügel: Die Lichtstärke der Glühlampe nimmt rasch ab.

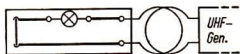


Abb. 3.2.2./2
Nicht abstimmbarer Schwingkreis,
an UHF-Generator gekoppelt

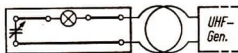


Abb. 3.2.2./3
Abstimmbarer Schwingkreis,
an UHF-Generator gekoppelt

Versuch 2: Verwenden eines abstimmbaren Schwingkreises

Man ersetzt den Verbindungsstecker durch einen Drehkondensator und erhält einen abstimmbaren Kreis (Abb. 3.2.2./3). Der Schwingkreis wird dem Schwingbügel des Generators genähert und der Drehkondensator langsam verstellt. Es ist deutlich bei Resonanz maximale Helligkeit zu erkennen. In größerer Entfernung vom Schwingbügel wird die Resonanzstelle immer deutlicher erkennbar. Bei Resonanzeinstellung sind die Schwingungen noch in wesentlich größerer Entfernung vom Generator nachweisbar als in Versuch 1.

Bemerkungen

1. Koppelbügel und Glühlampe bilden mit den Verbindungsleitungen den Sekundärkreis eines UHF-Transformators. Für die ultrahochfrequenten Wechselströme ist aber der Widerstand des aus einer Windung bestehenden Bügels so groß, daß die an den Enden induzierte Spannung zum Betrieb der Glühlampe ausreicht.
2. Steht nur ein UHF-Generator geringerer Leistung zur Verfügung, so ersetzt man die Glühlampe durch ein Drehspulmeßgerät mit Meßgleichrichter. Den Meßbereich wählt man zwischen 1 mA und 30 mA entsprechend der im Schwingkreis auftretenden Stromstärke.
Diese Versuchsvariante ist exakter als der Einsatz einer Glühlampe, da in der Glühlampe eine kleine Stromstärke fließen kann, ohne daß die Lampe leuchtet. Die Glühlampe läßt sich hingegen einfacher handhaben und wirkt eindrucksvoller auf die Schüler.



3.2.3. Einfluß von Leitern und Isolatoren auf das elektromagnetische Feld

Geräte wie zu V 3.2.1. und V 3.2.2., außerdem

25. Platten aus Holz, Pappe, Plast; Aluminium, Kupfer, Eisen und engmaschiges Drahtnetz

Methodischer Hinweis

Es wird die Schirmwirkung von Metallen und die Durchlässigkeit von Nichtleitern gezeigt.

Versuch

Nach V 3.2.1. wird ein UHF-Röhrengenerator und nach V 3.2.2. ein Resonanzkreis zusammengestellt. Der Resonanzkreis wird an einem Holzstativ befestigt und in einer bestimmten Entfernung vom Generator aufgestellt, so daß die Glühlampe noch gut sichtbar leuchtet. Zwischen den Schwingbügel und den Resonanzkreis

werden Platten aus verschiedenen Materialien gebracht. Bei den Isolatoren leuchtet die Glühlampe unverändert weiter, bei den Leitern verlischt sie. Das elektromagnetische Feld wird durch Isolatoren nicht wesentlich beeinflusst; durch Leiter hindurch breitet es sich nicht aus.

Bemerkungen

1. Die Schirmwirkung, die durch metallische Körper ausgeübt wird, ist für die Technik von großer Bedeutung. So werden Elektronenröhren, Kondensatoren, Spulen durch Mäntel aus Metallblech gegen störende Einflüsse von außen geschützt. Bei Kabeln erreicht man die Schirmwirkung, indem man sie mit einem Metallgeflecht umgibt.
2. Auch bei diesem Versuch kann man wie in V 3.2.2., Bemerkung 2, mit einem Meßgerät arbeiten.



3.2.4. Elektrische Wellen auf einem geschlossenen Lechersystem

1. Stromversorgungsgerät (150 V – ; 6,3 V ~)
2. UHF-Generator nach V 3.2.1. ⑧
3. Lecherleitung ⑧,
dazu benötigtes Material:
Messingdraht (2 m lang, \varnothing 4 mm), 2 Teleskopantennen,
2 Bananenstecker, 2 Telefonbuchsen, 2 zweiseitige Bananenbuchsen
4. Koppelbügel ⑧
5. Koppelbügel mit Lampenfassung (E 10) ⑧
6. 2 Gleitstücke ⑧,
dazu benötigtes Material:
2 Hartpapierstücke (2,5 mm \times 55 mm \times 5 mm), 8 Telefonbuchsen, Blech 0,5 mm dick,
2 Schrauben M4 mit Muttern
7. 3 Leitungshalter ⑧,
dazu benötigtes Material:
3 Hartpapierplatten (50 mm \times 105 mm \times 5 mm), 2 Telefonbuchsen
8. Plattenhalter
9. 2 Glühlampen auf Steckerbrett (3,8 V; 0,07 A)
10. Glimmlampe auf Steckerbrett
11. Germaniumdiode auf Steckerbrett
12. Drehspulmeßgerät (2 mA)
13. Plaststäbe (\varnothing 13 mm)
oder für 2. bis 11. Teile von Aufbausätzen

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Es werden die stehenden elektromagnetischen Wellen nachgewiesen, und ihre Wellenlänge kann bestimmt werden.

Vorbemerkungen

Der Versuch wird mit einem UHF-Generator nach V 3.2.1. durchgeführt. Falls kein Lecherleitungssystem aus einem Lehrmittelsatz zur Verfügung steht, so ist dieses im Selbstbau herzustellen, und zwar aus folgenden Einzelteilen:

1. Zwei Drähte aus Messing (1000 mm lang, 4 mm \varnothing) werden mit ihrem Ende in je eine Telefonbuchse gesteckt und mit ihr verlötet. Man kann auch passenden Kupfer- oder Stahldraht verwenden.
2. Im Fachhandel werden Teleskopantennen für Kofferrundfunkgeräte angeboten. Man wählt solche mit möglichst kurzen Einzelteilen, entfernt den unteren Verschluss und lötet einen Bananenstecker, am besten Laborstecker, ein. Für einige Versuche mit Dipolen werden 4 dieser Antennen benötigt.

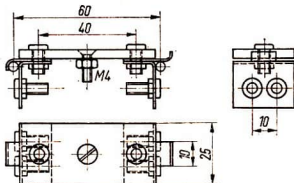
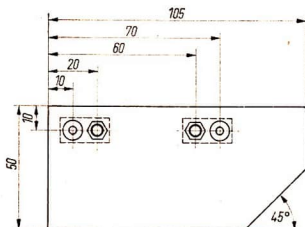


Abb. 3.2.4./2 Gleitstück

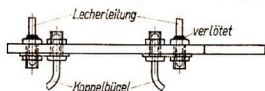


Abb. 3.2.4./1 Leitungshalter:

Ein Halter nach Nebenbild mit Telefonbuchsen und Blechstreifen, ein Halter mit Bohrungen (\varnothing 4 mm) und ein Halter mit Bohrungen nach Durchmesser der Teleskopantennen, Abstand 60 mm

3. Nach Abbildung 3.2.4./1 werden aus Hartpapier 3 Leitungshalter gefertigt, die horizontal, vertikal oder unter einer Neigung von 45° in Kreuzklemmen an nichtleitenden Stativstäben eingespannt werden können.
4. Nach Abbildung 3.2.4./2 sind 3 Gleitstücke aus Hartpapier und Blech zu fertigen. Diese Gleitstücke können Glimmlampen, Glühlampen, Koppelbügel und Dioden auf Steckerbrettchen oder einen Verbindungsstecker (40 mm) aufnehmen. An die seitlichen Buchsen können ein Meßgerät angeschlossen und Dipolteile eingesetzt werden. Auf die Schraube M 4 kann ein Plattenhalter geschraubt werden, so daß die Gleitstücke auch als Dipolhalter zu verwenden sind.
5. Nach Abbildung 3.2.4./3 werden zwei Koppelbügel aus Draht (4 mm \varnothing) gebogen, in den einen wird eine Lampenfassung (E 10) eingelötet. Der Durchmesser der Bügel muß etwa dem Bügeldurchmesser am Generator gleich sein. Der Aufbau der Lecherleitung erfolgt nach der schematischen Darstellung in Abbildung 3.2.4./4. Die Isolierstangen (13) werden sicher durch Tischklemmen gehalten. Die Leitungsteile werden mit den Teleskopantennen durch zweiseitige Bananenbuchsen oder kurze Messingrohre verbunden. Nach dem Nebenbild zu Abbildung 3.2.4./1 werden die Leitungsstücke mit dem ersten Plattenhalter verschraubt und der Koppelbügel eingesetzt.

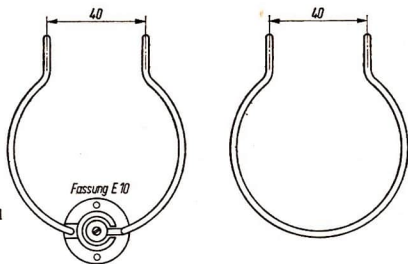
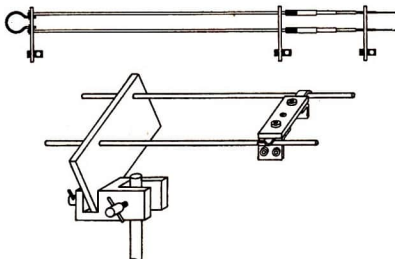


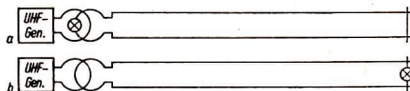
Abb. 3.2.4./3 Koppelbügel

Abb. 3.2.4./4
Aufbau der Lecherleitung

Versuch 1: Abstimmen des Lechersystems durch Längenveränderung — Geschlossener Schwingkreis

Versuchsanordnung

Die Teile der Lecherleitung werden nach Abbildung 3.2.4./5 zusammengestellt. Die Enden der Leitungen werden durch einen Kurzschlußbügel verbunden. Am Anfang der Leitungen wird der Koppelbügel mit Glühlampe eingesetzt. Die Lecherleitung wird mit dem Generator dadurch gekoppelt, daß die beiden Bügel einander genähert werden, wobei die Schwingbügel- und die Koppelbügelebene einander parallel liegen (Abb. 3.2.4./5a).

Abb. 3.2.4./5
Abstimmung der
geschlossenen Lecherleitung

Versuchsdurchführung

Der Generator wird eingeschaltet und die Länge des Lechersystems durch Ausziehen der Antennenteile so verändert, daß die Glühlampe maximal aufleuchtet. Dann

wird ein Koppelbügel ohne Glühlampe und an dem Ende des Leitungssystems eine Brücke mit Glühlampe eingesetzt. Es zeigt sich der gleiche Effekt. Unter Umständen muß man ein wenig nachstimmen. Ein Schaltbild der Anordnung zeigt Abbildung 3.2.4./5 b. Man erkennt, daß im angekoppelten Schwingkreis Resonanz auch durch Längenveränderung paralleler Leiterstücke erzielt werden kann.

Versuch 2: Spannung und Stromverlauf im Lechersystem

Die Länge der Lecherleitung wird zunächst nach Versuch 1 abgestimmt. Entlang der Leitung besteht eine stehende elektrische Welle, deren Stromstärke- und Spannungsknoten und -bäuche nachzuweisen sind.

Die *Stromstärkemaxima* sind auf zweierlei Weise nachweisbar. Man führt eine Gleitbrücke mit einer Glühlampe auf der Leitung entlang und beobachtet das Aufleuchten der Glühlampe an den Stromstärkebäuchen, die zwischen den beiden Stromstärkebäuchen am Anfang und Ende der Leitungen auftreten. In den Stromstärkeknoten, die an den Stellen der Spannungsmaxima liegen, verlischt die Lampe.

Die Stromstärkemaxima sind auch mit einer Induktionsschleife, die über eine Germaniumdiode an einen Drehspulstromstärkemesser (2 mA) angeschlossen ist, zu finden. Man bestückt eine Schleifbrücke mit dem Koppelbügel ohne Glühlampe und versieht ihn mit einem Plattenhalter.

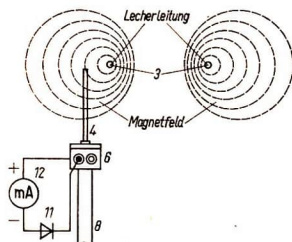


Abb. 3.2.4./6 Nachweis der Stromstärke mit Induktionsschleife

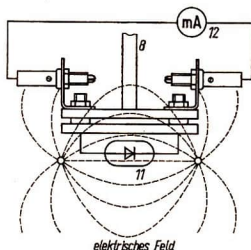


Abb. 3.2.4./7 Nachweis der Spannungen durch Influenz

Nach Abbildung 3.2.4./6 führt man ihn an der Lecherleitung entlang, so daß der Koppelbügel als Induktionsschleife von den magnetischen Feldlinien durchsetzt wird. An den Stellen der Stromstärkebäuche zeigt sich ein maximaler Zeigerausschlag. Da sich eine Influenzwirkung der elektrischen Felder nicht ganz vermeiden läßt, geht der Zeigerausschlag in den Spannungsknoten nicht ganz auf die Nullstellung zurück.

Die *Spannungsmaxima* sind durch Influenzwirkung auf eine Schleifbrücke festzustellen. Diese wird mit einer Germaniumdiode bestückt, mit einem Plattenhalter versehen und an ein Drehspulmeßgerät (2 mA) angeschlossen. Führt man sie dicht über den Lecherdrähten nach Abbildung 3.2.4./7 entlang, so beobachtet man in den Spannungsbäuchen, die in der Mitte zwischen zwei Stromstärkebäuchen liegen, maximale Zeigerausschläge.

Die Spannungsmaxima können auch durch Glimmlampen nachgewiesen werden, die in Schleifbrücken auf die Lecherleitung in der Mitte zwischen den Stromstärkebäuchen gesetzt werden. Zum Zünden der Glimmlampen müssen allerdings die zulässigen Leistungen des Generators durch eine kurzzeitige Erhöhung der Anodenspannung wesentlich überschritten werden, so daß eine leistungsschwache Röhre wie die EC92 dabei stark gefährdet ist.

Bemerkungen

1. Besonders günstig für die Ausbildung der stehenden Welle ist es, wenn man den Kurzschluß am Ende der Leitung durch eine Aluminiumplatte herstellt, in der sich zwei Bohrungen befinden, so daß man sie auf das Ende der Leitungen hängen kann.
2. Die Abstände je zweier Stromstärke- oder Spannungsknoten bzw. Stromstärke- oder Spannungsbäuche betragen etwa eine halbe Wellenlänge, so daß mit dem Versuch 2 eine angenäherte Bestimmung der Wellenlänge möglich ist. Besonders durch den Einsatz von Glühlampen und Meßgeräten werden Induktivitäten in die Leitung geschaltet, die zu einer Verkürzung der Abstände der Knoten und Bäuche führen.
3. Ein Versuchsaufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz erscheint jedoch ungünstiger als mit dem Selbstbaugerät, da die Wellenlänge in Triodenschaltung mit EL 83 etwa 5 m und in Pentodenschaltung etwa 3,75 m beträgt. Dadurch kann man auf den zugehörigen Antennenteilen, die zu einer Lecherleitung zusammengesetzt werden, nur eine Welle mit einer Wellenlänge erhalten, während bei einer Wellenlänge von 1 m durch eine entsprechende Verlängerung der Lecherleitung 3 bis 4 Wellenlängen beim Aufbau auf einem Experimentiertisch zu erreichen sind.
4. Metallteile, z. B. im Experimentiertisch verlegte Leitungen, können die Versuche an der Lecherleitung störend beeinflussen. Es ist auch zweckmäßig, das Stromversorgungsgerät möglichst weit vom Generator entfernt aufzustellen.



3.2.5. Elektrische Wellen auf einem halboffenen Lechersystem

Geräte wie bei V 3.2.4.

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.2.4.1

Versuch

Die Versuchsanordnung wird wie in V 3.2.4., Versuch 1, vorgenommen. Der Kurzschlußbügel an den Enden des Lechersystems wird entfernt. Der Generator wird eingeschaltet. Die Länge der Schenkel des halboffenen Leitersystems wird durch Ausziehen verändert. Bei einer bestimmten Stellung leuchtet die Glühlampe auf (Abb. 3.2.5./1b). Am offenen Ende des Lechersystems ist jetzt nach V 3.2.4. Abbildung 3.2.4./7 ein Spannungsmaximum nachzuweisen. Auch ein einseitig offenes Leitergebilde erweist sich demnach als elektrisch schwingungsfähig. In Abbildung 3.2.5./1 wird der Vergleich der Spannungs- und Stromstärkenwerte im geschlossenen und halboffenen Lechersystem gezeigt.

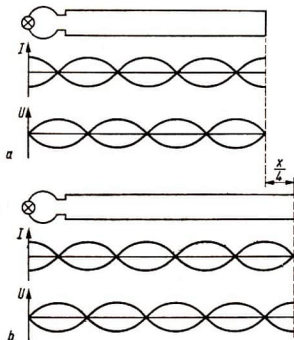


Abb. 3.2.5./1 Stromstärke- und Spannungsverteilung
 a) im geschlossenen Lechersystem,
 b) im halboffenen Lechersystem



3.2.6. Schwingungen im Dipol

1. Stromversorgungsgerät (150 V–; 6,3 V~)
2. UHF-Generator ⑤
3. 3 Gleitstücke ⑤ als Dipolhalter
4. Koppelbügel ⑤
5. Koppelbügel mit Glühlampenfassung (E 10) ⑤
6. 2 Teleskopantennen ⑤
7. Plattenhalter
8. 3 Glühlampen auf Steckerbrett (3,8 V; 0,07 A)
9. Glimmlampe auf Steckerbrett
 (Selbstbau der Teile nach V 3.2.1., V 3.2.2. und V 3.2.4.)

Versuch 1: Kopplung eines Dipols mit dem UHF-Generator

Nach Abbildung 3.2.6./1 wird ein Dipol mit Koppelbügel zusammengestellt und an einem Tonnenfuß befestigt. Der Koppelbügel ist nach Abbildung 3.2.2./1 zu bauen, aber mit Lampenfassung wie in Abbildung 3.2.4./3.

In Abbildung 3.2.6./2 ist gezeigt, wie der Dipol an den UHF-Generator zu koppeln ist. Nach dem Einschalten der Heiz- und Anodenspannung wird die Länge des Dipols unter Einhaltung gleicher Länge beider Hälften so eingestellt, daß die Glühlampe mit maximaler Helligkeit leuchtet. Die Länge des Dipols ist dann etwas kürzer als eine halbe Wellenlänge. Die Glühlampe zeigt den Strom in seiner Mitte an. Der Kopplungsgrad läßt sich verändern, indem man die beiden Bügel sich mehr oder weniger in der Draufsicht überschneiden läßt oder indem man den Koppelbügel in der Höhe dichter oder entfernter an den Bügel des Generators bringt. Man kann auch einen Dipol ohne Koppelbügel an den Generator koppeln, indem man den Koppelbügel durch eine Glühlampe auf Steckerbrett ersetzt und dieses dicht an den Trimmer im Bügel des Generators bringt.

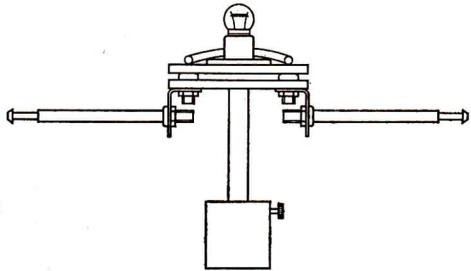
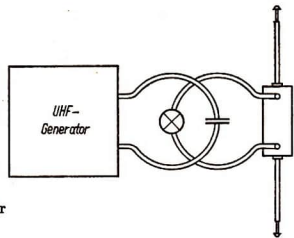


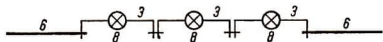
Abb. 3.2.6./1 Dipol

Abb. 3.2.6./2
Kopplung des Dipols an den UHF-Generator*Versuch 2: Spannungsverteilung im Dipol*

Wie in Versuch 1 wird ein Dipol an den UHF-Generator gekoppelt. Man benutzt aber besser den Koppelbügel ohne Glühlampe. Der Dipol ist um einige Zentimeter zu verlängern. An das Ende des Dipols hält man den einen Pol einer Glimmlampe. Durch eine kurzzeitige Erhöhung der Anodenspannung ist diese zu zünden. Gleitet man am Dipol entlang zur Mitte hin, nimmt die Länge der Glimmsäume an den Elektroden der Glimmlampe ab, bis sie mit der Annäherung an den Spannungsknoten in der Mitte des Dipols verlöschen.

Versuch 3: Stromstärkeverteilung im Dipol

Durch kurze 4 mm dicke Stifte werden an den Dipolhalter zwei weitere Gleitstücke mit Glühlampen gesetzt (Abb. 3.2.6./3). Die Teleskopantennen müssen erheblich verkürzt werden, um Resonanz zu erhalten. Die mittlere Glühlampe leuchtet heller als die beiden seitlichen.

Abb. 3.2.6./3
Schema der Dipolanordnung



3.2.7. Abstrahlung Hertzscher Wellen von einem Dipol

Geräte wie in V 3.2.6. (6. und 7. zweimal), außerdem

10. Germaniumdiode auf Steckerbrett
11. Drehpulmeßgerät (2 mA)
12. Stativstab (50 cm)
13. Blechplatte (etwa 700 mm × 300 mm)

Methodische Hinweise

1. Die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen vom Dipol ist Stoff der Oberstufe.
2. Außerdem können hier die Polarisation und die Reflexion der Wellen nachgewiesen werden.

Versuchsordnung

Ein Dipol wird wie in V 3.2.6., Versuch 1, aufgebaut, angekoppelt und abgestimmt. Ein zweiter Dipol wird in gleicher Weise aufgebaut, aber anstatt des Koppelbügels mit einer Germaniumdiode ausgerüstet und an das Meßgerät angeschlossen. Die Dipole werden nach Abbildung 3.2.7./1 als Sende- und Empfangsdipol angeordnet.

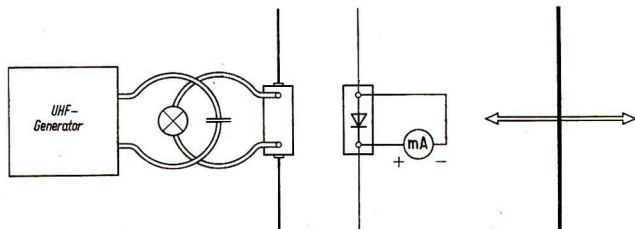


Abb. 3.2.7./1 Sender, Empfangsdipol und Reflexionsplatte

Versuch 1: Nachweis der abgestrahlten Wellen

Im Empfangsdipol treten Schwingungen auf, die mit vergrößertem Abstand vom Sendedipol eine kleinere Amplitude haben. Der Ausschlag des Meßgerätes nimmt ab.

Versuch 2: Nachweis der Polarisation Hertzscher Wellen

Man stellt den Empfangsdipol senkrecht zum Sendedipol. Bei hinreichender Entfernung geht der Zeigerausschlag auf die Nullstellung. In unmittelbarer Nähe des Senders ist dies nicht ganz zu erreichen.

Versuch 3: Nachweis der Reflexion durch stehende Wellen

Der Empfangsdipol wird etwa eine halbe Wellenlänge entfernt vom Sendedipol parallel zu ihm aufgestellt. Hält man hinter den Empfangsdipol einen Stativstab

oder eine Blechplatte und entfernt diese langsam wieder von den Dipolen, so zeigt das Meßgerät schwankende Ausschläge. Die Ausbildung stehender Wellen durch Reflexion wird durch maximalen Zeigerausschlag sichtbar.

Man hält die Platte in einer solchen Stellung fest und kann durch eine Verschiebung des Empfangsdipols zwischen Sendedipol und Reflexionsplatte die Maxima der elektrischen Feldstärke in der stehenden Welle finden.

Bemerkungen

1. Die Verwendung des Stativstabes im Versuch 3 kann als Modell des Reflektors einer UKW-Antenne gelten. Auch die Wirkung des Direktors kann demonstriert werden, indem man bei etwas größerer Entfernung des Empfangsdipols vom Sender den Stativstab zwischen Sender und Empfänger parallel verschiebt.
2. Die Versuche sind auch mit Dipolen mit einer Länge von $\frac{\lambda}{4}$ auszuführen. Dazu kann man den Versuchsaufbau der Lecherleitung benutzen. Die Leitungshalter werden unter 45° eingespannt. Der obere Draht wird durch einen Plattendraht ersetzt. Der untere Draht wird an beiden Enden geerdet. Die Dipole werden nach Abbildung 3.2.7./2 angeordnet, und der Generator wird im unteren Drittel des Sendedipols induktiv angekoppelt.

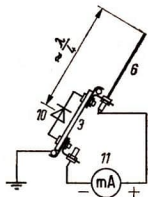


Abb. 3.2.7./2 Anordnung von $\frac{\lambda}{4}$ -Dipolen

Diese Versuchsanordnung liefert ein Modell für die Bodenwelle im Mittel- und Langwellenbereich.



3.2.8. Abstrahlung Hertzscher Wellen durch einen Teslatransformator

1. Netzspannung (220 V)
2. Teslatransformator
4. Empfangsdipol nach V 3.2.7.
3. Drehspulmeßgerät (100 μ A)

Methodische Hinweise

1. Vergleiche MH V 3.1.6.!
2. In einem Abstand vom Teslatransformator wird der nach V 3.2.7. gestaltete Empfänger aufgebaut.

Versuch

Die beiden Sekundärkreiselektroden des Teslatransformators werden einander genähert, dann setzt man den Transformator in Betrieb. Das Meßgerät am Empfänger zeigt einen Zeigerausschlag. Der Ausschlag wird größer, wenn man die Elektroden des Senders weiter voneinander entfernt, wodurch man gewissermaßen zu einem offenen Schwingkreis übergeht.

Durch einen Teslatransformator werden Züge gedämpfter hochfrequenter elektrischer Schwingungen erzeugt. Der Sekundärkreis des Transformators wirkt als Sendedipol. Wegen der gedämpften Schwingungen gibt es keine eindeutige Resonanzfrequenz des Empfängers. Der Zeigerausschlag ändert sich bei Längenänderung des Dipols unwesentlich.

Bemerkung

Bei großer Entfernung zwischen dem Sender und dem Empfänger ist es ratsam, auf der Empfangsseite einen Verstärker zu benutzen, wie dies bei Rundfunkempfängern im Mittelwellen- oder Langwellenbereich der Fall ist.

**3.2.9. Funkensender und Empfänger für Dezimeterwellen**

1. Stromversorgungsgerät (4 V ... 10 V—)
2. 4 Plaststäbe (13 mm \varnothing)
3. 4 Plaststäbe mit Gewinde M 8 (90 mm) und 4 Muttern M 8
4. 4 Drosselspulen $\text{\textcircled{D}}$,
dazu erforderliches Material:
isolierter Kupferdraht (etwa 3 m lang; \varnothing 1 mm ... 2 mm), 4 Kabelschuhe, 4 Steckbuchsen
5. Halbleiterdiode
6. Funkeninduktor
7. empfindliches Galvanometer (Spiegelgalvanometer — Meßbereich 2 μA)
8. Schalter

Methodische Hinweise

1. Die Versuche stellen die Nachbildung der von Heinrich Hertz durchgeführten Versuche zum experimentellen Nachweis der elektromagnetischen Wellen mit modernen Hilfsmitteln dar.
2. Vergleiche MH V 3.2.1.!

Versuchsordnung

Zunächst fertigt man für den Sender und den Empfänger je zwei Drosselspulen an. Man verwendet 1 mm ... 2 mm dicken, isolierten Kupferdraht, den man um ein großes Reagenzglas wickelt, so daß etwa 8 bis 10 Wdg. entstehen. Dann zieht man das Reagenzglas heraus und bringt die Spule auf die Länge von 50 mm ... 70 mm. An das eine Ende der Spule wird ein Kabelschuh angelötet, dessen Größe so zu wählen ist, daß er den Gewindeteil der als Dipol benutzten Stativstäbe gerade umfaßt. An das andere Ende lötet man eine Steckbuchse (Abb. 3.2.9./1).



Abb. 3.2.9./1 Drosselspule

Der Aufbau des Senders erfolgt nach Abbildung 3.2.9./2. Man verwendet dabei zur Befestigung des Dipols zwei isolierende Stäbe oder zwei Plattenhalter, die man in die Stativfüße bzw. die Kreuzmuffen klemmt. Die Endflächen der Dipole werden einander so genähert, daß ihr Abstand höchstens 0,5 mm beträgt. An beiden Dipolhälften wird mit Muttern je eine Drosselspule befestigt. Die Drosseln werden senkrecht zur Verbindungslinie Sender — Empfänger angebracht und mit der Sekundärseite einer Hochspannungsquelle verbunden. Als solche dient ein Funkeninduktor.

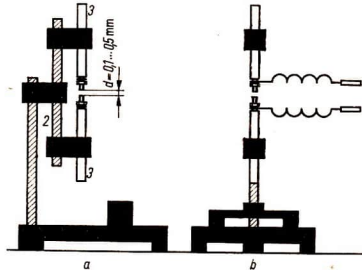


Abb. 3.2.9./2
Aufbau eines Sendedipols
a) von der Seite,
b) von vorn

Die Stellschraube des Wagnerschen Hammers wird angezogen, so daß der Unterbrecher außer Betrieb ist. Legt man jetzt eine Wechselspannung von 4 V ... 8 V (50 Hz) an, so dient der Induktor als Hochspannungstransformator. Ist kein Funkeninduktor vorhanden, so kann man einen Transformator aus Aufbauteilen herstellen. Seine Sekundärspannung muß so groß sein, daß eine Funkenstrecke von etwa 0,5 mm überwunden wird.

Der Aufbau des Empfängers erfolgt in gleicher Weise. Doch werden hier die beiden Dipolhälften an den Ansatzstellen der Drosselspulen zusätzlich noch durch eine Halbleiterdiode überbrückt. Die freien Enden der Drosselspulen werden mit einem hochempfindlichen Galvanometer verbunden, wozu ein Spiegelgalvanometer mit einem Meßbereich von 2 μA am besten geeignet ist.

Versuch

Man stellt den Sender und den Empfänger in gleicher Höhe einander so gegenüber, daß ihr Abstand 1 m ... 2 m beträgt und die Dipole parallel stehen (Abb. 3.2.9./3).

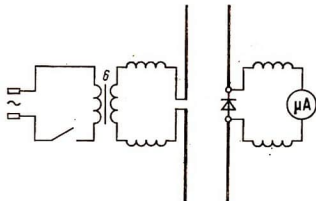


Abb. 3.2.9./3 Anordnung eines Senders
und eines Empfängers für Dezimeterwellen

Die Funkenstrecke des Senders ist so einzustellen, daß nur ein ganz leichtes Brummen zu hören ist. Beim Einschalten zeigt das Galvanometer am Empfänger einen Ausschlag.

Erläuterung

Bei jedem Funkenübergang entsteht in dem Sendedipol ein Zug gedämpfter elektrischer Schwingungen, deren Frequenz durch die Dipollänge bestimmt wird. Der Dipol wirkt als Sendeantenne und strahlt elektromagnetische Wellen ab. Deren Wellenlänge ergäbe sich theoretisch zu

$$\lambda = 2l,$$

wobei l die Dipollänge ist. Bei einer Dipollänge von etwa 18 cm ergibt sich somit eine Wellenlänge von etwa 36 cm. In Wirklichkeit sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Erstens ist im gleichen Schwingkreis die Frequenz gedämpfter Schwingungen kleiner als die ungedämpfter, zweitens wird durch die dicken Stativstäbe die Eigenkapazität des Dipols größer und damit die Frequenz ebenfalls kleiner. Man hat somit bei dem beschriebenen Sender mit einer größeren Wellenlänge zu rechnen.

Die ausgestrahlten Wellen erzeugen in einem Empfangsdipol gleicher Länge elektrische Schwingungen gleicher Frequenz. Durch Gleichrichtung der hochfrequenten Wechselströme können diese an einem Galvanometer nachgewiesen werden.

Bemerkungen

1. Die Drosselspulen verhindern den Eintritt der UHF-Schwingungen in die Zuleitungen. Sie dürfen keinesfalls eingespart werden, weil sonst nicht nur der Dipol strahlt und damit weder eine bestimmte Frequenz erreicht noch eine eindeutige Strahlungscharakteristik erhalten wird.
2. Es ist zu beachten, daß der Sendedipol Hochspannung führt. Er darf deshalb nicht berührt werden.



3.2.10. Untersuchung des elektromagnetischen Feldes des Dipols

Dieselben Geräte wie zu V 3.2.9., außerdem
9. lange Doppelleitung (UKW-Bandleitung)

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für die Oberstufe geeignet.

Versuchsordnung

Der Aufbau der Versuchsordnung wird wie in V 3.2.9. vorgenommen. Der Stativfuß des Empfängers wird entfernt; die Zuleitung vom Empfänger zum Galvanometer wird durch eine lange Doppelleitung ersetzt.

Versuch

Man faßt den Empfänger am Isolierstab an und sucht damit das Gebiet rund um den Sendedipol ab. Man achte darauf, daß beide Dipole stets in einer Ebene liegen (Abb. 3.2.10./1). Man vergleiche dazu V 3.2.12.!

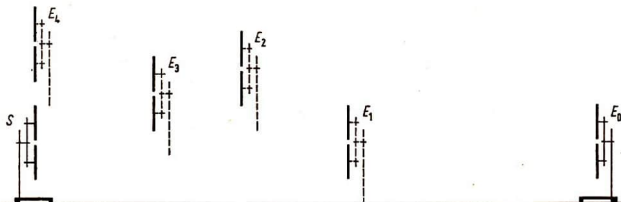


Abb. 3.2.10./1 Abtasten der Umgebung des Sendedipols nach der Intensität der Hertzischen Wellen

Der Versuch ergibt:

1. Die elektrische Feldstärke, gemessen durch den Ausschlag des Galvanometers, nimmt mit wachsender Entfernung vom Sender ab.
2. Bei gleicher Entfernung vom Sendedipol ist die Feldstärke in der Richtung senkrecht zur Dipollage am größten.
3. Der Sendedipol strahlt keine Wellen in seiner Längsrichtung ab.



3.2.11. Ausbreitung Hertzischer Wellen in verschiedenen Medien

Zu Variante a

Dieselben Geräte wie zu V 3.2.9., außerdem Tafeln (400 mm × 400 mm) aus Eisenblech, Aluminiumblech, Glas, Karton, Holz, Plast und engmaschiges Drahtnetz

Zu Variante b

Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3

Methodischer Hinweis

Mit diesem Versuch beginnt die systematische Untersuchung der Eigenschaften Hertzischer Wellen.

Versuchsordnung

Der Aufbau für Variante a erfolgt wie in V 3.2.9. und für Variante b nach Abbildung 3.2.11./1.

Versuch

Der Sender wird eingeschaltet. Zwischen den Empfänger und den Sender werden Platten aus verschiedenem Material gehalten bzw. gestellt. Bei Variante a beob-

achtet man den Ausschlag des Galvanometers, bei Variante b läßt sich der Empfang der Hertzischen Wellen akustisch verfolgen. Es läßt sich feststellen, daß Hertzische Wellen Isolatoren durchdringen und von Leitern absorbiert und reflektiert werden.

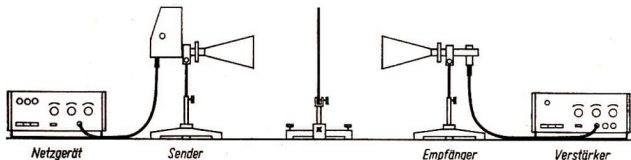


Abb. 3.2.11./1 Aufbau mit Mikrowellen-Vorführungssatz zum Untersuchen der Durchdringungsfähigkeit Hertzischer Wellen

Bemerkungen

1. Durch Reflexion der Wellen an Gegenständen des Zimmers kann es vorkommen, daß der Ausschlag des Galvanometers nicht auf Null zurückgeht. Man kommt dann zu besseren Ergebnissen, wenn man das Metallblech in unmittelbare Nähe des Senders stellt.
2. Auch ein engmaschiges Drahtnetz wirkt undurchlässig für Hertzische Wellen wie ein massives Metallblech.



3.2.12. Nachweis der Polarisation der Hertzischen Wellen

Zu Variante a

Geräte für Sender und Empfänger wie in V 3.2.9., außerdem

10. Drahtgitter auf einem Holzrahmen mit 41 parallelen Drähten ® (Abmessungen des Rahmens 400 mm × 400 mm),
dazu erforderliches Material:
4 Holzleisten (420 mm × 20 mm × 10 mm)
etwa 17,5 m Eisendraht (∅ 1 mm)
Alleskleber

Zu Variante b

Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3

Methodische Hinweise

1. Der Versuch zeigt die Polarisation elektromagnetischer Wellen. In diesem Zusammenhang sollte auf die Stellung der Fernsehantennen hingewiesen werden.
2. Vergleiche V 3.2.7.!

Variante a: Anfertigung des Drahtgitters

Aus 4 Holzleisten der angegebenen Maße wird ein quadratischer Rahmen gefertigt. Die Leisten an den Enden werden überlappt, zusammengeleimt und -geschraubt.

Zwei gegenüberliegende Leisten werden längs ihrer Mittellinien in Abständen von je 10 mm durchbohrt. Durch die Löcher wird ein etwa 17,5 m langer Eisendraht hin- und hergezogen, so daß ein Gitter von 41 parallel liegenden Drähten entsteht (Abb. 3.2.12./1).

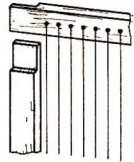


Abb. 3.2.12./1 Fertigung des Drahtgitters

Versuch 1: Drahtgitter zwischen gekreuzten Dipolen

Es werden ein Sender und ein Empfänger aufgebaut und zunächst mit parallelen Dipolen aufgestellt. Bei eingeschaltetem Sender wird der Empfangsdipol quer zum Sendedipol gestellt. Der Zeigerausschlag am Galvanometer geht nahezu auf Null zurück (Abb. 3.2.12./2a). Stellt man aber das Drahtgitter dazwischen, so daß es auf einer Ecke steht und die Drähte um einen Winkel von 45° gegen die Horizontale geneigt sind, so tritt eine merkliche Vergrößerung des Zeigerausschlages ein (Abb. 3.2.12./2b).

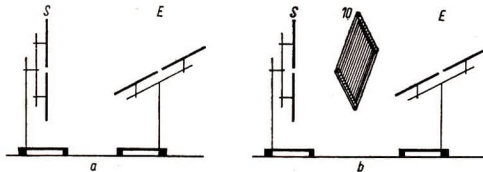


Abb. 3.2.12./2 Nachweis der Polarisation bei gekreuzten Dipolen:
a) kein Empfang, b) Empfang bei Zwischenschalten eines Gitters, um 45° geneigt

Versuch 2: Drahtgitter zwischen parallelen Dipolen

Sende- und Empfangsdipol werden wieder parallel gestellt. Zwischen beide wird das Gitter so gehalten, daß die Gitterdrähte quer zur Dipolrichtung stehen. Der Zeigerausschlag ändert sich kaum. Jetzt wird das Gitter gedreht, so daß Gitterdrähte und Dipole parallel zueinander stehen. Der Zeigerausschlag geht fast auf Null zurück (Abb. 3.2.12./3).

Zusammenfassung

Die Versuche zeigen, daß die Hertzschen Wellen polarisiert sind. Die elektrische Feldstärke schwingt in Ebenen, die sich in der Längsachse des Sendedipols schneiden. Senkrecht zu diesen Ebenen sind keine Feldstärkedifferenzen nachweisbar. Im Empfangsdipol entstehen keine elektrischen Schwingungen. Bei Parallelstellung der Gitterdrähte wirken diese wie eine Metallwand.

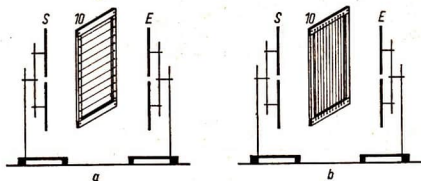


Abb. 3.2.12./3 Nachweis der Polarisation bei parallelen Dipolen:
 a) ungehinderter Durchgang durch das Gitter,
 b) kein Durchgang durch das Gitter

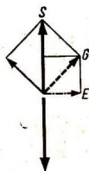


Abb. 3.2.12./4
 Vektorielle Zerlegung der elektrischen Feldstärke durch ein um 45° geneigtes Gitter bei gekreuzten Dipolen

Beim Versuch 1 wird die elektrische Feldstärke durch das um 45° gedrehte Gitter vektoriell zerlegt, so daß der Anteil im Empfangsdipol noch den halben ursprünglichen Wert hat (Abb. 3.2.12./4).

Variante b

Der Aufbau erfolgt wie in Abbildung 3.2.11./1.
 Da die Wellen den Sender polarisiert verlassen, genügt es, zwischen Sender und Empfänger eine „Platte für Polarisationsversuche“ als Analysator anzuordnen.

3.2.13. Reflexion Hertzscher Wellen

Zu Variante a

Geräte wie zu V 3.2.9., außerdem

11. ebenes, blankes Metallblech (400 mm \times 400 mm)

12. 2 Zylinderspiegel \odot ,

dazu erforderliches Material:

2 blanke dünne Blechplatten (400 mm \times 400 mm) aus Messing oder Aluminium, die man mit Hilfe von angelegten Schablonenpaaren aus Holz zu Spiegeln verschieden starker Krümmung biegt

Zu Variante b

Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3

Demonstrationswinkelmesser

Methodische Hinweise

1. Der Versuch dient in der Oberstufe zur Untersuchung einer wichtigen Eigenschaft Hertzscher Wellen.
2. Die Reflexion Hertzscher Wellen spielt für den Bau von Antennen für das Fernsehen eine Rolle.
3. Vergleiche V 3.2.7.1

*Variante a**Versuch 1: Reflexion an einem Stab*

Aus den zu V 3.2.9. angegebenen Geräten werden ein Sender und ein Empfänger für Dezimeterwellen aufgebaut. In der Ebene Sende-Empfangsdipol wird hinter dem Empfänger der Stativstab aufgestellt. Das Galvanometer zeigt eine Zunahme der Stromstärke an. Sollte etwa infolge von Interferenz der gegenteilige Effekt eintreten — s. V 3.2.15. —, so ist der Stativstab in Richtung auf den Empfänger nur etwas zu verschieben.

Versuch 2: Reflexion an einem ebenen Spiegel

Der Stativstab wird durch das ebene Metallblech ersetzt. Es zeigt sich der gleiche Effekt. Dann stellt man das Metallblech hinter den Sender. Das Galvanometer am Empfänger zeigt ebenfalls eine Zunahme der Stromstärke an.

Versuch 3: Reflexion an einem Zylinderspiegel

Eines der gebogenen Bleche wird als Zylinderspiegel hinter den Sender gestellt, so daß der Sendedipol genau in der Brennpunktlinie steht. Man erhält so annähernd Parallelstrahlen, die man auf den Empfänger richtet. Die Anordnung ist mit einem Scheinwerfer vergleichbar; die Stromstärke nimmt zu (Abb. 3.2.13./1). Den zweiten Spiegel stellt man nun in entsprechender Weise hinter den Empfänger. Die ankommenden Parallelstrahlen werden in der Brennpunktlinie vereinigt, auf der sich der Empfangsdipol befindet. Die Stromstärke steigt weiter an (Abb. 3.2.13./2). Hertz'sche Wellen werden wie Lichtwellen reflektiert.

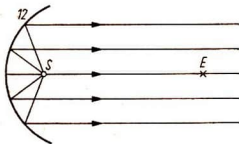


Abb. 3.2.13./1 Bündelung der ausstrahlten Hertz'schen Wellen durch einen Zylinderspiegel



Abb. 3.2.13./2 Konzentrierung des Wellenbündels auf den Empfangsdipol

Bemerkungen

1. Reflexionsspiegel werden bei UKW-Empfangsantennen und in Radargeräten verwendet.
2. Reflexionen können beim Fernsehempfang zu Geisterbildern führen.

*Variante b**Versuch 1: Reflexion an einer ebenen Metallplatte*

Der Aufbau erfolgt nach Abbildung 3.2.13./3. Der Richtempfänger wird um seine horizontale Achse so lange geschwenkt, bis maximaler Empfang eintritt. Durch Auflegen eines Winkelmessers und Spannen einer Gummischnur läßt sich die Gleich-

heit von Einfallswinkel und Reflexionswinkel zeigen. Wird der Empfänger um seine vertikale Achse gedreht, so läßt sich nachweisen, daß Empfang nur gelingt, wenn die Normale der einfallenden Welle, das Einfallslot und die Normale der reflektierten Welle in einer Ebene liegen.

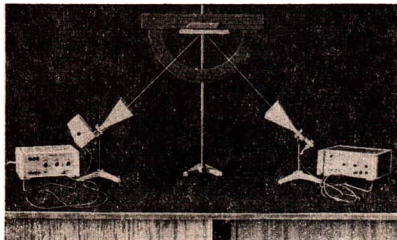


Abb. 3.2.13./3 Aufbau zur Reflexion Hertzscher Wellen an einer ebenen Metallplatte, ausgeführt mit dem Mikrowellen-Vorführungssatz

Versuch 2: Reflexion an einem Zylinderspiegel

Der Aufbau erfolgt gemäß Abbildung 3.2.13./2. In S steht der Mikrowellensender, in E die Detektorsonde. Als Reflektor dient der Zylinderspiegel 12. © aus Variante a.

3.2.14. Brechung Hertzscher Wellen

Zu Variante a

Geräte wie zu V 3.2.9., außerdem

12. Zylinderspiegel wie Gerät 12. zu V 3.2.12.
13. große Flasche (1,5 l ... 2 l)
14. isolierende Flüssigkeiten wie Spiritus, Benzol, Äther, Azeton, Petroleum oder isolierende feste Stoffe wie Kochsalz, Zucker oder dergleichen
15. Prisma aus Pappe (Höhe 300 mm bis 400 mm) mit einem gleichseitigen Dreieck (Kantenlänge 200 mm ... 300 mm) als Grundfläche

Zu Variante b

Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3

Methodische Hinweise

1. Der Versuch dient in der Oberstufe zur Untersuchung einer weiteren wichtigen Eigenschaft der Hertzischen Wellen.
2. Die Brechung Hertzischer Wellen in Luftschichten mit verschiedener Temperatur führt zu Weitempfang bei Fernsendungen.

*Variante a**Versuchsanordnung*

Man stellt aus den Geräten zu V 3.2.9. einen Sender und einen Empfänger zusammen. Hinter den Sendedipol stellt man einen Zylinderspiegel, in dessen Brennpunkt der Dipol liegt. Den Empfängerdipol stellt man in einiger Entfernung so auf, daß er von den Hertz'schen Wellen getroffen wird.

Versuch 1: Brechung an einer Flasche mit isolierenden Flüssigkeiten

Eine Flasche wird mit einer isolierenden Flüssigkeit gefüllt und mit ihrer Achse parallel zu den Dipolen gestellt. Man hält sie so zwischen den Sender und den Empfänger, daß sie als Zylinderlinse wirkt, in deren Brennpunkt der Empfängerdipol liegt. Der Galvanometerausschlag nimmt zu (Abb. 3.2.14./1).

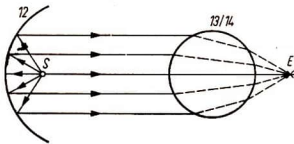


Abb. 3.2.14./1
Brechung durch einen zylindrischen Körper

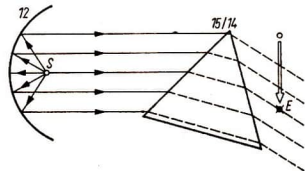


Abb. 3.2.14./2
Brechung durch ein Prisma

Versuch 2: Brechung an einem Prisma aus isolierenden Stoffen

Man ersetzt die Flasche durch das Papp-Prisma, das man mit einem festen isolierenden Stoff wie trockenem Kochsalz oder Zucker gefüllt hat. Der Ausschlag am Meßgerät geht zurück.

Nun verschiebt man den Empfänger quer zur Ausbreitungsrichtung der Wellen. An einer bestimmten Stelle nimmt der Galvanometerausschlag wieder zu (Abb. 3.2.14./2). Aus den Versuchen geht hervor, daß Hertz'sche Wellen wie Lichtwellen gebrochen werden.

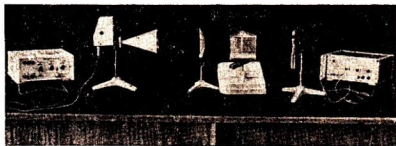
Bemerkung

Vorsicht beim Experimentieren mit feuergefährlichen Stoffen!

Variante b

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.2.14./3.

Abb. 3.2.14./3 Aufbau mit
Mikrowellen-Vorführungssatz
zum Nachweis der Brechung
Hertz'scher Wellen



Versuch 1: Brechung durch eine Konvexlinse

Sender und Empfänger werden in 80 cm Entfernung aufgestellt. Als Empfänger dient die Detektorsonde. Die Verstärkung wird so eingestellt, daß das Signal schwach zu hören ist. Dann stellt man zwischen Sender und Empfänger die Plankonvexlinse, verschiebt sie auf der Verbindungsgeraden zwischen Sender und Detektor, bis eine deutliche Zunahme der Lautstärke festzustellen ist.

Versuch 2: Brechung an einem Prisma aus isolierenden Stoffen

In der Anordnung zum Versuch 1 stellt man zwischen Linse und Detektor das mit Wasser oder Glycerin gefüllte Hohlprisma auf. Trotz Nachstellen der Verstärkung ist nun kein Signal zu hören. Durch Verschieben des Detektors quer zur Ausbreitungsrichtung und von der brechenden Kante weg kann der gebrochene Strahl empfangen werden.

3.2.15. Interferenz Hertzscher Wellen

Zu Versuch 1

Geräte wie zu V 3.2.9., außerdem

- 16. Zylinderspiegel wie Gerät 12. zu V 3.2.13.
- 17. Metallblech wie Gerät 11. zu V 3.2.13.
- 18. Meßstab oder Gliedermaßstab (2000 mm) oder Meßband

Zu Versuch 2

Mikrowellen-Vorführungssatz Typ ZM-3

Methodische Hinweise

1. Der Versuch 1 ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt. Dieser Versuch setzt die Kenntnisse über Zustandekommen und Merkmale stehender Wellen voraus.
2. Der Versuch 2 dient in der Oberstufe dem Nachweis der wohl typischsten Welleneigenschaft bei Hertzschen Wellen.

Versuch 1: Die Erzeugung stehender Wellen

Versuchsordnung

Es werden aus den Geräten zu V 3.2.9. ein Sender für Dezimeterwellen und ein Empfänger aufgebaut. Sie werden in einer Reihe hintereinander angeordnet. Hinter

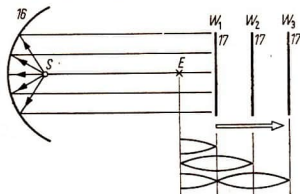


Abb. 3.2.15./1 Anordnung von Sender und Empfänger für den Interferenzversuch

dem Sender steht der Zylinderspiegel als Richtspiegel und hinter dem Empfänger eine Blechtafel als ebener Spiegel (Abb. 3.2.15./1).

Versuch

Man bringt den ebenen Spiegel zunächst in unmittelbare Nähe des Empfängers und entfernt ihn dann langsam von diesem. Der Galvanometerausschlag zeigt deutlich Maxima und Minima, die immer weniger ausgeprägt werden, je weiter man den Spiegel vom Empfänger entfernt. Der Abstand zwischen den Spiegelstellungen bei den ersten beiden Minima, oder wenn nicht anders möglich, beim ersten Maximum und beim ersten Minimum, wird gemessen.

Die vom Sender kommenden und die am ebenen Spiegel reflektierten Wellenzüge überlagern sich und interferieren miteinander; es bilden sich stehende Wellen. Die Maxima des Galvanometerausgangs zeigen die Schwingungsbäuche, die Minima die Schwingungsknoten an.

Bemerkung

Mit dieser Anordnung kann die Wellenlänge bestimmt werden. Der Abstand zweier Knoten ist $\frac{\lambda}{2}$.

Versuch 2: Interferenz Hertzscher Wellen hinter einem Doppelspalt

Der Aufbau geschieht nach Abbildung 3.2.15./2. Als Empfänger dient die Detektorsonde. Wird diese Sonde parallel zum Doppelspalt durch das Wellenfeld gezogen, so lassen sich Verstärkungs- und Auslöschgebiete ermitteln.

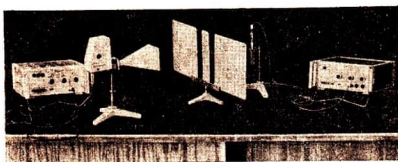


Abb. 3.2.15./2 Aufbau mit Mikrowellen-Vorführungssatz zum Nachweis der Interferenz Hertzscher Wellen hinter einem Doppelspalt

Bemerkung

Die Wellenlänge läßt sich mit der Interferenzgleichung annähernd bestimmen.

3.3. Die drahtlose Nachrichtenübermittlung

3.3.1. Unmodulierter Tastfunk — Hochfrequenzempfang

1. Stromversorgungsgerät (100 V—; 6,3 V~; 0 V ... 20 V—)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
3. Röhrenbrett



4. Widerstand (1 k Ω)
5. Katodenstrahlloszillograf
6. Morsetaste
7. Strommesser (50 mA \sim)
8. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
oder HF-Spulen
9. 2 Drehkondensatoren (500 pF)
10. Kondensator (100 pF)
11. Widerstand (50 k Ω)

Methodische Hinweise

1. Die empfangenen Signale sind nicht ohne Hilfsmittel hörbar zu machen. Der Versuch kann dazu dienen, den Schülern die Notwendigkeit einer Modulation für eine Tonübertragung klar zu machen.
2. Der Versuch wird vorwiegend in Arbeitsgemeinschaften eingesetzt.

Versuchsordnung

Nach Abbildung 3.3.1./1a wird ein Röhrengenerator zur Erzeugung einer hochfrequenten elektrischen Schwingung aufgebaut (vgl. V 3.1.9.). Ein Empfänger zum Nachweis der unmodulierten Hertzischen Wellen wird nach Abbildung 3.3.1./1b

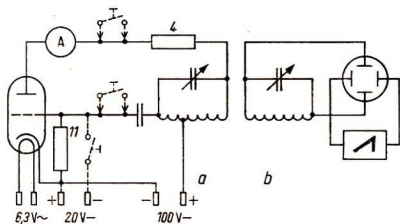


Abb. 3.3.1./1 HF-Generator in Dreipunktschaltung und Empfänger für unmodulierte Hertzische Wellen

zusammengestellt. An den Röhrengenerator darf keine Antenne angeschlossen werden. Darum muß die Schwingkreisspule des Empfängers nahe an die des Generators herangebracht werden. Schließt man an den Empfänger einen Draht als Antenne an, den man dicht neben den Röhrengenerator legt, so kann man den Empfänger weiter vom Sender entfernt aufbauen. Am Oszillografen muß gegebenenfalls eine höhere Verstärkung eingeschaltet werden.

Versuch

Die Morsetaste kann nach Abbildung 3.3.1./1 entweder in den Anodenkreis oder in den Gitterkreis geschaltet werden. Durch ihre Betätigung kann man den Sender im Rhythmus von Morsezeichen ein- und ausschalten.

Es ist auch möglich, den Sender über eine Gitterspannung zu tasten. Dazu wird eine Gleichspannung von etwa 20 V nach Abbildung 3.3.1./1 zwischen Gitter und Katode über die Morsetaste angelegt.

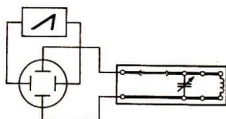
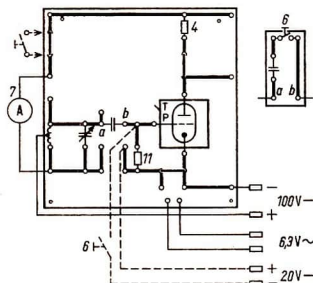


Abb. 3.3.1./3 Aufbau des Empfängers auf Buchsenbrett

Abb. 3.3.1./2 Aufbau des Senders mit dem EMB-Hochfrequenz (Schaltplatte nach 3.0.5. geändert)

Auf dem Bildschirm des Oszillografen ist der Empfang zu beobachten, wenn der Schwingkreis des Empfängers durch den Drehkondensator auf Resonanz zur Senderfrequenz abgestimmt ist.

Bemerkung

Verbindet man den Empfänger mit dem Eingang des Schulverstärkers und den Ausgang des Verstärkers mit einem Lautsprecher, zu dem der Oszillograf parallel geschaltet wird, so kann man feststellen, daß die verstärkte Hochfrequenzschwingung im Lautsprecher keinen Ton erzeugt.

3.3.2. Unmodulierter Tastfunk — Erzeugen eines Schwebungstones

Geräte wie bei V 3.3.1., außerdem

12. Germaniumdiode
13. Kopfhörer
14. Gleichspannungsquelle (4,5 V)
15. HF-Transistor auf Transistorbrett [®]
16. Spule (125/250 Wdg.) oder HF-Spule
17. Drehkondensator (500 pF)
18. Kondensator (100 pF)
19. Widerstand (50 k Ω)
20. Widerstand (1 k Ω)

Methodische Hinweise

1. Zum Verständnis der Schwebungen sollte V 1.3.22. herangezogen werden.
2. Der Versuch kann in der Oberstufe gezeigt werden, wird aber häufig Arbeitsgemeinschaften vorbehalten bleiben.

Versuchsordnung

Der Empfänger wird zunächst aufgebaut, indem der Kopfhörer ohne Germaniumdiode direkt an den Schwingkreis angeschlossen wird.

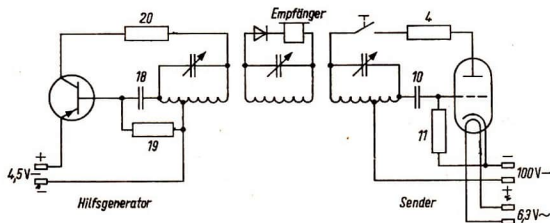


Abb. 3.3.2./1 Empfänger mit Transistorgenerator für die Hilfsfrequenz und Sender

Außerdem wird zum Empfänger ein Transistorgenerator in Dreipunktschaltung zur Erzeugung einer Hilfsfrequenz zusammengestellt (Abb. 3.3.2./1). Die Spulen beider Schaltungen werden zur induktiven Kopplung dicht aneinandergbracht. Weiter wird ein Röhrengenerator als Sender nach V 3.3.1. benötigt. Da an den Sender keine Antenne angekoppelt werden darf, muß auch seine Schwingkreisspule zur induktiven Kopplung dicht an die Spule im Empfänger gebracht werden. An Stelle des Kopfhörers kann an den Empfänger der Schulverstärker mit Lautsprecher angeschlossen werden.

Versuch

Man zeigt zunächst einzeln die Schwingungen des Transistor-Oszillators und des Tastfunksenders auf dem Bildschirm. Die Frequenz des Senders ist so einzustellen, daß sie sich um einen hörbaren Betrag, etwa um 500 Hz ... 1000 Hz, von der des Transistor-Oszillators unterscheidet. Während dieser Vorversuche ist im Kopfhörer nichts zu hören, weil die Membran den hohen Frequenzen nicht folgt und unser Ohr dafür auch nicht empfindlich ist. Wirken beide Schwingungen gleichzeitig auf die Empfängerspule ein, kommt es infolge von Überlagerungen zu Schwebungen in der Differenzfrequenz. Schließt man an den Empfangsschwingkreis zunächst wie in Abbildung 3.3.1./3 einen Oszillografen an, so sind die Schwebungen auf dem Bildschirm sichtbar, aber im Kopfhörer noch nicht hörbar. Erst nachdem man den Kopfhörer über die Germaniumdiode anschließt, wird durch die Gleichrichtung der Hochfrequenz der Schwebungston hörbar.

Bemerkungen

1. Das hier modellmäßig demonstrierte Verfahren des zweiten Oszillators wird vielfach zum Hörbarmachen von unmodulierten Tastfunksendungen benutzt. Andere Verfahren verwenden die Audiogleichrichtung mit fester Rückkopplung (s. V 3.3.10.) oder einen NF-Oszillator, mit dessen Schwingungen das Eingangssignal im Empfänger moduliert wird.
2. Als Empfänger kann auch ein Rundfunkempfänger im Mittelwellenbereich verwendet werden. In seiner Nähe werden der Röhrengenerator als Sender und der Transistorgenerator zur Erzeugung der Hilfsfrequenz aufgebaut.
3. Der Versuch kann auch als Modell herangezogen werden, um den Schülern bei der Behandlung des Super-Empfängers die Überlagerung der Senderfrequenz mit der Hilfsfrequenz zur Zwischenfrequenz zu erläutern.



3.3.3. Überlagerung von Hochfrequenzschwingungen mit einer 50-Hz-Wechselspannung

Geräte wie bei V 3.3.1., außerdem
12. Spule (750/1500 Wdg.)

Methodischer Hinweis

Die Überlagerung ist ein Gegenbeispiel zur Modulation. Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchs-anordnung

Es wird der bereits in V 3.3.1. verwendete HF-Generator aufgebaut. Nach Abbildung 3.3.3./1 wird eine Spule mit 1500 Wdg. mit den Vertikalablenkplatten des Katodenstrahloszillografen verbunden. Ihr wird einerseits eine hochfrequente Wechselspannung von der Schwingkreisspule und andererseits eine niederfrequente Wechselspannung von einer Spule mit 250 Wdg. induktiv zugeführt.

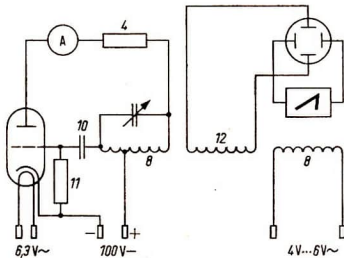


Abb. 3.3.3./1 Schaltung zur Überlagerung von HF- und NF-Schwingungen

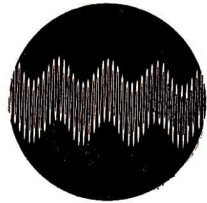


Abb. 3.3.3./2 Überlagerung zweier Schwingungen mit unterschiedlicher Frequenz

Versuch

Man setzt zunächst den HF-Generator in Tätigkeit und zeigt bei hoher Kippfrequenz des Oszillografen den sinusförmigen Verlauf der HF-Wechselspannung. Dann wird die Kippfrequenz auf 10 Hz ... 20 Hz verringert und eine 50-Hz-Wechselspannung von etwa 4 V ... 6 V an die Niederfrequenzspule gelegt. Der Bildschirm zeigt die Überlagerung beider Schwingungen (Abb. 3.3.3./2). Vergleiche auch V 3.3.4., Abbildung 3.3.4./2!



3.3.4. Amplitudenmodulation einer hochfrequenten Trägerschwingung mit einer 50-Hz-Wechselspannung

1. Stromversorgungsgeräte (100 V—; 6,3 V~; 20 V~)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung

3. Röhrenbrett
4. Katodenstrahloszillograf
5. Widerstand (1 k Ω)
6. Kondensator (100 pF)
7. Widerstand (50 k Ω)
8. 2 Drehkondensatoren (500 pF)
9. Kondensator (200 pF)
10. 2 Spulen (125/250 Wdg.)
oder HF-Spulen
11. Spule (125/250 Wdg.)
12. Spule (1500 Wdg.)
13. Schiebewiderstand (30 Ω)
14. U-Kern, geblättert
15. I-Kern, geblättert
16. Germaniumdiode
17. NF-Verstärker oder Rundfunkgerät
18. Lautsprecher

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für die Oberstufe zur Demonstration bestimmt.
2. Die Funkentstörordnung ist zu beachten, vergleiche MB 3.0.1.!

Versuchsordnung

Versuch 1: Anodenspannungsmodulation

Wie in V 3.3.1. wird ein HF-Generator aufgebaut. In die Anodenleitung wird ein Kondensator geschaltet, der die Sekundärspule des Modulationstransformators für die HF-Schwingungen überbrückt. Die Primärspannung ist an dem Potentiometer einstellbar, so daß man unterschiedliche Modulationsgrade erhält (Abb. 3.3.4./1).

Versuch 2: Gitterspannungsmodulation

In der Grundschialtung des HF-Generators wird der Gitterableitwiderstand zur Sekundärspule des Modulationstransformators in Reihe geschaltet (Abb. 3.3.4./1, Anschlüsse c/d). Die Modulationsspannung darf jetzt etwas niedriger sein als bei der Anodenspannungsmodulation.

Versuch 3: Nachweis der modulierten HF-Schwingung

1. Der Katodenstrahloszillograf kann direkt parallel an den Schwingkreis angeschlossen werden.
2. Durch Parallelschalten eines Drehkondensators und einer HF-Spule wird ein abstimmbarer Empfangsschwingkreis aufgebaut.

Die Spulen des Generators und des Empfangsschwingkreises werden einander mit gleicher Achse gegenübergestellt. Ihre Entfernung kann auf 1 m ... 2 m vergrößert werden. Der Oszillograf wird zunächst parallel zum Schwingkreis angeschlossen. Seine Kippfrequenz muß so klein eingestellt werden, daß die Hochfrequenz als breites Band erscheint und daß die Modulationsschwingungen zu erkennen sind. Gemäß Abbildung 3.3.4./1 kann über die Diode ein Niederfrequenzverstärker ein-

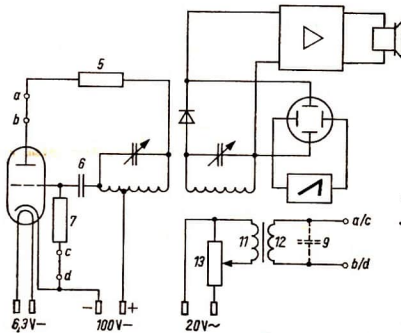


Abb. 3.3.4./1 Schaltplan für Anoden- und Gitterspannungsmodulation und Nachweis der modulierten Schwingungen (Modulationsspannung bei a/b oder c/d)

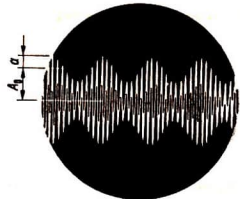


Abb. 3.3.4./2 Oszillogramm der amplitudenmodulierten Schwingungen:

A_0 ... Amplitude der Träger-schwingung,
 a ... Amplitude der Modulationsschwingung

gekoppelt und ein Lautsprecher angeschlossen werden. Der akustische Nachweis kann auch mit Hilfe eines Rundfunkgerätes geführt werden (Mittelwellenbereich).

Versuch

Man vergleicht zunächst das Bild der unmodulierten Schwingung mit dem der amplitudenmodulierten (Abb. 3.3.4./2) und stellt das letzte dem Bild der einfachen Überlagerung (Abb. 3.3.3./2) gegenüber. Gleichzeitig mit der optischen Wahrnehmung des Versuchsergebnisses ist auch der aufmodulierte Brummtöne von 50 Hz hörbar zu machen. Im Gegensatz zu V 3.3.3. entsteht eine amplitudenmodulierte Schwingung dadurch, daß sich der nichtlineare Widerstand der Röhre mit der Modulationsfrequenz ändert.

Bemerkungen

1. Das Verhältnis $\frac{a}{A_0}$ heißt Modulationsgrad. Er wächst beim Vergrößern der

Modulationsspannung und sinkt beim Vergrößern der Anodenspannung. Theoretische Untersuchungen zeigen, daß die Amplitudenmodulation als Überlagerung dreier Schwingungen mit den Frequenzen f_T , $f_T - f_m$ und $f_T + f_m$ aufgefaßt werden kann, worin f_T die Trägerfrequenz und f_m die Modulationsfrequenz sind.

Das Auftreten der Seitenbandfrequenzen ($f_T - f_m$ und $f_T + f_m$) kann modellmäßig demonstriert werden. Man schließt einen Zungenfrequenzmesser an eine Wechselspannung von 50 Hz über eine Morsetaste an. Unterbricht man den

Stromkreis mit der Morsetaste periodisch mit einer Frequenz von etwa 2 Hz, so schwingen neben der Zunge für 50 Hz auch die für 48 Hz und 52 Hz schwach mit.

2. Bei hinreichend großer Anodenspannung ist die modulierte Hochfrequenz auch mit dem Glimmlichtoszillografen und Drehspiegel (siehe 9. Teil, V 4.1.3.) nachzuweisen. Die Glimmlampe wird über den Vorwiderstand parallel zum Schwingkreis geschaltet. Das Bild der Hochfrequenz erscheint als breites leuchtendes Band. Durch die Modulation erhält es entsprechende Begrenzungskurven.
3. Der akustische Nachweis erfolgt praktisch mit einem Detektorempfänger und ermöglicht die Einführung des Begriffes Demodulation. Die demodulierte HF-Schwingung ist abzubilden, indem man den Oszillografen in der Schaltung nach Abbildung 3.3.4./1 parallel zum Verstärker anschließt (s. V 3.3.2.). Dabei ist auf den richtigen Anschluß der geerdeten Leitung am Verstärker- und Oszillografeneingang zu achten.
4. An Stelle der Netzfrequenz von 50 Hz kann man auch jede andere Tonfrequenz aus einem Tonfrequenzgenerator auf die Hochfrequenz aufmodulieren, indem man sie am besten induktiv aus einem Dreipunktgenerator auskoppelt und an die Primärwicklung des Modulationstransformators legt. Ein Modell für modulierten Tastfunk ist zu schaffen, indem man eine Morsetaste in die Anoden- oder Gitterleitung des Hochfrequenz- oder des Tonfrequenzgenerators legt. Der Empfang der Morsezeichen erfolgt am einfachsten mit einem in der Nähe aufgestellten Rundfunkempfänger.
5. Die Anoden- und Gitterspannungsmodulation kann auch an einem HF-Generator in Meißnerscher Rückkopplungsschaltung erfolgen, indem man die Sekundärwicklung des Modulationstransformators in den Anodenstromkreis oder in Reihe zur Rückkopplungsspule in den Gitterkreis schaltet.

3.3.5. Amplitudenmodulation einer hochfrequenten Träger-schwingung durch Tonfrequenzen

Geräte wie bei V 3:3.4., außerdem

19. Schulverstärker
20. Stimmgabel
21. Spule (1500 Wdg.)
22. Dauermagnet (U-förmig)
23. Kopfhörer
24. Tonbandgerät oder Plattenspieler

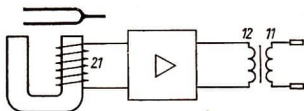
Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.4.!

Variante a: Verwendung einer Stimmgabel

Eine über einem Dauermagneten schwingende Stimmgabel ruft Magnetflußänderungen hervor, die zur Induktion einer tonfrequenten Wechselfspannung ausgenutzt werden können. Diese Spannung wird im Schulverstärker verstärkt und über den Modulationstransformator zur Amplitudenmodulation benutzt (Abb. 3.3.5./1). Dabei läßt sich sowohl die Anoden- als auch die Gittermodulation demonstrieren

Abb. 3.3.5./1 Erzeugen einer tonfrequenten Modulationsschwingung durch eine Stimmgabel



(vgl. V 3.3.4.). An Stelle des Schulverstärkers genügt auch ein Röhrenverstärker nach V 3.3.11., Versuch 2, oder ein Transistorverstärker nach V 3.3.13. als Modulationsverstärker. Nachteilig wirkt sich dabei aus, daß der Modulationsgrad nicht durch Einstellen der Verstärkung geändert werden kann. Auf dem gleichen Prinzip beruht die Verwendung eines Kopfhörers als Behelfsmikrofon.

Variante b: Verwenden eines Tonbandgerätes oder eines Plattenspielers

Die tonfrequente Wechselfspannung wird durch einen Plattenspieler oder ein Tonbandgerät erzeugt und bei eingebautem Leistungsverstärker unmittelbar an die Primärspule gelegt. Geräte ohne Leistungsverstärker werden über den Schulverstärker an den Modulationstransformator angeschlossen.

Die günstigste Verstärkereinstellung muß erprobt werden. Sie liegt im allgemeinen nicht bei der höchsten Verstärkung. Der Nachweis kann gleichzeitig optisch und akustisch mit Hilfe der in V 3.3.4. beschriebenen Anordnung erfolgen.

Bemerkungen

1. An Stelle des Tonbandgerätes oder des Plattenspielers kann auch über einen Verstärker ein Mikrofon eingesetzt werden.
2. Bei der Versuchsdurchführung ist es zweckmäßig, zunächst die unmodulierte Hochfrequenz und die Tonfrequenz getrennt nacheinander mit dem Oszilloskop zu zeigen und dann die modulierte Hochfrequenz.
3. Bei Modulation über ein Mikrofon ist besonders deutlich zu zeigen, daß die Begrenzungskurven der modulierten Hochfrequenz dem Verlauf der Tonfrequenzkurven entsprechen, wenn man Vokale vor dem Mikrofon singt.

3.3.6. Amplitudenmodulierter Transistorsender [SE]

1. Stromversorgungsgerät (10 V~)
2. Gleichspannungsquelle (4,5 V)
3. HF-Transistor auf Steckbrett ®
4. ... 24. wie in V 3.3.4. und V 3.3.5.

Methodische Hinweise

1. Der Versuch ist für den Unterricht in der Oberstufe geeignet, sollte aber vorwiegend in Arbeitsgemeinschaften eingesetzt werden.
2. Vergleiche MH V 3.3.4.!

Versuchsanordnung

Nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.6./1 wird ein Transistorgenerator zur Erzeugung einer hochfrequenten Schwingung aufgebaut.

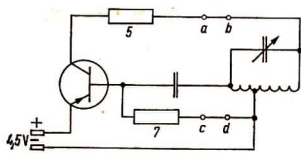


Abb. 3.3.6./1 Transistorgenerator für Hochfrequenz (Modulationsspannung bei a/b oder c/d wie in V 3.3.4.)

Die Modulation erfolgt von einer Tonfrequenzquelle ausgehend nach den Angaben in V 3.3.4. und V 3.3.5. Der Modulationstransformator wird aus einer Primärspule mit 250 Wdg. und einer Sekundärspule mit 1500 Wdg. aufgebaut.

Zur Kollektormodulation wird die Sekundärspule unter Überbrückung durch einen Kondensator von 200 pF in den Kollektorkreis geschaltet.

Zur Basismodulation wird die Sekundärspule in Reihe mit dem Basiswiderstand geschaltet.

Die Nachweismöglichkeiten sind wie in V 3.3.4. und V 3.3.5. zu schaffen.

Versuch

Man demonstriert zunächst die unmodulierte Hochfrequenz, indem man die Modulationsspannung ausschaltet. Dann schließt man den Oszillografen direkt an die Modulationsspannung an, um diese allein abzubilden.

Schließlich zeigt man die durch Kollektor- oder Basismodulation gewonnene modulierte Hochfrequenz.

Bemerkung

Besonders einfach ist die Modulation, wenn man bei c/d einen Kopfhörer als behelfsmäßiges Mikrofon direkt anschließt.



3.3.7. Modellversuch zur drahtlosen Übermittlung von Meßwerten

Geräte wie bei V 3.3.4., außerdem

19. Stromversorgungsgerät (150 V—; 6,3 V~)
20. NF-Verstärker oder Rundfunkgerät
21. Kondensator (0,01 μ F)
22. Fotozelle
23. Glimmlampe

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchsordnung

Die Anordnung besteht aus drei Teilen, die

1. dem Erzeugen der beleuchtungsabhängigen Kippfrequenz,
2. dem Erzeugen und der Modulation der Trägerfrequenz und
3. als Empfänger dienen.

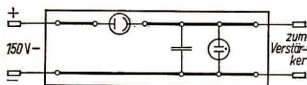


Abb. 3.3.7./1 Anordnung zum Erzeugen einer Kippfrequenz

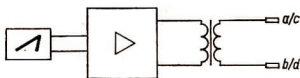


Abb. 3.3.7./2 Blockschaltbild zur drahtlosen Übermittlung von Meßwerten

Nach Abbildung 3.3.7./1 wird eine Schaltung zur Erzeugung einer Kippfrequenz aufgebaut.

Der Kondensator wird über die Fotozelle aufgeladen. Da diese ein beleuchtungsabhängiger Widerstand ist, bestimmt die Beleuchtung die Ladezeit. Nach Erreichen der Zündspannung der Glimmlampe entlädt sich der Kondensator bis zur Löschespannung. Es kommt zu einem sägezahnförmigen Spannungsverlauf. Diese Spannung wird dem Schulverstärker zugeführt. Von dort erfolgt über den Modulationstransformator die Modulation der Trägerfrequenz wie in den vorangegangenen Versuchen. Der Gesamtaufbau der Versuchsanordnung ist aus Abbildung 3.3.7./2 zu entnehmen. Auf die richtige Polung der Spannung an Kippgenerator und Verstärker ist zu achten.

Versuch

Man weist zunächst mit Hilfe des Lautsprechers nach, daß am Ausgang des Schulverstärkers eine beleuchtungsabhängige Frequenz auftritt. Danach erfolgten die drahtlose Übermittlung dieser Frequenz und ihr Nachweis. Sofern eine Lichtquelle bekannter Lichtstärke verfügbar ist, kann man eine Eichung der Meßanordnung vornehmen.

Bei konstanter Kippfrequenz des Oszillografen werden auf dem Bildschirm die Maxima der Modulationsschwingung ausgezählt und in einer Eichkurve über der Beleuchtungsstärke aufgetragen.

Bemerkung

Der Versuch veranschaulicht in stark vereinfachter Form eine Möglichkeit zum drahtlosen Übermitteln von Meßwerten und verschafft den Schülern eine Vorstellung davon, wie Meßwerte von Wettersonden, Satelliten und Raumschiffen zur Erde gesandt werden können. Eine Variationsmöglichkeit bietet der Ersatz der Fotozelle durch einen temperaturabhängigen Widerstand (z.B. Herwid T RLS 100 k Ω vom VEB Keramische Werke Hermsdorf). Damit wird die drahtlose Übermittlung von Temperaturwerten möglich.



3.3.8. Modellversuch zur Frequenzmodulation — Modulation tonfrequenter Schwingungen

Zu Versuch 1

1. Stromversorgungsgeräte (200 V—; 6,3 V~; 8 V~)
2. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
3. Röhrenbrett
4. Spule (1500/750 Wdg.)

5. U-Kern, geblättert
6. I-Kern, geblättert
7. Kondensator (500 pF)
8. Kondensator (0,01 μ F)
9. Kondensator (0,25 μ F)
10. 2 Widerstände (5 k Ω)
11. Widerstand (100 k Ω)
12. Heißeleiterwiderstand (40 V; 0,1 A)
13. Katodenstrahloszillograf
14. Lautsprecher, hochohmig

Zu Versuch 2

an Stelle 12.

15. Germaniumdiode

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuch 1: Frequenzmodulation durch temperaturabhängigen Widerstand

Versuchsordnung

Nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.8./1 wird eine Dreipunktschaltung aufgebaut. Parallel zum Schwingkreis liegen in Reihe ein Kondensator und ein hochohmiger Heißeleiterwiderstand. Die Spule wird auf einen U-Kern mit Joch gesetzt und ihr Mittelabgriff an den Pluspol der Spannungsquelle gelegt. Parallel zum Schwingkreis oder zum Lautsprecher werden die Vertikalablenkplatten des Oszillografen angeschlossen.

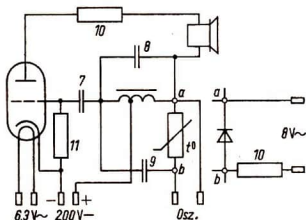


Abb. 3.3.8./1
Schaltung zur Frequenzmodulation

Versuch

Nach Einschalten der Heiz- und Anodenspannung entsteht eine tonfrequente Schwingung, die im Lautsprecher hörbar ist. Durch Verschieben des Eisenkerns stellt man eine hohe Tonfrequenz ein. Die Kippfrequenz am Oszillografen wird so gewählt, daß ein stehendes Bild mit etwa 30 Perioden entsteht.

Erhitzt man den Heißeleiterwiderstand mit einem brennenden Streichholz, so sinkt sein Widerstand und der Kondensator (9) wirkt in zunehmendem Maß frequenzbestimmend auf den Schwingkreis ein. Die Frequenz sinkt. Das ist im Lautsprecher

hörbar und auf dem Bildschirm sichtbar. Beim Abkühlen des Widerstandes wächst die Frequenz wieder.

Versuch 2: Frequenzmodulation durch spannungsabhängigen Widerstand

Ersetzt man in der Schaltung nach Abbildung 3.3.8./1 den Heißeiter durch eine Germaniumdiode, so kann man durch eine Wechselspannung, die den Widerstand der Germaniumdiode periodisch ändert, eine Frequenzmodulation der hohen Tonfrequenz mit einer Frequenz von 50 Hz erreichen. Eine gleichzeitige leichte Amplitudenmodulation läßt sich bei der einfachen Schaltung nicht ganz vermeiden, da mit der Frequenzänderung die Stärke des Anodenwechselstromes etwas schwankt. Um ein möglichst sauberes Bild (Abb. 3.3.8./2) am Oszillografen zu erhalten, empfiehlt es sich, ihn jetzt parallel zur Germaniumdiode anzuschließen.

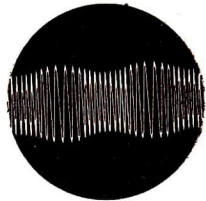


Abb. 3.3.8./2 Oszillogramm einer frequenzmodulierten Schwingung

Bemerkungen

1. Der Versuch 1 kann als Modell für eine Fernübertragung von Temperaturwerten benutzt werden (s. V 3.3.7.).
2. Als Vorversuch zum Versuch 2 kann man an Stelle der Wechselspannung zunächst eine veränderliche Gleichspannung an die Germaniumdiode legen.
3. Obwohl in UKW-Sendern im allgemeinen andere technische Mittel zur Frequenzmodulation eingesetzt werden, kann man mit diesem Versuch ohne großen Aufwand die Frequenzmodulation demonstrieren.



3.3.9. Umsetzen einer Frequenzmodulation in eine Amplitudenmodulation

Geräte wie bei V 3.3.8., außerdem

16. 4 Spulen (1500 Wdg.)
17. 2 U-Kerne, geblättert
18. Kondensator (0,1 μ F)
19. Kondensator (0,25 μ F)
20. 2 Widerstände (1 k Ω)
21. 2 Germaniumdioden

Methodischer Hinweis

Der Versuch ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchsordnung

Es wird ein Differenzdiskriminator nach dem Schaltplan in Abbildung 3.3.9./1 aufgebaut. Die Eingangsspule wird induktiv mit dem Schwingkreis eines frequenzmodulierten Röhrengenerators nach V 3.3.8. gekoppelt, indem man sie auf den dort unbenutzten Schenkel eines U-Kerns setzt. Die beiden Schwingkreisspulen des Diskriminators liegen auf der Sekundärseite eines Übertragers, der aus zwei zu einem geschlossenen Rechteck zusammengestellten U-Kernen aufgebaut wird.

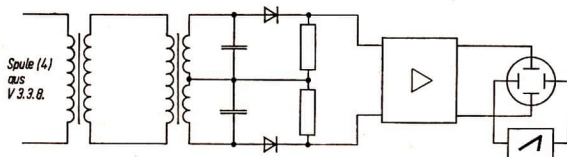


Abb. 3.3.9./1 Diskriminatorschaltung

Versuch

Durch die verschiedene Abstimmung der Schwingkreise bilden sich an den Widerständen Spannungsschwankungen aus, die von den Frequenzschwankungen abhängen, so daß auf dem Bildschirm des Oszillografen das Bild einer amplitudenmodulierten Schwingung erscheint. Man zeigt zunächst nach V 3.3.8. das Bild der frequenzmodulierten Schwingung und dann am Ausgang des Diskriminators das Bild der amplitudenmodulierten Schwingung.

Bemerkung

Der Versuch gibt mit vereinfachten technischen Mitteln ein Modell für die Arbeitsweise des UKW-Empfangsteiles von Rundfunkgeräten.

3.3.10. Modellversuch zur Gleichrichtung im Empfänger

1. Stromversorgungsgerät (4 V~)
2. Wechselstromgenerator aus Aufbauteilen (siehe 9. Teil, V 4.1.3.)
3. Drehspul-Spannungsmesser (1 V und 10 V) mit Nullpunktmitellage
4. Schiebewiderstand (18 Ω)
5. Germaniumdiode
6. Schalter

Methodische Hinweise

1. Der Versuch soll zur Einführung der Hochfrequenzgleichrichtung dienen.
2. Er ist für die Oberstufe bestimmt.

Vorversuch

Zunächst wird gemäß Abbildung 3.3.10./1a der Wechselstromgenerator ohne Diode mit dem Meßgerät verbunden und langsam mit der Hand angetrieben. Der Zeiger

des Meßgerätes (1 V) folgt dem tatsächlichen Spannungsverlauf. Beim Erhöhen der Drehzahl gibt der Generator zwar eine höhere Spannung ab, trotzdem werden die Zeigerausschläge infolge der Trägheit des Zeigers kleiner. Von einer bestimmten Frequenz an bleibt der Zeiger in der Ruhelage stehen. Nun schaltet man die Diode vor das Meßgerät und erhält einen konstanten Ausschlag (Abb. 3.3.10./1 b).

Der Zeiger des Meßgerätes vertritt bei diesem Modellversuch die Membran des Lautsprechers oder Kopfhörers. Auch sie vermag infolge ihrer allerdings wesentlich geringeren Trägheit hohen Frequenzen nicht zu folgen. Soll überhaupt eine Einwirkung zustande kommen, so ist Gleichrichtung erforderlich.

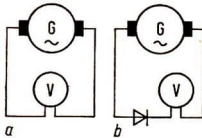


Abb. 3.3.10./1 Vorversuch
a) ohne Diode, b) mit Diode

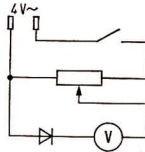
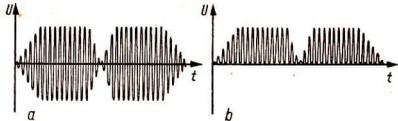


Abb. 3.3.10./2 Modellversuch zur
Gleichrichtung im Rundfunkempfänger

Versuch

Nunmehr wird der Aufbau nach Abbildung 3.3.10./2 vorgenommen. Die 50-Hz-Wechselspannung von 4 V veranschaulicht die Trägerfrequenz, die durch Verändern des Schiebewiderstandes „moduliert“ werden kann. Abbildung 3.3.10./3a gibt ungefähr den Spannungsverlauf wieder. Ohne Diode bleibt der Zeiger in der Ruhelage, während er nach dem Gleichrichten dem Gang der Niederfrequenz folgt, die durch den Schiebewiderstand aufgeprägt wird (Abb. 3.3.10./3 b). Für diesen Versuch muß der Meßbereich auf 10 V erweitert werden.

Abb. 3.3.10./3
Spannungsverlauf vor (a) und
nach (b) der Gleichrichtung



3.3.11. Diodenempfänger für Sprechfunksendungen [SE]

Zu Versuch 1

1. Drehkondensator (500 pF)
2. HF-Spule (50 oder 100 Wdg. je nach der Frequenz des Ortssenders)
3. Germaniumdiode
4. Kopfhörer
5. Antenne ($l > 6$ m)
6. Katodenstrahlzillograf



Zu Versuch 2

7. Stromversorgungsgerät (200 V—; 6,3 V~)
8. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
9. Röhrenbrett
10. Lautsprecher, hochohmig
11. Widerstand (1 k Ω)
12. Widerstand (150 Ω)
13. Elektrolytkondensator (50 μ F)
14. Gleichspannungsquelle (4,5 V—)
15. NF-Transistor
16. Transistorbrett $\text{\textcircled{S}}$
17. Widerstand (5 k Ω ... 20 k Ω)
18. Widerstand (50 k Ω ... 200 k Ω)
19. Elektrolytkondensator (10 μ F)

Methodische Hinweise

1. Versuch 1 ist besonders für die Oberstufe zur Demonstration der Demodulation geeignet.
2. Versuch 2 dient dazu, das Ergebnis der Demodulation der ganzen Klasse hörbar zu machen.

Versuch 1: Diodenempfänger

Der Aufbau erfolgt stufenweise nach Abbildung 3.3.11./1. Zunächst wird der Schwingkreis aufgebaut und der Oszillograf wird parallel dazu angeschlossen. Es muß eine gute Erdung vorhanden sein (Wasserleitung). Schaltet man den Oszillografen auf seine höchste Verstärkungsstufe, so kann man die modulierten HF-Schwingungen abbilden. Der Schwingkreis wird auf den am stärksten einfallenden Sender abgestimmt.

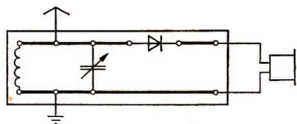


Abb. 3.3.11./1
Aufbau eines Diodenempfängers

Legt man zwischen den Schwingkreis und den Oszillografen die Germaniumdiode, so erscheint auf dem Bildschirm des Oszillografen das Bild der gleichgerichteten HF-Schwingung. Schließlich wird der Oszillograf durch einen Kopfhörer ersetzt, in dem die Modulationsschwingungen des Senders hörbar werden. Dabei muß der Schwingkreis etwas nachgestimmt werden.

Versuch 2: Diodenempfänger mit Verstärker

Um die empfangene Sendung für alle Schüler hörbar zu machen, schließt man nach Abbildung 3.3.11./2 einen Röhren- oder Transistorverstärker an die Empfangschaltung an.

Es ist auch möglich, wie in V 3.3.12. und V 3.3.13., eine weitere Verstärkerstufe anzukoppeln oder aber den Kopfhörer durch einen Widerstand von 5 k Ω zu ersetzen

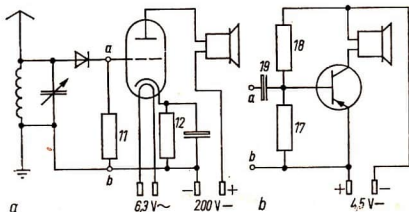


Abb. 3.3.11./2 Anschluß von Verstärkern an den Diodenempfänger:

- a) Röhrenverstärker,
b) Transistorverstärker

und einen NF-Verstärker oder ein Rundfunkgerät mit seinem Plattenspieleringang anzuschließen.

Bemerkungen

1. In Abbildung 3.3.11./3a und b sind die Aufbaumöglichkeiten mit dem EMB-Hochfrequenzsatz dargestellt. Zur Demonstration des Diodenempfängers ist der Verstärkerteil zunächst durch eine schwarze Pappe abzudecken und nach a zu verfahren.
2. Bei Schülerexperimenten darf die Anodenspannung 42 V nicht überschreiten.

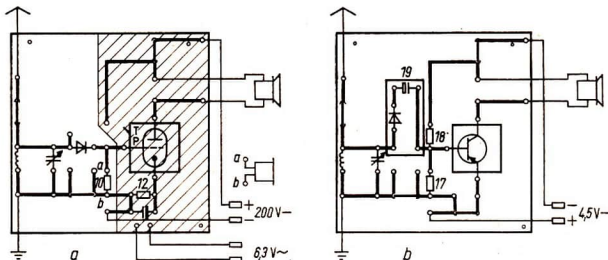


Abb. 3.3.11./3 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz:

- a) Röhrenverstärker, b) Transistorverstärker



3.3.12. Audionempfänger [SE]

1. Stromversorgungsgerät (200 V—; 6,3 V~)
2. 2 Trioden oder Pentoden in Triodenschaltung
3. 2 Röhrenbretter
4. 2 Drehkondensatoren (500 pF)
5. 2 Kondensatoren (100 pF)
6. Kondensator (0,01 pF)
7. Elektrolytkondensator (50 μ F)

8. 2 Widerstände (500 k Ω)
9. 2 Widerstände (100 k Ω)
10. Widerstand (150 Ω)
11. HF-Spule (100 Wdg.)
12. HF-Spule (50 Wdg.)
13. Antenne ($l > 6$ m)
14. Kopfhörer
15. Lautsprecher, hochohmig
16. Katodenstrahloszillograf

Methodische Hinweise

1. Auch am Audion kann man die Demodulation mit dem Oszillografen nachweisen.
2. Die Behandlung des Audions ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Versuchsordnung

Abbildung 3.3.12./1 gibt den Gesamtaufbau der Versuchsanordnung wieder. Man wird ihn der Reihe nach entstehen lassen und zunächst mit dem Audion beginnen. Erst zum Schluß wird man den NF-Verstärker hinzunehmen.

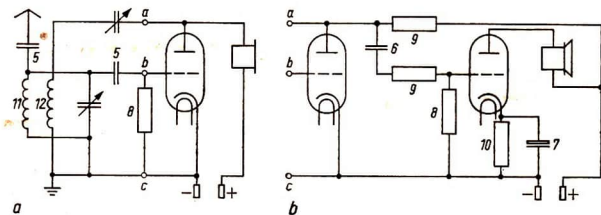


Abb. 3.3.12./1 a) Audionschaltung, b) Verstärker am Audion

Versuch 1. Abstimmung des Schwingkreises auf den Ortssender

Nach dem Aufbau des Schwingkreises weist man mit Hilfe des Katodenstrahloszillografen die modulierte Hochfrequenz nach (vgl. V 3.3.11.). Der Schwingkreis wird auf den Ortssender eingestellt. Es erscheint eine maximale Amplitude auf dem Bildschirm.

Versuch 2: Aufbau des Audions

Es folgt der Aufbau des Audions und der Nachweis der Demodulation mit Hilfe eines Kopfhörers. Parallel zum Gitterwiderstand (8) kann der Katodenstrahloszillograf angeschlossen werden (Abb. 3.3.12./2a).

Der Gitterkondensator verhindert einen Kurzschluß für die Gleichrichterstrecke Katode—Gitter. Er muß groß genug für die Hochfrequenz sein, darf aber für die Niederfrequenz nicht zu groß sein. Den optimalen Wert kann man mit Hilfe eines Drehkondensators finden. Er liegt zwischen 100 pF und 200 pF.

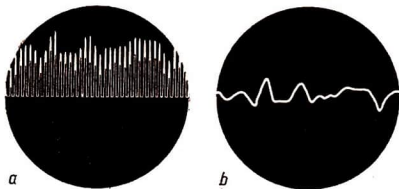


Abb. 3.3.12./2 Oszillogramme:
a) gleichgerichtete Hochfrequenz,
b) Niederfrequenz

Versuch 3: Einbau der Rückkopplung

Die Rückkopplung wird eingebaut und die Verbesserung des Empfanges wie in Versuch 2 mit dem Kopfhörer und mit dem Katodenstrahloszillografen nachgewiesen. Bei zu fester Rückkopplung werden Eigenschwingungen erzeugt, die zusammen mit der empfangenen Frequenz eine tonfrequente Schwebung ergeben. Der Empfänger pfeift und ist bei dieser Einstellung zum Empfang unmodulierter Tastfunksendungen geeignet (vgl. V 3.3.2.).

Versuch 4: Anbau eines NF-Verstärkers

Der NF-Verstärker wird angeschlossen. Dazu ersetze man den Kopfhörer durch einen Anodenwiderstand von 100 k Ω . Es ist nunmehr ein Lautsprecherempfang des Ortssenders möglich. Parallel zum Lautsprecher liegen die Y-Platten des Katodenstrahloszillografen. Der Bildschirm zeigt die verstärkte tonfrequente Schwingung (Abb. 3.3.12./2b).

Bemerkungen

1. Der Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz erfolgt mit den zum Gerät gehörigen Schablonen Nr. 10 und Nr. 6 nach Abbildung 3.3.12./3. Zur besseren Übersicht kann man jedoch auf die Siebung der Anodenspannung verzichten. Diese Schaltungsteile sind in Abbildung 3.3.12./3 fortgelassen.

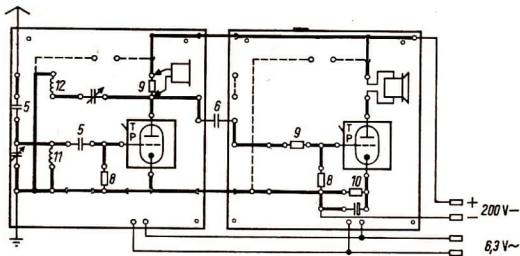


Abb. 3.3.12./3 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz (linke Schaltplatte nach 3.0.5. geändert)

2. Es ist günstig, die Schablone für die Audionschaltung mehrfarbig zu gestalten:
rot: Antenne und Schwingkreis
weiß: Audionteile mit Gitterkondensator, Gitterwiderstand und Röhre
grün: Rückkopplung
3. Bei Schülerexperimenten darf die Anodenspannung 42 V nicht überschreiten.

3.3.13. Transistor-Audion mit Transistor-Verstärker [SE]

1. Gleichspannungsquelle (4,5 V)
2. 2 Drehkondensatoren (500 pF)
3. 2 Kondensatoren (100 pF)
4. Kondensator (4 μ F)
5. 2 HF-Spulen (100 Wdg.)
6. 2 HF-Spulen (50 Wdg.)
7. 2 Widerstände (10 k Ω)
8. 2 Potentiometer (100 k Ω) mit Schutzwiderstand (2,5 k Ω) ®
9. HF-Transistor
10. NF-Transistor
11. 2 Transistorbretter ®
12. Antenne ($l > 6$ m)
13. Kopfhörer
14. Lautsprecher, hochohmig
15. Katodenstrahloszillograf

Methodischer Hinweis

Vergleiche MH V 3.3.12.1

Versuchsordnung

Abbildung 3.3.13./1 gibt das Gesamtschaltbild der Versuchsanordnung wieder. Im Unterricht wird man den Versuch in Teilabschnitten aufbauen und ihn schrittweise entwickeln.

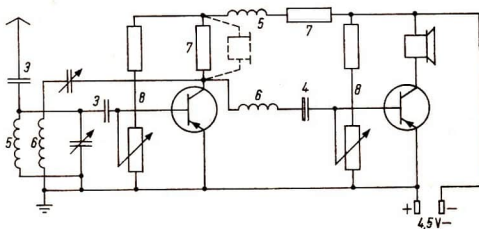


Abb. 3.3.13./1 Transistoraudion mit Transistorverstärker

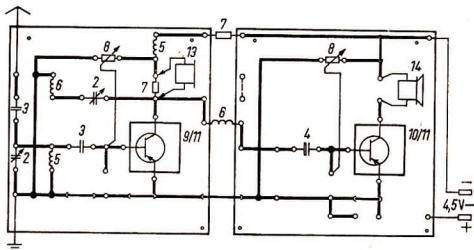


Abb. 3.3.13./2 Aufbau mit dem EMB-Hochfrequenzsatz
(linke Schaltplatte nach 3.0.5. geändert)

Die Einstellung der Basisspannung für die Transistoren ist durch Potentiometer möglich, die nach Abbildung 3.3.13./3 zu fertigen sind. Die Spannungsteilerschaltung kann aber auch durch zwei Festwiderstände hergestellt werden, zwischen Basis und Minuspol müssen $50\text{ k}\Omega$ bis $200\text{ k}\Omega$, zwischen Basis und Pluspol $5\text{ k}\Omega$ bis $20\text{ k}\Omega$ liegen. Die günstigsten Werte sind zu erproben.

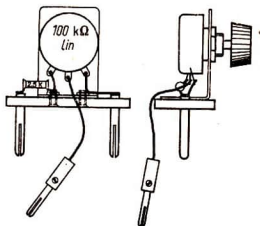


Abb. 3.3.13./3 Potentiometer mit Schutzwiderstand
($2,5\text{ k}\Omega$)

Versuch 1: Abstimmen des Schwingkreises auf den Ortssender

Zunächst wird nur der Schwingkreis zusammengestellt und auf den Ortssender abgestimmt. Der Katodenstrahloszilloskop liegt parallel zum Schwingkreis und zeigt das Optimum der Abstimmung an. Die Schüler erkennen die modulierte Hochfrequenz.

Versuch 2: Aufbau des Audions

Dann folgt die Ergänzung durch den Anbau des Audioteiles. Mit Hilfe des Potentiometers stellt man den Arbeitspunkt des Transistors so ein, daß eine gute Gleichrichtung der HF-Schwingungen erfolgt. Mit Hilfe des Katodenstrahloszilloskop und des Kopfhörers läßt sich nachweisen, daß ein Vergrößern des Koppelkondensators durch Austausch gegen eine größere Kapazität die Lautstärke des Empfangs nicht wesentlich erhöht. Der Schwingkreis wird aber stärker gedämpft, wodurch sich die Trennschärfe verringert.

Versuch 3: Einbau der Rückkopplung

Nun ergänzt man die Schaltung durch Einbau der Rückkopplung. Bei einer bestimmten Stellung des in der Rückkopplungsleitung liegenden Drehkondensators wird ein Maximum der Amplitude im Schwingkreis und ein Maximum an Lautstärke erreicht. Die in der Anodenleitung liegende Drossel verringert das Abfließen der HF-Komponente über die Spannungsquelle.

Versuch 4: Ankopplung des NF-Verstärkers

Schließlich wird der NF-Verstärker angekoppelt. Zur Kopplung dienen eine Drossel (100 Wdg.), die das Abfließen der Hochfrequenz verhindert, und ein Kondensator von 4 μF . Den Arbeitspunkt des Verstärkers stellt man wie beim Audion mit Hilfe des Potentiometers ein. Das Optimum läßt sich mit dem Gehör feststellen. In der Nähe eines stärkeren Senders kann man nunmehr ohne Schwierigkeiten Lautsprecherempfang erreichen. Bei größerer Entfernung des Senders muß man sich dagegen mit dem Kopfhörer begnügen. Bei einer Frequenz von 1000 kHz oder mehr läßt sich die Schaltung nicht mehr genau abstimmen, wenn man die Spule mit 1000 Windungen als Schwingkreisspule benutzt. Man vertauscht in diesem Falle Schwingkreis- und Rückkopplungsspule miteinander.

3.3.14. Antennenkopplung

Geräte wie bei V 3.3.11., außerdem

20. Kondensator (100 pF)

21. HF-Spule (100 Wdg.)

Methodische Hinweise

1. Die Versuche können zur Wiederholung der Kopplungsarten herangezogen werden.
2. Besonders durch die induktive Kopplung der Antenne wird der Schwingkreis weniger gedämpft und der Empfänger wird trennschärfer.

Versuch 1: Galvanische Ankopplung

Wie in V 3.3.11. wird ein Detektorempfänger mit einem NF-Verstärker zusammengestellt. Die Antenne ist unmittelbar mit dem Schwingkreis verbunden. Man bezeichnet diese Kopplungsart als galvanische Kopplung (Abb. 3.3.14./1a).

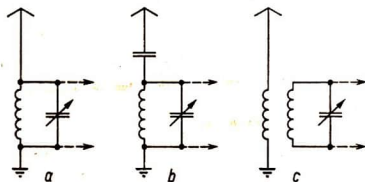


Abb. 3.3.14./1 Kopplungsarten:
 a) galvanisch,
 b) kapazitiv,
 c) induktiv

Versuch 2: Kapazitive Ankopplung

Man ersetzt den Kurzschlußbügel in der Antennenleitung durch einen Kondensator und erhält so die kapazitive Kopplung (Abb. 3.3.14./1b). Die Veränderung der Antennenankopplung macht meist ein Nachstellen der Schwingkreisabstimmung erforderlich.

Versuch 3: Induktive Ankopplung

Man demonstriert die induktive Antennenkopplung, indem man eine Anordnung nach Abbildung 3.3.14./1c vornimmt. Man ordnet in Verlängerung der Schwingkreis-spule eine zweite HF-Spule an, die mit ihr auf der gleichen Achse liegt. An das eine Ende dieser NF-Spule schließt man die Antenne an, das andere Ende erdet man.

3.4. Fernsehen**3.4.1. Modellversuch zum Fernsehen mit der Nipkow-Scheibe**

1. Nipkow-Scheibe
2. Experimentiermotor
3. Schiebewiderstand (1400 k Ω)
4. kurze optische Bank mit Reitern
5. Diapositivhalter
6. Diapositiv mit E \otimes
7. Linse ($f = +60$ mm)
8. Fotozelle (350 PALA/GIE oder ähnliche)
9. Buchsenplatte \otimes
10. transparenter Schirm
11. Bildwerfer
12. Signalglimmlampe (220 V)
13. Lampenbrett (E 27)
14. Linse ($f = +50$ mm)
15. Stromversorgungsgerät (300 V—; 6,3 V \sim)
16. Triode oder Pentode in Triodenschaltung
17. Röhrenbrett
18. Potentiometer (200 k Ω lin) vgl. V 3.3.13.
19. Widerstand (2 k Ω ... 5 k Ω)
20. Widerstand (100 k Ω)
21. 2 Widerstände (500 k Ω)
22. 1 Kondensator (0,1 μ F)
23. 1 NV-Elko (50 μ F)

Methodischer Hinweis

Der Versuch zur historischen Entwicklung des Fernsehens ist für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Herstellung einer Nipkow-Scheibe und eines Diapositivs

Aus steifem, möglichst dunklem Karton wird nach Abbildung 3.4.1./1 eine Nipkow-Scheibe gefertigt. Die Löcher auf der spiralförmigen Linie müssen möglichst exakt mit der Lochzange ausgestanzt werden. Auf das Loch in der Mitte wird mit Alleskleber ein Bedienungsknopf geklebt, wie er für Drehkondensatoren usw. üblich ist. Durch diesen kann die Scheibe auf der Motorachse befestigt werden. Für manche Motoren muß die Bohrung auf einen Durchmesser von 7 mm aufgebohrt werden. Aus schwarzem Papier wird ein E, zum Senderbildfenster passend, ausgeschnitten, auf ein Diapositivdeckglas aufgeklebt und mit einer Maske (24 mm × 36 mm) wie üblich verglast.

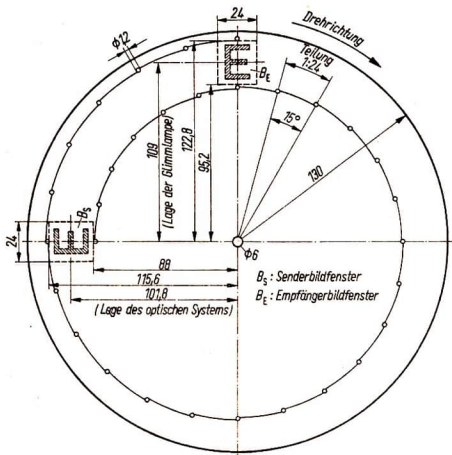


Abb. 3.4.1./1
Nipkow-Scheibe

Versuch 1: Demonstration der Abtastung

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.1./2 ohne Fotozelle, Glimmlampe und Linse (14). Während der Versuchsdurchführung ist der Raum abzudunkeln. An diesem Versuch lassen sich die beiden Grundlagen des Fernsehens, die Bilderlegung und die physiologische Voraussetzung, die Trägheit des Auges, anschaulich demonstrieren. Im ersten Teil des Versuches wird die Lochscheibe von Hand bewegt. Besonderer Wert ist auf die Vermittlung folgender Erkenntnis zu legen: In jeder beliebigen Lage der Lochscheibe ist immer nur eine einzige Öffnung im Bildfenster. Erst wenn eine Öffnung das Bildfenster verläßt, erscheint die nächste. Das Bild des im Bildfenster befindlichen Diapositivs ist noch nicht zu erkennen. Bei schnellerem Drehen der Lochscheibe artet der „Bildpunkt“ zu einer Zeile aus, die über das Bildfeld wandert. Das Bild des Diapositivs ist infolge der Trägheit des Auges erst dann zu erkennen, wenn das Bildfenster Zeile für Zeile in schneller

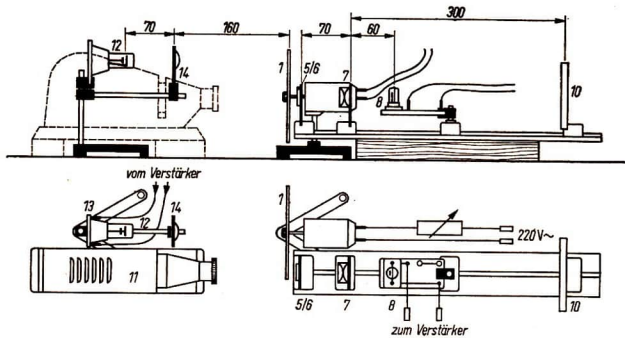


Abb. 3.4.1./2 Aufbau des Modells zur Abstimmung und Bildwiedergabe

Folge ausgeleuchtet wird. Zum Erreichen und Beibehalten dieser Abstastgeschwindigkeit schaltet man den Motor ein.

Mit Hilfe eines Handtachometers läßt sich die Drehzahl (Abstastgeschwindigkeit) ermitteln, die unbedingt zum Erzeugen eines flimmerfreien Bildes erforderlich ist.

Versuch 2: Grundlagen einer Fernschanlage mit Nipkow-Scheibe

Der Versuchsaufbau wird durch die Fotozelle, die Glühlampe, die Linse (14) und den Verstärker nach Abbildung 3.4.1./2 und 3 ergänzt. Der Verstärker kann aus Teilen eines HF-Aufbausatzes (z.B. EMB-Hochfrequenzsatz) aufgebaut werden. Die Zuleitung zur Fotozelle erfolgt am besten mit abgeschirmtem Kabel. Das ist aber nicht unbedingt erforderlich. Zu Beginn des Versuches ist das Potentiometer

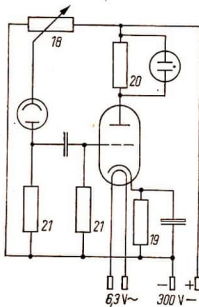


Abb. 3.4.1./3 Verstärkerschaltung



Abb. 3.4.1./4 Empfängerbild

so einzustellen, daß an der Fotozelle keine Spannung liegt. Der Bildwerfer wird eingeschaltet und die Optik so eingestellt, daß die beleuchtete Fläche auf der Nipkow-Scheibe nicht wesentlich größer als das abzutastende Diapositiv ist. Der Motor wird auf eine so hohe Drehzahl gebracht, daß das Bild flimmerfrei abgetastet wird. Die Fotozelle (8) steht im Brennpunkt der Linse (7). Die Heiz- und Anodenspannung werden nacheinander eingeschaltet. Durch die Nipkow-Scheibe wird die Glimmlampe beobachtet und die Fotozellenspannung so hoch eingestellt, daß ein deutliches Bild des E sichtbar wird (Abb. 3.4.1./4). Es ist darauf zu achten, daß in der Fotozelle keine Glimmentladung eintritt. Das genaue Ausrichten der optischen Teile erfolgt am besten auf Grund der Bildbeobachtung. Dieser Versuch kann dem Erarbeiten der gesamten physikalischen Grundlagen des Fernsehens dienen:

1. Zerlegen eines Bildes in „Bildpunkte“
2. Umwandeln der Helligkeit der Bildpunkte in elektrische Impulse
3. Verstärken und Übertragen der elektrischen Impulse vom Sender zum Empfänger
4. Rückverwandlung der elektrischen Impulse in verschiedene Helligkeiten
5. Zusammensetzen der verschiedenen hellen Bildpunkte zum Empfängerbild
6. Notwendiger Gleichlauf zwischen Zerlegen und Zusammensetzen des Bildes

Bemerkungen

1. Gegenüber den früheren technischen Versuchsanlagen, in denen in Sender und Empfänger zwei Nipkow-Scheiben synchron laufen mußten, wird der Gleichlauf in diesem Modell durch die Verwendung einer Scheibe für Abtastung und Bildaufbau gewährleistet.
2. Auf Grund der geringen Bildpunktzahl ist es nicht ratsam, detaillierte Diapositive oder gar Halbtonvorlagen übertragen zu wollen. Man beschränkt sich auf einfache Buchstaben und Ziffern.
3. Der Katodenwiderstand für die Gittervorspannung ist wegen der kleinen Anodenstromstärke verhältnismäßig groß und muß für die verschiedenen Röhrentypen so erprobt werden, daß ein gutes Bild entsteht.

3.4.2. Bauanleitung für die Montage der Teilschaltungen zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe

Zur Teilschaltung a

- | | |
|--|--|
| 1. 2 Hartpapierplatten
(5 mm × 100 mm × 300 mm) als
Grundplatten | 9. Kondensator (0,1 µF/1 kV) |
| 2. 2 Oszillografenröhren
(B 6 S 1 WB oder B 6 S 1) | 10. Widerstand (200 kΩ/0,1 W) |
| 3. 2 Stahlröhrenfassungen (E 8-polig) | 11. 2 Schablonen
a) für Abtasteinrichtung
b) für Wiedergabeeinrichtung |
| 4. 2 Potentiometer (50 kΩ/0,8 W) | 12. 4 Senkschrauben M 4 für Plattenhalter |
| 5. 2 Potentiometer (500 kΩ/0,8 W) | 13. Metallbügel |
| 6. 4 Widerstände (1 MΩ/0,1 W) | 14. 6 Schrauben M 3 mit Muttern
zum Befestigen von 3. und 9.
mittels 13. |
| 7. 4 Kleindrehkнопfe (A 15/6) | 15. 2 Kontaktfedern |
| 8. 18 Geräteklappen oder Telefonbuchsen | |

Zu Teilschaltung b

- | | |
|---|---|
| 16. Hartpapierplatte
(5 mm × 180 mm × 180 mm) als
Grundplatte | Grundbretter für Frequenzbereich-
Kondensatoren (FB-Kondensator) ® |
| 17. 2 Pentoden EL 83 | 29. 20 Bananenstecker mit Gewindeansatz |
| 18. 2 9-polige Miniaturfassungen | 30. FB-Kondensator (0,5 µF) |
| 19. 2 Potentiometer (500 kΩ/0,8 W) | 31. FB-Kondensator (0,25 µF) |
| 20. 6 Widerstände (100 kΩ/0,25 W) | 32. FB-Kondensator (0,1 µF) |
| 21. 2 Widerstände (150 kΩ/0,25 W) | 33. FB-Kondensator (50 nF) |
| 22. 2 Widerstände (500 kΩ/0,25 W) | 34. FB-Kondensator (30 nF) |
| 23. 2 Widerstände (40 kΩ/0,5 W) | 35. FB-Kondensator (15 nF) |
| 24. 2 Kondensatoren (0,1 µF/500 V) | 36. FB-Kondensator (10 nF) |
| 24. 2 Kondensatoren (0,1 µF/500 V) | 37. FB-Kondensator (5 nF) |
| 25. 20 Telefonbuchsen | 38. FB-Kondensator (3 nF) |
| 26. 2 Drehknöpfe | 39. FB-Kondensator (2 nF) |
| 27. Schablone für Doppelkippergerät ® | 40. Senkschraube M 4 für Plattenhalter |
| 28. 5 Hartpapierplatten
(5 mm × 40 mm × 50 mm) als | 41. 8 Schrauben M 3 mit Muttern
zum Befestigen von 18. an 42. |
| | 42. 4 Blechwinkel |

Zu Teilschaltung c

- | | |
|---|---|
| 43. Hartpapierplatte
(5 mm × 180 mm × 180 mm) als
Grundplatte | 53. Widerstand (150 Ω/0,5 W) |
| 44. Fotozelle 350 RS GAE | 54. Kondensator (0,1 µF/500 V) |
| 45. 2 Trioden EC 92 | 55. Widerstand (500 kΩ/0,1 W) |
| 46. 3 7-polige Miniaturfassungen | 56. Widerstand (500 kΩ/0,5 W) |
| 47. Potentiometer (5 kΩ/0,8 W)
mit Vorwiderstand (7 kΩ/1 W) | 57. Widerstand (150 kΩ/0,5 W) |
| 48. Widerstand (200 kΩ/0,5 W) | 58. Elektrolyt-Kondensator (50 µF/15 V) |
| 49. Kondensator (20 nF/250 V) | 59. 8 Telefonbuchsen |
| 50. Elektrolyt-Kondensator (10 µF/450 V) | 60. Schablone für Bildverstärker |
| 51. Widerstand (300 kΩ/0,1 W) | 61. Senkschraube M 4 für Plattenhalter |
| 52. Widerstand (10 kΩ/1 W) | 62. 12 Schrauben M 3 mit Muttern
zum Befestigen von 46. an 60. |
| | 63. 6 Blechwinkel |

Das Versuchsgerät besteht aus drei Baugruppen:

1. Abtasteinrichtung (Teil a),
2. Steuergerät, bestehend aus den Ablenkeräten (Teil b) und dem Bildverstärker (Teil c),
3. Wiedergabeeinrichtung (Teil a).

Methodischer Hinweis

Die Bauanleitungen sind für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.

Teilschaltung a: Abtasteinrichtung und Wiedergabeeinrichtung

Die Röhrenbretter für Abtastung und Wiedergabe werden gleichartig aufgebaut. Als erstes versieht man die Grundplatten (1) nach Abbildung 3.4.2./1 mit Öffnungen für die Röhrenfassung (3), in die die Oszillografenröhren senkrecht zu den Röhrenbrettern gesteckt werden. Dann werden die Schablonen (11) hergestellt. Dazu wer-

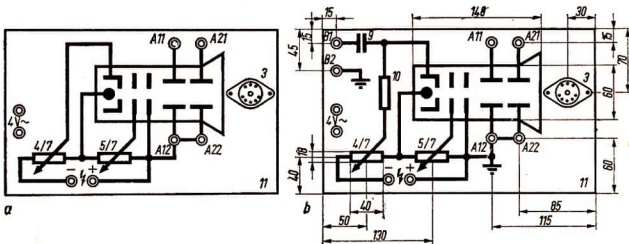


Abb. 3.4.2./1 Schablone des Röhrenbrettes:
a) Abtasteinrichtung, b) Wiedergabeinrichtung

den die aus Abbildung 3.4.2./1a und b ersichtlichen Schaltpläne auf Transparentpapier gezeichnet und fotokopiert (Transparentpapier auf Fotopapier legen, mit Glasplatte andrücken, belichten und entwickeln). Der Schaltplan erscheint weiß auf schwarzem Untergrund. Die so gefertigten Schablonen werden mit einem Fotokleber, keinem Aceton-Kleber, auf die vorher aufgerauten und mit Zeichenkarton beklebten (hierzu kann auch ein Aceton-Kleber verwendet werden) Grundplatten geleimt.

Nun werden die Bohrungen für die Telefonbuchsen, die Potentiometer und die Befestigungsschrauben der Röhrenfassung (6 mm, 10 mm und 3 mm \varnothing) an den vorgeschriebenen Stellen in die Grundplatte gebohrt und diese Teile mit der Grundplatte verschraubt.

Der für die Wiedergabeinrichtung erforderliche Kondensator (9) wird mit einem Metallbügel (14) an die Rückseite der Grundplatte geschraubt. Dort erfolgt auch die Verdrahtung nach Abbildung 3.4.2./1a und b. Für den Anschluß der Beschleunigungsanode (a_2) müssen die Röhrenfassungen einen zusätzlichen Mittelkontakt (15) (Federblech aus Kupfer oder Messing) erhalten, der von einer Befestigungsschraube der Röhrenfassung gehalten wird. Parallel zu den Ablenkplattenpaaren ist je ein Widerstand (6) von $1\text{ M}\Omega$ direkt an die Röhrenfassung zu löten, der im Schaltplan nicht angegeben wird (Abb. 3.4.2./3). B_2 ist mit A_{12} und A_{22} zu verbinden. Für die Befestigung zweier Plattenhalter sind in die Grundplatten an geeigneten Stellen Senkschrauben M 4 einzusetzen.

Teilschaltung b: Doppelkippperät

Die zum Ablenken des Elektronenstrahls benötigten zwei Kippspannungen werden in zwei gleichen Kippgeräten erzeugt, die auf einer Grundplatte (16) aufgebaut werden.

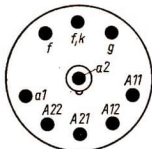


Abb. 3.4.2./2 Sockelschaltung der B 6 S 1

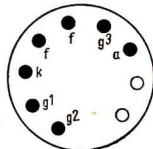


Abb. 3.4.2./3 Sockelschaltung der El 83

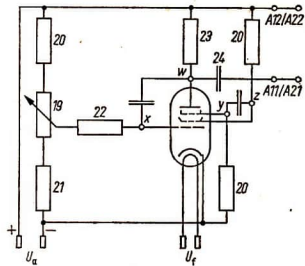


Abb. 3.4.2./4
Schaltung des Kippperätes

Zunächst ist wieder eine Schablone (27) nach Abbildung 3.4.2./5 herzustellen und auf die Platte zu kleben. Es folgen Einbau der Potentiometer (19), Einsetzen der Telefonbuchsen (25), Einsetzen einer Senkschraube M 4 (40) zur Aufnahme des Plattenhalters und Befestigen zweier Röhrenfassungen (3) mittels je zweier Blechwinkel (42) an der Rückseite der Grundplatte (Abb. 3.4.2./5, Nebenbild). Die Verdrahtung erfolgt nach Abbildung 3.4.2./4 auf der Plattenrückseite. Die einzelnen Bauelemente werden direkt an die Anschlußfahnen der Potentiometer bzw. an die der Röhrenfassung (Abb. 3.4.2./2) gelötet.

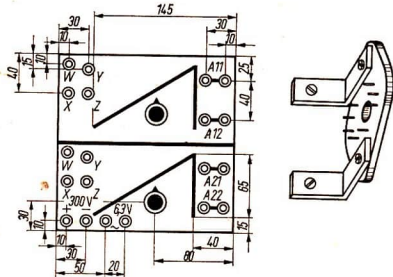


Abb. 3.4.2./5
Schablone des Doppelkippperätes

Damit der Einbau zweier mehrpoliger Schalter vermieden wird, werden die Kondensatoren zur Grobregelung der Kippfrequenz nicht in die Schaltung gebaut, sondern auf Steckbrettern (28) zwischen je zwei Bananenstecker (29) verlötet. Der Aufbau eines Steckbrettes geht aus Abbildung 3.4.2./6 hervor. Folgende Kondensatorkombinationen sind herzustellen (siehe Seite 250 oben links). Die Feinregelung der Kippfrequenz erfolgt mit Hilfe der Potentiometer.

Teilschaltung c: Bildverstärker (Abb. 3.4.2./7 und 3.4.2./10)

Der Aufbau des Bildverstärkers erfolgt analog dem Doppelkippperät. Die Fotozelle und die beiden Trioden werden auf der Rückseite des Grundbrettes an Blechwinkeln befestigt. Die Fotozelle muß frei über den seitlichen Rand hervorragen.

Buchsen	WX	YZ
Steckbrett I	0,25 μ F	0,5 μ F
Steckbrett II	50 nF	0,1 μ F
Steckbrett III	15 nF	30 nF
Steckbrett IV	5 nF	10 nF
Steckbrett V	2 nF	3 nF

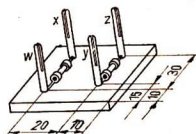


Abb. 3.4.2./6 Aufbau eines Steckbrettes für Frequenzbereichskondensatoren

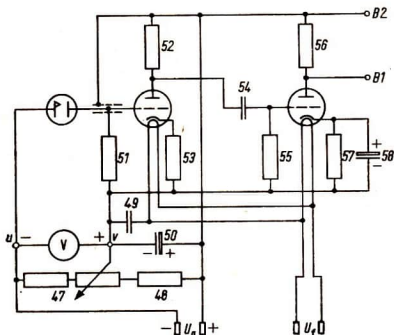


Abb. 3.4.2./7 Schaltung des Bildverstärkers

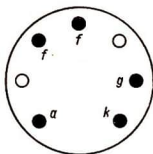


Abb. 3.4.2./8 Sockelschaltung der EC 92

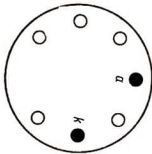


Abb. 3.4.2./9 Sockelschaltung der 350 RS GAE

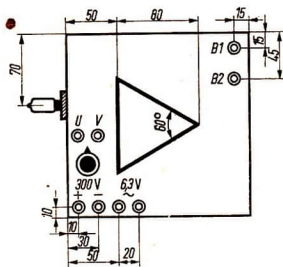


Abb. 3.4.2./10 Schablone des Bildverstärkers

An Stelle zweier Trioden kann auch eine Doppeltriode verwendet werden. Die Leitung von der Anode der Fotozelle zur ersten Verstärkerröhre ist möglichst kurz zu halten und gegebenenfalls abzuschirmen. Wenn man das zu übertragende Diapositiv nicht mit der Hand halten will, kann an entsprechender Stelle der Grundplatte eine Haltevorrichtung angebracht werden. Es empfiehlt sich nicht, die Teilschaltungen des Steuergerätes sichtbar aufzubauen, da beim experimentellen Behandeln des Fernsehens nicht die Wirkungsweise einzelner Schaltungen, etwa eines Verstärkers, sondern das Zusammenspiel von Baugruppen interessiert. Mit dem Potentiometer ist die Fotozellenspannung einzustellen. Bei UV kann ein Spannungsmesser angeschlossen werden, um sie zu überwachen.



3.4.3. Grundlagenversuche zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe

Zu Versuch 1

1. 2 Stromversorgungsgeräte (550 V—; 700 V—; 4 V~ und 300 V—; 6,3 V~)
2. Abtast-Röhrenbrett mit Oszillografenröhre B 6 S 1 (nach V 3.4.2.) Ⓢ
3. Doppelkippergerät mit zwei Pentoden EL 83 (nach V 3.4.2.) Ⓢ
4. Steckbrett mit Frequenzbereichskondensatoren (nach V 3.4.2.) Ⓢ

Zu Versuch 2

- Geräte 1. und 2. wie zu Versuch 1., außerdem
5. Röhrenbrett für Wiedergabe mit Oszillografenröhre B 6 S 1 (nach V 3.4.2.) Ⓢ
 6. Bildverstärker mit 2 Trioden EC 92 und Fotozelle 350 RS GAE (nach V 3.4.2.) Ⓢ

Zu Versuch 3

- Geräte 1. bis 6. wie zu Versuch 1 und 2, außerdem
8. Diapositiv (abwechselnd durchsichtige und undurchsichtige Streifen) Ⓢ
 9. Kondensator 0,01 μF

Zu Versuch 4

- Geräte 1. bis 6. wie zu Versuch 1 und 2, außerdem
10. Diapositiv (Buchstabe oder Zahl) Ⓢ

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Die Versuche führen vom Aufbau des Rasters über die Wiedergabe von Helligkeitsunterschieden zur modellmäßigen Übertragung eines einfachen Bildes.

Versuch 1: Entstehung des Fernsehrastrers

Die Versuchsanordnung ist aus Abbildung 3.4.3./1 ersichtlich. Zunächst schaltet man die Heizspannung ein. Nach etwa 10 Sekunden erhält die Oszillografenröhre eine Anodenspannung von 550 V. Durch Drehen der beiden Potentiometer wird

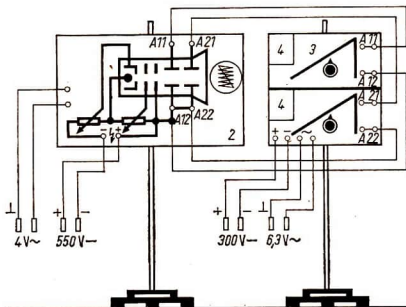


Abb. 3.4.3./1 Versuchsaufbau zur Demonstration der Rasterentstehung

der Leuchtpunkt scharf, aber nicht zu hell eingestellt, da sonst die Gefahr des Einbrennens besteht. Dann werden die Klemmen (A 2) des Doppelkippperätes mit den Zeitplatten (A 2) der Oszillografenröhre verbunden, Steckbrett I eingesetzt und dem zweiten Stromversorgungsgerät die Anodenspannung von 300 V entnommen. Mit Hilfe des Potentiometers am unteren Kippperät wird die niedrigste Ablenkfrequenz eingestellt. Der Elektronenstrahl muß langsam von links nach rechts über den Bildschirm wandern und schnell zurückspringen. Nun kann auch die Helligkeit des Elektronenstrahls den Lichtverhältnissen entsprechend vergrößert werden.

Nach dem Austausch des Steckbrettes I gegen II und Erhöhen der Kippfrequenz durch das Potentiometer erscheint auf dem Bildschirm bereits ein waagerechter Strich (Zeile). Während die Horizontal-Ablenkung beibehalten wird, werden die Meßplatten (A 1) an das obere Kippperät (A 1) angeschlossen und Steckbrett I eingesetzt. Die Zeile wandert langsam von oben nach unten über den Bildschirm und springt schnell nach oben zurück.

Schließlich erhält das obere Kippperät Steckbrett III, das untere Steckbrett IV. Das obere Kippperät dient der senkrechten (Bild-)Ablenkung, das untere Kippperät der waagerechten (Zeilen-)Ablenkung. Auf dem Bildschirm bilden waagerechte Zeilen ein Raster, dessen Struktur (Zeilenzahl) mit Hilfe der beiden Potentiometer vergrößert oder verfeinert werden kann.

Versuch 2: Übertragen der Helligkeit von der Abtasteinrichtung zur Wiedergabeeinrichtung

Die Versuchsanordnung erfolgt nach Abbildung 3.4.3./2. Die Abbildung 3.4.3./3 zeigt den dazugehörigen Grundriß. Er gilt auch für die Abbildung 3.4.3./4 und 5. Zuerst werden wieder die Heizspannungen eingeschaltet, dann die Anodenspannungen von 550 V bzw. 300 V. Beide Elektronenstrahlen werden unscharf, der der Abtaströhre hell, der der Wiedergaberöhre dunkel (unsichtbar) eingestellt. Bewegt man nun lichtundurchlässiges Papier zwischen Bildschirm der Abtaströhre und Fozelle, so leuchtet der Lichtpunkt auf dem Schirm der Wiedergaberöhre jedesmal dann auf, wenn der Lichteinfall in die Fozelle unterbrochen wird. Die Bewegung muß rasch erfolgen, da die Zeitkonstanten des Bildverstärkers

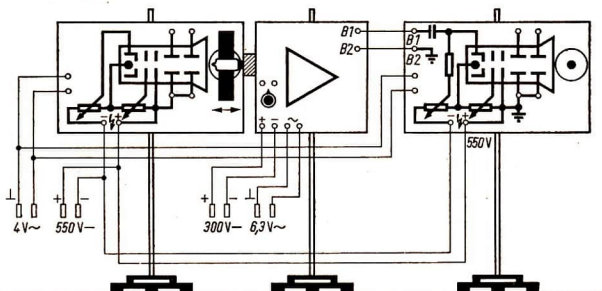


Abb. 3.4.3./2 Versuchsaufbau zur Helligkeitsübertragung

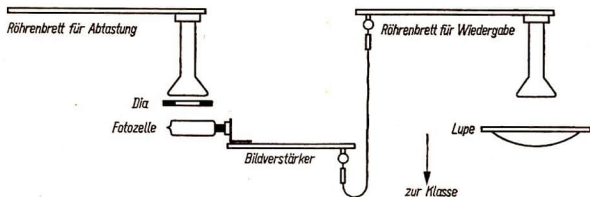


Abb. 3.4.3./3 Grundriß der Röhrenbrettanordnung zu den Abbildungen 3.4.3./2, 4 und 5

klein sind. Durch Teilabdunklung des Raumes ist zu vermeiden, daß Fremdlicht in die Fotozelle fällt. Das gilt auch für die Versuche 3 und 4.

Versuch 3: Oszillogramm der Bildspannung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.4.3./4 wiedergegeben. An die Zeitplatten (A 2) der Oszillografenröhren wird die Kippspannung des unteren Kippgerätes (A 2) angeschlossen. Der Bildverstärker und das Kippgerät erhalten von selben Stromversorgungspannung von 350 V, die Betriebsspannung der Oszillografenröhre wird auf 700 V erhöht. Beide Elektronenstrahlen werden scharf und hell eingestellt. Der Ausgang des Bildverstärkers (verstärkte Bildspannung) wird an die Meßplatten (B 2 an A 12, B 1 an A 11) der Wiedergaberöhre gelegt, die in diesem Versuch als Oszillograf arbeitet. Zwischen Fotozelle und Bildschirm der Abströhre ordnet man ein Diapositiv an, das aus etwa 5 mm breiten hellen und dunklen (durchsichtigen und undurchsichtigen) Streifen besteht. Das Diapositiv soll möglichst am Bildschirm anliegen. Die Fotozelle befindet sich in einem Abstand von etwa 500 mm vor dem Bildschirm. Der günstigste Wert ist experimentell zu ermitteln.

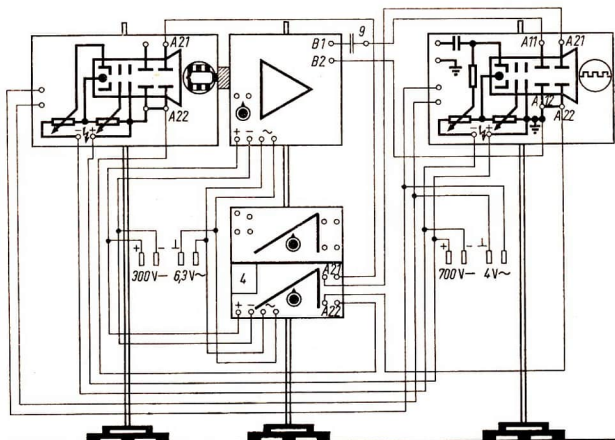


Abb. 3.4.3./4 Versuchsaufbau zur Demonstration der Bildspannung

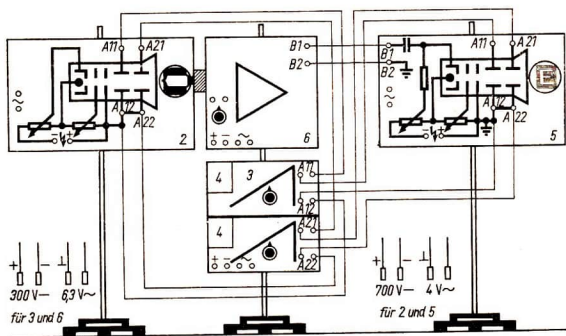


Abb. 3.4.3./5 Versuchsaufbau zur Wirkungsweise des elektrischen Fernsehens

Dieser Versuch dient dem Erkennen zweier Zusammenhänge:

1. Beim Übergang des abtastenden Elektronenstrahls von einer hellen auf eine dunkle Bildstelle oder umgekehrt steigt oder fällt die Bildspannung.

2. Eine Schwingung der Bildspannung kann zwei Bildpunkte unterschiedlicher Helligkeit übertragen (Ermittlung der Fernsehfrequenz).

Versuch 4: Prinzip des elektronischen Fernsehens

Die Versuchsanordnung geht aus Abbildung 3.4.3./5 hervor. Sie unterscheidet sich von der des Versuches 3 nur dadurch, daß die Bildspannung an den Wehneltzylinder (Steuergerät) der Wiedergaberöhre und eine Bildkippspannung (A 1) des oberen Kippgerätes an die Meßplatten (A 1) beider Röhren gelegt wird. Die Stromversorgung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet. Sie entspricht der Abbildung 3.4.3./4.

Als Vorlagen für die zu übertragenden Diapositive eignen sich einzelne Buchstaben oder Ziffern (hell auf dunkel, dunkel auf hell) am besten. Es lassen sich auch kontrastreiche Halbtonvorlagen übertragen. Zur optischen Vergrößerung des Empfängerbildes kann vor dem Bildschirm der Wiedergaberöhre eine Lupe entsprechender Größe angeordnet werden. Abbildung 3.4.3./6 zeigt die Fotografie eines Empfängerbildes.

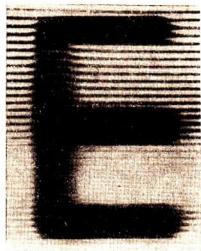


Abb. 3.4.3./6 Empfängerbild

Bemerkung

Besonderer Wert bei der Durchführung dieses Versuches ist auf das Erarbeiten der Begriffe „Abtasteinrichtung“ (Aufnahmekamera,) „Steuergerät“ und „Wiedergabeeinrichtung“ (Sichtgerät, Empfänger) zu legen.



3.4.4. Varianten zur elektronischen Bildabtastung und -wiedergabe

Methodische Hinweise

1. Die Versuche sind für Arbeitsgemeinschaften bestimmt.
2. Es werden eine vereinfachte Variante zur Bildübertragung und eine Variante mit Hilfe von zwei Oszillografen beschrieben. Die letzte ist besonders einfach durchzuführen.

Variante a: Betrieb mit einem Stromversorgungsgerät

Steht nur ein Stromversorgungsgerät für Mittelspannung zur Verfügung, macht sich eine Änderung der Stromversorgung der einzelnen Teilschaltungen notwendig.

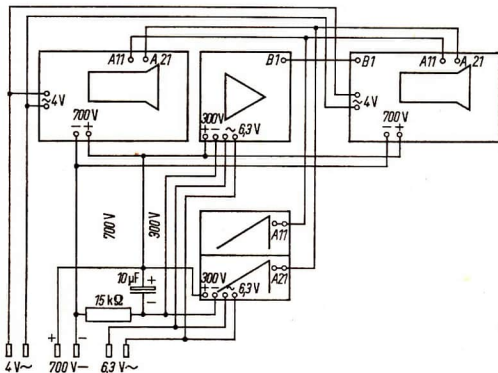


Abb. 3.4.4./1 Betrieb mit einem Stromversorgungsgerät

In der Abbildung 3.4.4./1 ist der Aufbau nach Abbildung 3.4.3./5 mit vollständiger, aber vereinfachter Verdrahtung dargestellt.

Da die Pluspole aller Teilschaltungen auf Nullpotential liegen, können alle Signalleitungen, wie Kipp- und Bildspannungsleitungen, einpolig ausgeführt werden.

Die Minuspole der beiden Röhrenbretter für Abtastung und Wiedergabe sind direkt mit dem negativen Potential des Stromversorgungsgerätes verbunden.

Zum Herabsetzen der Anodenspannung für die Teilschaltungen des Steuergerätes ist in der Minusleitung ein Vorwiderstand von $15\text{ k}\Omega/12\text{ W}$ erforderlich. Im Notfall können zwei Drahtwiderstände von $30\text{ k}\Omega/6\text{ W}$ parallelgeschaltet werden.

Damit zwischen den Teilschaltungen keine störenden Kopplungen auftreten, muß die herabgesetzte Spannung gegen den Pluspol abgeblockt werden. Diesen Zweck erfüllt ein Kondensator von $10\text{ }\mu\text{F}/450\text{ V}$.

Variante b: Verwendung eines Oszillografen

Ein Katodenstrahloszillograf mit abgreifbarer Kippspannung kann als Abtasteinrichtung eingesetzt werden. Als Zusatzgeräte sind nur noch das Röhrenbrett für Wiedergabe, der Bildverstärker und ein Kippgerät erforderlich.

Der prinzipielle Aufbau des Fernsehmodells bei Verwendung eines Oszillografen ist in der Abbildung 3.4.4./2 dargestellt.

Während des Verdrahtens ist darauf zu achten, daß die mit „Masse“ gekennzeichneten Buchsen des Y-Einganges (Meßverstärker oder Meßplatten direkt) und des Kippspannungs-Ausgangs mit solchen Buchsen des Röhrenbrettes für Wiedergabe bzw. des Kippgerätes verbunden werden, die als zweite Ziffer „2“ haben (A12, A22). Die Stromversorgung der Selbstbau-Geräte erfolgt in der angegebenen Weise mit einem Stromversorgungsgerät oder mit zweien.

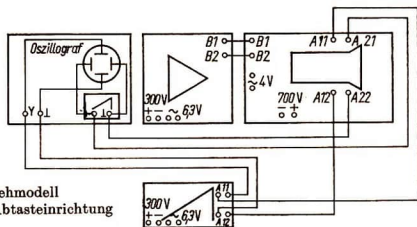


Abb. 3.4.4./2 Fernsehmodell
mit Oszillograf als Abtasteinrichtung

Variante c: Verwendung zweier Oszillografen

Wenn zum Aufbau des Fernsehmodells zwei Katodenstrahloszillografen verwendet werden können, ist nur noch der Bildverstärker selbst zu bauen. Der erste Oszillograf wird wie in beigesetzt; der zweite muß neben dem Kippspannungsausgang einen Eingang zur Helligkeitsmodulation des Elektronenstrahls haben. Da beide Oszillografen je ein Kipprgerät haben, kann eins davon als Bildablenkgerät, das andere als Zeilenablenkgerät dienen. Die Kippspannungsausgänge sind jeweils mit den Y-Eingängen des anderen Oszillografen zu verbinden.

Die Fernsehrastrer auf beiden Röhrenschirmen sind um 90° gegeneinander verdreht. Will man das vermeiden, ist der Abtastoszillograf um 90° um die Röhrenachse zu kippen. Der prinzipielle Aufbau des Fernsehmodells mit zwei Oszillografen geht aus Abbildung 3.4.4./3 hervor.

Der Bildverstärker erhält seine Betriebsspannung von einem Stromversorgungsgerät für Mittelspannung.

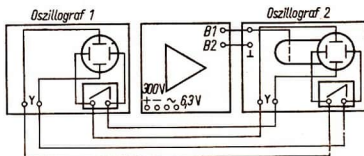


Abb. 3.4.4./3
Fernsehmodell mit zwei Oszillografen

Variante d: Verwendung eines Breitbandverstärkers

Steht neben den zwei Oszillografen noch ein industrieller Breitbandverstärker zur Verfügung, kann dieser an Stelle des selbstgebauten Bildverstärkers eingesetzt werden. Hat der Verstärker keinen besonderen Fotozellenanschluß, muß die Fotozelle ihre Betriebsspannung von einem Stromversorgungsgerät erhalten. Um die Zellenspannung auf einen günstigen Wert einzustellen, ist ein Spannungsteiler von etwa $15 \text{ k}\Omega/1,5 \text{ W}$ erforderlich. Die Spannung der Fotozelle soll so groß sein, daß eine ausreichende Empfindlichkeit gesichert ist. Keinesfalls darf die Spannung den Wert der Zündspannung, die für die genannte Zelle bei 150 V liegt, erreichen. Zur ständigen Kontrolle der Spannung wird parallel zur Fotozelle ein Spannungsmesser angeschlossen. Im Normalfall wird eine Fotozellenspannung von 80 V aus-

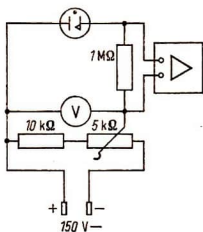


Abb. 3.4.4./4
Anschluß der Fotозelle an einen Breitbandverstärker

reichend sein. In der Abbildung 3.4.4./4 ist der Anschluß der Fotозelle dargestellt. Der Schichtwiderstand von $1\text{ M}\Omega/0,1\text{ V}$ dient als Arbeitswiderstand, an dem die zu verstärkende Bildspannung abfällt.

Bemerkungen

1. Analog den beschriebenen Aufbauabwandlungen des elektronischen Fernsehmodells sind auch die in V 3.4.3. dargestellten Grundlagenversuche bei Verwendung von Oszillografen bzw. anderen Verstärkern durchführbar.
2. Als Fotозelle können auch andere gasgefüllte Typen verwendet werden. Die Wahl des Katodenmaterials ist von der Frequenz des Lichtes abhängig. Da die Mehrzahl aller Oszillografenschirme einen hohen Grünanteil aufweist, sind Fotозellen mit Antimon-Cäsium-Katoden besonders gut geeignet. Von Zellen mit orangerotem Lacküberzug kann dieser vorsichtig entfernt werden.
3. Notfalls kann der Schulverstärker oder ein Verstärker aus Teilen eines HF-Aufbausatzes nach der Schaltung in Abbildung 3.4.2./7 als Bildverstärker eingesetzt werden. Die Zuleitung der Fotозelle muß abgeschirmt sein.

Quellennachweis der Abbildungen

Wolfgang Brunstein, Greifswald: 1.2.10./1 bis 3., 3.0.0./2 bis 5, 3.0.5./2, 3.0.5./6, 3.0.5./8 bis 10, 3.1.12./1, 3.1.17./1 und 2, 3.1.21./2; Dr. Lothar König, Dresden: 3.4.1./4, 3.4.3./6; Horst Lang, Ziegenrück: 3.0.0./1; Haraed Pilz, Karl-Marx-Stadt: 1.2.1./1 und 2, 1.2.2./1, 1.2.3./1 bis 3, 1.2.4./1 bis 4, 1.2.5./1 und 2, 1.2.6./1bis 4, 1.2.7./1 bis 3, 1.2.9./1; Dr. Bernhard Raabe, Geithain: 3.0.2./1, 3.2.13./3, 3.2.14./3, 3.2.15./2; Dr. Helmut Roth, Karl-Marx-Stadt: 1.2.0./1, 2.1.1./3, 2.1.2./1, 2.1.3./2, 2.1.4./3, 2.1.5./2, 2.1.5./4 und 5, 2.1.7./2, 2.1.8./2, 2.2.2./3, 2.2.3./2, 2.2.4./2, 2.2.13./2, 2.2.15./2, 2.2.16./2

Register

Abtastung 244
Analysator 25f., 138, 146 ff.
Anodenspannungsmodulation 225
Auflichtmikroskop 99f.
Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles
60f., 78f.

Basismodulation 230

Beugung 46f.

— des Lichtes am Schirmrand 135
— an äquidistanten Spalten 112 ff.
— an einem Doppelspalt 110f.
— an einem Reflexionsgitter 126 ff.
— an einem schmalen Hindernis 109f.
— an einem schmalen Spalt 133f.
— an einem Strichgitter 115 ff., 119 ff.
— an einer kreisförmigen Öffnung 134f.
—, Fraunhofersche 112f.
—, Young-Fresnelsche 111
Beugungsfransen 88, 91
Beugungsspektrum 120 ff.
Bildverstärker 249
Biprisma 104
Blattfeder, schwingende 53
Brechung 44f., 218
Brewstersches Gesetz 141

Chladnische Klangfiguren 75f.

Differenzdiskriminator 233

Direktor 208

Doppelbrechung 144

—, elektrische 146

Doppelspalt 88, 110f.

Doppelspiegel nach Fresnel 92

Dopplereffekt 48f., 84f.

Drehung der Polarisationsenebene 148f.

—, magnetische 150

—, spezifische 148

Drehwellen 16 ff.

Dreipunktschaltung 179 ff.

Elektrooptischer Effekt 137

Elementarwellen 39f.

Fadentelefon 62

Faraday-Effekt 89, 150

Farben dünner Blättchen 103

Fernsehraster 251f.

Flageolet-Ton 70

Flamme, sensitive 59

Fraunhofersche Linien 124, 130

Frequenzmessung 186 ff.

Fresnel'scher Spiegelversuch 92

Fresnelsche Zone 135

Funkentstörungsordnung 159f.

Galtonpfeife 82

Geräusch 58

Gitter, optisches 89f., 115 ff.

Gitterkonstante 89, 115 ff.

Gitterspannungsmodulation 226

Gitterspektralapparat 126

Glasplatteninterferometer 106f.

Glühdrahtöhre 80f., 83

Grenzfrequenzen des Lichtes 120 ff.

Gummibuchsenplatte 168

Heliostat 129

Interferenz des Lichtes 89f.

— durch Beugung 109 ff.

— durch Brechung 89f.

— durch Reflexion 89f.

— im konvergenten, polarisierten Licht 147

Interferenzbilder 38, 47f.

Interferenzröhre 82f.

Interferenzspektroskop nach Fabry-Perot 107

Interferenzstreifen 92 ff.

Interferenzversuch nach Lloyd 89f.

— nach Pohl 94f.

Interferenz von Schallwellen 81

Interferometermodelle 106f.

Interferometer nach Jamin 108

- Kalkspat** 142f., 147
Katodenstrahloszillograf 57
Keilplatte 96f.
Kerr-Effekt 146
Kippschwingungen 169, 188
Klang 58
Knall 58
Knotenlinie 76f.
kohärente Lichtquellen 87
Kollektormodulation 230
Kreuzgitter 131f.
Kristallpräparate, doppelbrechende 144f.
Kundtsche Röhre 78f.
- Lecherleitung** 201ff.
Lichtquellen, kohärente 87
Lichtwellen 87ff.
Lippenpfeife 57, 70f.
Lissajoussche Figuren 64
Lochsirene 54
Longitudinalwellen 11, 20, 28, 60, 78f.
Luftstoßtrommel 60
Luftstöße, periodische 54
- Magnetooptischer Effekt** 137
Modulationsgrad 227
Monochord 68f.
Multivibrator 190ff.
—, **astabiler** 190
—, **bistabiler** 194
—, **monostabiler** 193
- Newtonsche Ringe** 99ff.
- Oberschwingung** 69
Obertöne 69
- Pfeife, gedackt** 70
—, **offen** 70
Pohlscher Interferenzversuch 94f.
Polarisation 24ff., 137ff.
—, **chromatische** 144f.
— **des Lichtes** 137ff.
— **durch Doppelbrechung** 142
— **durch Reflexion und Brechung** 140f.
Polarisationsfilter 137ff.
Polarisationskegel 139
Polarisationswinkel 141
Polarisator 25ff.
Prüfverfahren, fotoelastisches 154f.
Punktgitter 131f.
- Quarzplatte** 148f.
Queteletsche Ringe 105
- Rechteckschwingungen** 189
RC-Phasenschieberkette 192
- Reflektor** 209
Reflexion 41, 66, 89f., 208, 216
Reflexionsgitter 126ff.
Resonanz 71
Resonanzschwingkreis 183f.
Richtungshören 85f.
Rückkopplung 175ff., 239
- Saitenschwingungen** 57, 68f.
Schallausbreitung 60ff.
Schallwellen 52ff.
Schirmwirkung 201
Schmitt-Trigger 195
Schulspektralapparat 114, 123f.
Schulverstärker 188
Schwebungen 77f., 223ff.
Schwingungen eines Stahlstabes 63, 74f.
—, **longitudinale** 74f.
Schwingungsbauch 70, 76ff.
Schwingungsform 57f.
Schwingungsknoten 69, 77f.
Seifenlamelle 101ff.
sensitive Flamme 59
Spalt, verstellbar 89
Spalte, äquidistante 112f.
—, **keilförmige** 118
Spannungsdoppelbrechung 152
Spektrallinien 124ff.
Staubfiguren, Kundtsche 78f.
stehende Wellen 69, 79ff.
Strahl, außerordentlicher 143
—, **ordentlicher** 143
Streifenfilter 98
Streuung des Lichtes 105, 137
Strichgitter 89, 115ff.
stroboskopische Scheibe 56f.
- Tauchkörper** 35ff.
Thomsonsche Schwingungsgleichung 173
Torsionswellen 22f.
Transistoren 159
Transmissionsgitter 122ff.
Transversalwellen 11, 19, 28
- UHF-Generator** 196ff.
- Vertikaldemonstrationstafel** 157
- Wasserwellengerät** 30ff.
Wellenerreger 31ff.
Wellenlänge 79f., 88, 91ff., 110ff., 124f.
— **des Lichtes** 88, 98ff., 110ff., 124ff.
— **von elektromagnetischen Wellen** 205, 212
Wellenwanne 32ff.
- Zahnrad sirene** 54f.