

**Physikalisches Praktikum für Anfänger**  
**Teil B**

Teilnehmer:

---

© 1998 Fachbereich Physik Universität Kaiserslautern  
Ausgabe: Herbst 2000

Herausgeber: Dr. Kurt Jung

Grafiken: Ingeborg Wollscheid  
Gestaltung und Satz: Matthias Jung

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>E 1c Elektrolytischer Trog</b>	<b>4</b>
<b>E 2a Kompensationsschaltungen</b>	<b>10</b>
<b>E 3a Elektrische Schwingkreise</b>	<b>16</b>
<b>E 3b Transformator</b>	<b>21</b>
<b>E 3c Wechselstromkreise</b>	<b>35</b>
<b>E 5a Elektromaschinen</b>	<b>41</b>
<b>O 1a Linsensysteme</b>	<b>45</b>
<b>O 1b Prisma</b>	<b>52</b>
<b>O 1d Rotationsdispersion</b>	<b>55</b>
<b>O 2d Beugung am Spalt</b>	<b>61</b>
<b>O 2c Interferometrie</b>	<b>70</b>
<b>M 1c Ultraschall</b>	<b>78</b>

---

# E 1c Elektrolytischer Trog

---

## Aufgabenbeschreibung

Auf Leitfähigkeitspapier sind verschiedene Elektrodenformen (Plattenkondensator, Zylinderkondensator, usw.) mit Hilfe von Leitsilber aufgebracht. Durch Anlegen niedriger Spannungen sollen statische elektrische Felder erzeugt und ausgemessen werden. Die Potentialverteilung  $U(x, y)$  wird mit einem xy-Schreiber abgetastet. Anstelle eines Zeichenstifts ist eine Messspitze eingebaut, deren Potential über einen A/D-Wandler von einem Personalcomputer erfasst wird. Die x- und y-Koordinaten werden über zwei D/A-Wandler vom Rechner gesteuert.

## Literatur

1. Alonso-Finn: Kap. 16.1–16.9
2. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. I
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 6.1, 6.2
4. Grimsehl: Lehrbuch der Physik II, Kap. 1, § 1–13
5. Feynmann: Vorlesungen über Physik, Bd. II, Kap. 4
6. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 1.2, 1.3, 1.7

## Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter einem Feld? Wann nennen wir ein Feld homogen?
2. Wie definiert man die elektrische Feldstärke? Was verdeutlichen die Kraftlinien des elektrostatischen Feldes?
3. Was ist die Spannung und was das Potential eines elektrostatischen Feldes?

4. Wie sehen die Kraftlinien des elektrostatischen Feldes an einer Leiteroberfläche und wie im Inneren eines Leiters aus?
5. Wie hängt die Spannung im elektrostatischen Feld vom Weg ab?
6. Warum können im statischen Feld keine geschlossenen Feldlinien auftreten?
7. Können sich Äquipotentialflächen oder Feldlinien schneiden?
8. Warum verändert sich das Feld in einem Plattenkondensator, wenn wir ein Dielektrikum zwischen seine Platten bringen?
9. Was ist die elektrische Verschiebung, elektrische Polarisierung?
10. Was sind Orientierungspolarisation, Verschiebungspolarisation?
11. Was ist Elektrostriktion?
12. Was ist die Nahwirkungs- und was die Fernwirkungstheorie?
13. Machen Sie sich das Prinzip einer elektrostatischen Linse klar.
14. Wie sieht ein Dipolfeld aus?
15. Was heißt elektrischer Fluss und wie lautet der Satz von Gauß?
16. Wie definiert man die Dielektrizitätskonstante eines nichtleitenden Stoffes?
17. Wie verhalten sich die Normal- und Tangentialkomponente der elektrischen Verschiebung und der Feldstärke bei Trennungsflächen zwischen zwei Medien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten?

## Versuchsdurchführung

1. Homogener Plattenkondensator  
Zwei ebene Elektroden der Länge 10 cm stehen einander parallel im Abstand von ca. 10 cm gegenüber. Es sind Äquipotentiallinien für diese Anordnung auszumessen.
2. Inhomogener Plattenkondensator  
Zwei ebene Elektroden der Länge 30 cm stehen einander parallel im Abstand von ca. 18 cm gegenüber. In der Mitte zwischen ihnen ist parallel zu den Elektroden auf einer Fläche von 4 cm

Breite und 30 cm Länge die Leitfähigkeit durch das Übereinanderlegen zweier Lagen des Leitfähigkeitspapiers doppelt so hoch wie außerhalb. Bestimmen Sie längs der Symmetrieachse der Anordnung das Potential als Funktion des Ortes und berechnen Sie die Feldstärke in den drei Bereichen unter der Annahme, dass die Feldstärke jeweils konstant ist. Ermitteln Sie das Verhältnis der Leitfähigkeiten, das bei einem Kondensator dem Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten entsprechen würde.

3. Zwei ebene Elektroden der Länge 30 cm stehen einander parallel im Abstand von 18 cm gegenüber. Zwischen den beiden Elektroden ist eine Kreisfläche aus nichtleitendem Material symmetrisch zu den Elektroden angeordnet. Bestimmen Sie die Äquipotentiallinien dieser Anordnung und zeichnen Sie die Feldlinien ein.
4. Wie Aufgabe 3, aber anstelle des nichtleitenden Materials ist die Kreisfläche metallisiert.
5. Bestimmen Sie den Potentialverlauf  $U(\varrho)$  für zwei konzentrische Ringe. Verifizieren Sie den für diese Anordnung erwarteten Potentialverlauf  $U(\varrho) = U_0 \frac{\ln(\varrho/r)}{\ln(R/r)}$ .
6. Zeigen Sie, dass vor einer Spitze die Feldstärke stark ansteigt (Spitzenentladung, Feldemission). Verwenden Sie dazu die Schablone mit der entsprechenden Elektrodenkonfiguration. Ermitteln Sie längs der Mittellinie das Potential als Funktion des Abstandes von der Spitze und bestimmen Sie durch graphische Differentiation den Feldstärkeverlauf.

Bei symmetrischen Elektrodenanordnungen genügt die Ausmessung eines Teils des Feldes.

## Hinweise zur Rechnersteuerung

Das Programm FLAP (**F**eldlinien im **A**nfänger**p**raktikum) wurde im Rahmen des CIP-PPP-Vorhabens entwickelt. Die Programmiersprache ist TURBO PASCAL 5.0, die Textmasken werden von MASK.TPU, die Menüauswahl von GEMINI.TPU unterstützt.

Nach Einlegen der Programmdiskette und Start des Rechners (Schalter an der Rückseite des Bildschirms) erscheint das Hauptmenü mit den Wahlmöglichkeiten:

1. HILFE
2. DATEI
3. BEARBEITUNG
4. MESSUNG
5. 3D-BILD

**Hilfe** bietet Informationen über den Versuchsaufbau und das Programm.

**Datei** umfasst die Optionen:

**Speichern:** Die aktuellen Daten (automatische Messung,  $13 \times 13$  Datenpunkte) werden nach Drücken von N(EW) in eine neue Datei geschrieben, deren Namen in der Form \*.DTA eingetippt werden muss.

**Laden:** Die bereits gespeicherten Dateien (automatische Messung) können in einer Auswahlbox ausgewählt und geladen werden.

**Druck A:** Bis zu vier Dateien können ausgewählt und (verkleinert) auf eine DIN A4-Seite ausgedruckt werden.

**Druck B:** Dies ist der Hardcopy-Befehl für den Bildschirm (und die einzige Möglichkeit, manuelle Messungen und X-, Y-Schnitte auszugeben).

Mit ESC können die jeweiligen Programmpunkte abgebrochen werden.

**Bearbeitung** der aktuellen Daten mit den Unterprogrammpunkten:

**X/Y-Schnitt:** Durch die dreidimensionale Darstellung  $U(x, y)$  kann ein Schnitt parallel zur X- bzw. Y-Achse gelegt werden. Eine Ausgabe ist nur mit DRUCK B möglich.

**Drehen:** Zur besseren Übersicht kann die aktuelle, dreidimensionale Darstellung einer automatischen Messung jeweils um  $90^\circ$  um die Z-Achse gedreht werden. Eine Ausgabe ist nur mit DRUCK B möglich.

**Messung** umfasst die auch in dieser Reihenfolge abzuarbeitenden Menüpunkte:

**Eichung:** Der Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) liefert für Spannungen von 0 bis 5 Volt Werte zwischen 0 und 16 383 (was einer Auflösung von 14 Bit entspricht). Zu Versuchsbeginn muss der A/D-Wandler kalibriert („geeicht“) werden. Dazu wird an zehn verschiedenen Punkten der Elektroden/Leitfähigkeitspapier-Anordnung der A/D-Wert abgerufen (Messspitze von Hand an die gewünschte Stelle bewegen und  $3 \times$  RETURN drücken) und der mit dem Digital-Voltmeter gemessene Spannungswert eingegeben (Abschluss mit RETURN). Die Messpunkte sollten möglichst die minimalen und maximalen Spannungswerte enthalten. Die intern ermittelte EICKURVE kann zur Kontrolle dargestellt werden.

**Justage:** Dieser Menüpunkt muss vor Durchführung einer automatischen Messung abgehandelt werden. Für den XY-Schreiber wird mit Hilfe seiner Nullpunkts- und Bereichsschalter der gewünschte Fahrbereich festgelegt. Dabei werden die durch den DA-Wandler erzeugten Auslenkungen in einem Balkendiagramm dargestellt. Außerdem sollen per Hand die Orte minimalen und maximalen Potentials angefahren und diese Werte abgespeichert werden.



**Automatische Messung:** Ist das System kalibriert und justiert, so kann eine automatische Messung gestartet werden. Dabei rastert der XY-Schreiber das eingestellte Feld in 13 x 13 Punkten ab und stellt die Messwerte sofort als dreidimensionales Potentialgebirge dar. Nach der Aufnahme kann das Bild abgespeichert, ausgedruckt und bearbeitet werden.

**Manuelle Messung:** Mit diesem Menüpunkt können Äquipotentiallinien von Hand abgefahren und auf dem Bildschirm dargestellt werden. Ein Kreuz kann mit den Cursortasten auf dem Bildschirm bewegt werden, gleichzeitig bewegt sich die Messspitze auf der Elektroden/Leitfähigkeitspapier-Anordnung. Die Schrittweite wird durch die Tabulatortaste geregelt.

Mit ENTER kann ein Punkt gesetzt und der zugehörige Meßwert eingetragen werden. Mit INS wird eine Linie zwischen der neuen und der alten, zuvor mit ENTER oder INS definierten Position, eingezeichnet. DEL löscht den letzten Punkt bzw. Strich.

Eine Äquipotentiallinie wird schrittweise abgefahren, indem man das aktuelle Potential kontrolliert, das in der Kopfzeile des Monitors angezeigt wird.

**3D-Bild** erlaubt z. B. nach dem Bearbeiten einer Messung die 3-dimensionale Darstellung wiederherzustellen.

---

# E 2a Kompensationsschaltungen

---

## Aufgabenstellung

Der Versuch soll mit dem grundsätzlichen Problemen einer Strom-, Spannungs- und Widerstandsbestimmung und der Handhabung von Messgeräten (Universalmeßgerät, elektronisches Digitalmeßgerät) vertraut machen. Beim Aufbau von Schaltungen (Wheatstonesche Brücke, Spannungskompensator) soll das Verdrahten von elektrischen Bau- und Messelementen erlernt werden. Die theoretischen Grundlagen bilden das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Regeln.

## Literatur

1. Kohlrausch: Prakt. Physik II, Kap. 6.1 (.2.6)
2. Feynman: Vorlesungen über Physik, Bd. II, Kap. 22–3
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 6.3
4. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. 3, Nr. 27
5. Tietze-Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Kap. 18.11
6. Schilling: Techn. Elektrizitätslehre, Kap. 2.1
7. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 2.4

## Fragen zum Versuch

1. Erklären Sie das Funktionsprinzip eines Drehspulgalvanometers!
2. Durch welche Schaltungen wird ein Drehspulgalvanometer zum Universalmeßgerät für Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessung?
3. Wie funktioniert ein Röhren- bzw. Digitalvoltmeter?

4. Geben Sie die zwei möglichen Schaltungsversionen zu Aufgabe 1 an und erklären Sie ihre Anwendbarkeit!
5. Wie lauten das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Regeln?
6. Leiten Sie die Abgleichbedingungen für die Wheatstonesche Brücke her!
7. Erklären Sie qualitativ die Ursache für den Ohmschen Widerstand eines Leiters!
8. Diskutieren Sie den Begriff EMK (elektromotorische Kraft)!
9. Was ist die Klemmenspannung?
10. Was ist eine ideale Strom- bzw. Spannungsquelle?
11. Was ist eine Kompensationsschaltung und welchen Vorteil hat sie für eine Spannungsmessung und gerade für die EMK-Bestimmung bestimmter Spannungsquellen? (Welcher?)
12. Was steckt hinter der Messvorschrift zur Bestimmung des Innenwiderstandes der Batterie?
13. Nennen Sie andere Messmethoden zur Bestimmung des Innenwiderstandes einer Spannungsquelle!
14. Bei welchem Lastwiderstand ist die abgegebene Leistung der Batterie maximal? Wie groß ist dann der Leistungsabfall in der Batterie?
15. Wie kann man den Spannungskompensator mit dem Multimeter eichen, wenn keine Eichbatterie zur Verfügung steht? (Voraussetzung:  $R_I(\text{Hilfsspannungsquelle } U) \ll R_I(\text{Multimeter})$ )

## Versuchsdurchführung

Bei der Wheatstoneschen Brücke wird der unbekannte Widerstand  $R_X$  mit einem bekannten Widerstand (z. B. geeichter Dekadenwiderstand) verglichen. Der Abgleich erfolgt durch das Potentiometer, das aus den Widerständen  $R_2$  und  $R_3$  gebildet wird. Fließt durch das  $\mu\text{A}$ -Meter kein Strom, so gilt

$$R_X = R_1 \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

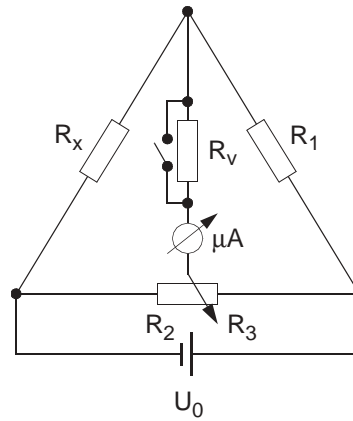


Abb. 1: Die Wheatstonesche Brückenschaltung

Da vom Abgleichwiderstand nur das Verhältnis  $R_2/R_3$  eingeht, müssen die Absolutwerte  $R_2$ ,  $R_3$  nicht bekannt sein. Vielfach wird der Abgleichwiderstand durch einen linear aufgespannten Widerstandsdraht ersetzt, und es geht dann das Längenverhältnis ein. Bei dieser Aufgabe besteht der Abgleichwiderstand aus einem Präzisionspotentiometer mit dekadischer Anzeige. Das Widerstandsverhältnis  $R_2/R_3$  kann direkt aus der Anzeige entnommen werden. Der Widerstand  $R_V$  begrenzt den Strom durch das Meßinstrument (Schutzwiderstand).

## Aufgabe 1

Stellen Sie nacheinander zwei Widerstände  $R_{X1}$ ,  $R_{X2}$  an dem Widerstandskasten ein. Notieren Sie die dazugehörige dekadische Anzeige.

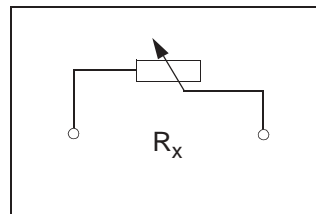


Abb. 2: Schaltung des Widerstandskastens

Bestimmen Sie die Widerstandswerte durch Messung von Spannung  $U$  und Strom  $I$ . Für jeden Widerstand sind vier verschiedene  $U/I$ -Paare aufzunehmen.

### Geräte

- 1 DC-Netzgerät
- 1 Digital-Voltmeter (Genauigkeit: 0.2%)
- 1 Drehspuluniversalmessgerät (1.5 %)

### Auswertung

Die Widerstandswerte sind sofort zu bestimmen. Der relative Messfehler wird aus der Ungenauigkeit der Messgeräte ermittelt und mit dem Fehler, der sich aus der Streuung um den Mittelwert ergibt, verglichen.

## Aufgabe 2

Bestimmen Sie die gleichen Widerstände mit Hilfe der Wheatstone-schen Brückenschaltung. Für jeden Widerstand ist die Brücke mit vier verschiedenen Vergleichswiderständen  $R_1$  (z.B.:  $R_1 = 0.5 \times R_X$ ,  $R_X$ ,  $2 \times R_X$ ,  $4 \times R_X$ ) abzugleichen.

### Auswertung

Bestimmung von  $R_{X1}$  und  $R_{X2}$ . Der relative Fehler wird mit

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{R_3 + R_2}{R_3 \cdot R_2} \cdot \Delta R + \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (\Delta R_1/R_1 = 1\%)$$

abgeschätzt und mit dem Fehler, der sich aus der Streuung um den Mittelwert ergibt, verglichen ( $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R = 10 \Omega$ ). Weiterhin sind die Resultate aus Aufgabe 1 und 2 zu diskutieren.

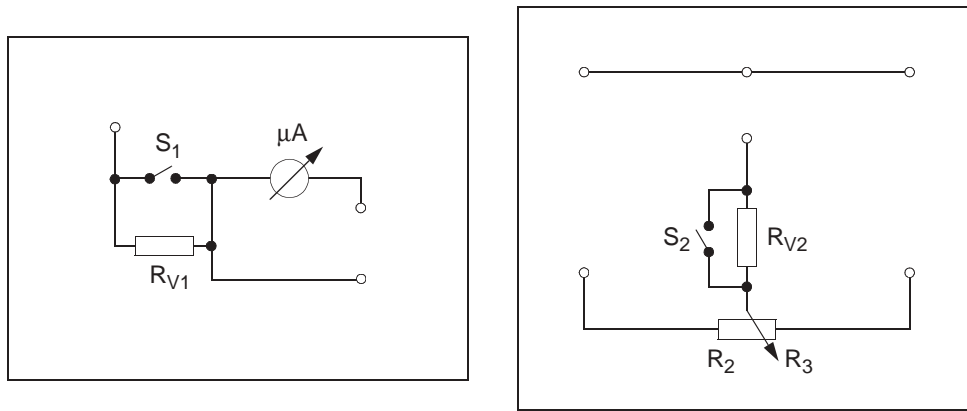


Abb. 3: Schaltkästen für die Wheatstonesche Brücke  $R_{V2} = 670 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{V1} = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2$  und  $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $S$  = Schalter (Bei Druck wird  $R_V$  überbrückt)

### Aufgabe 3: Spannungskompensator

#### Eichung der Kompensationsschaltung

Ermitteln Sie die Spannung der Eichbatterie mit dem Digitalmultimeter. Sinnvollerweise sollten Sie diesen Wert oder ein ganzzahliges Vielfaches davon auf der Potentiometerskala einstellen und dann die Hilfsspannung  $U$  am Netzgerät so einregeln, daß der Strom durch das Mikroamperemeter verschwindet.



- Das Mikroamperemeter wird noch für weitere Versuche gebraucht! Gleichen Sie zunächst über den Vorwiderstand  $R_V$  grob ab.
- Berücksichtigen Sie Anzeigefelder (Nulleinstellung) der Potentiometerskala.

#### Messen von Spannungen

- Bestimmung der EMK einer Spannungsquelle  
Für den Versuch stehen zwei Spannungsquellen mit unterschiedlichem Innenwiderstand zur Verfügung (Quellspannung

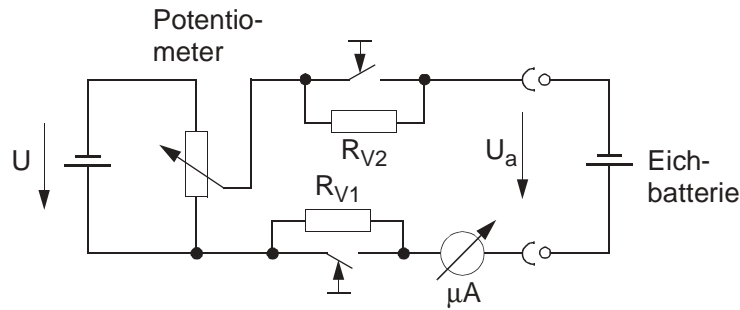
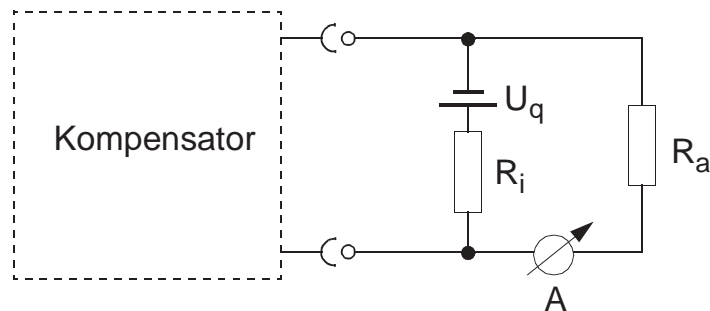


Abb. 4: Schaltbild zur Eichung eines Spannungskompensators

$U_q$ ). Bestimmen Sie für beide Spannungsquellen mit dem Spannungskompensator die EMK's. Vergleichen Sie diese Werte mit den Spannungen, die Sie durch direkte Messungen mit den vorhandenen Universalmeßgeräten erhalten.

- Bestimmung des Innenwiderstandes einer Spannungsquelle  
Belasten Sie die Spannungsquellen mit verschiedenen Widerständen  $R_a$  und tragen Sie die Klemmenspannung  $U_K$  als Funktion des belastenden Stromes  $I$  auf.

Abb. 5: Schaltung zur Messung des Innenwiderstandes  $R_i$ 

## Auswertung

Die Messwerte sind sofort in ein Diagramm  $U_K = U_K(I)$  einzutragen.

---

# E 3a Elektrische Schwingkreise

---

## Aufgabenbeschreibung

An einem LC-Schwingkreis werden freie gedämpfte und erzwungene Schwingungen untersucht.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. 6
2. Alonso-Finn II: Kap. 17.10
3. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 4.1 und 7.5.7
4. Fraunfelder-Huber: Physik II, Kap. 19.3
5. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 5.4, 6.1

## Fragen zum Versuch

### 1. Freie Schwingungen

**Begriffe:** gedämpfte und ungedämpfte Schwingung, Halbwertszeit, Dämpfungsfaktor, logarithmisches Dekrement, Schwingfall, aperiodischer Grenzfall, Kriechfall.

**Frage:** Zeitlicher Ablauf dieser drei Fälle? Vergleich, Bedeutung?

### 2. Erzwungene Schwingungen

**Begriffe:** Resonanzkurven, Phasenverschiebung, Eigenfrequenz, Kreisgüte, Verlustfaktor, Bandbreite, Resonanzüberhöhung.

**Frage:** Wie sehen die Kurven aus? Einfluss der Dämpfung?



3. Was ist ein elektrischer Schwingkreis (Parallel- und Serienkreis)?
4. Was versteht man unter Spannungsresonanz und wann tritt sie auf?
5. Was versteht man unter Stromresonanz und wann tritt sie auf?
6. Was versteht man unter einem komplexen Widerstand?
7. Stellen Sie in der komplexen Zahlenebene einen Ohmschen, kapazitiven und induktiven Widerstand dar!
8. Was geschieht für entdämpfte Schwingkreise (Rückkopplungsprinzip)?
9. Wie kann man die Güte von Schwingkreisen erhöhen?

## Versuchsdurchführung

### Aufgabe 1: Freie gedämpfte Schwingung des Parallelkreises

- a) Bestimmen Sie für den in Abb.1 dargestellten Schwingkreis das logarithmische Dekrement  $\vartheta$ , den Dämpfungsfaktor  $\delta$  und die Halbwertszeit  $\tau$  der freien gedämpften Schwingung für den Fall, daß der Dämpfungswiderstand  $R$  auf Null Ohm geschaltet ist. (Wieso ist die Schwingung trotz  $R = 0$  gedämpft?)
- b) Ermitteln Sie aus der Frequenz  $\omega$  der gedämpften Schwingung und dem Dämpfungsfaktor die Größe der Induktivität  $L$  und den Ohmschen Widerstand der Spule.
- c) Erhöhen Sie die Dämpfung und geben Sie die Widerstandswerte an, bei denen das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplituden 0,7 bzw. 0,5 beträgt.



Die periodische Erregung des Schwingkreises erfolgt mit Hilfe eines Impulsgenerators (15 Hz - 40 Hz) durch induktive Kopplung an die Kreisspule (siehe Schaltskizze). Überlegen Sie sich, weshalb man

mit einer periodischen Erregung gedämpfte Schwingungen untersuchen kann und welche Bedingungen man bei der Auswahl der Erregerfrequenz beachten muss. Der Dämpfungswiderstand  $R$  besteht aus einer Hintereinanderschaltung von vier Einstellpotentiometern.

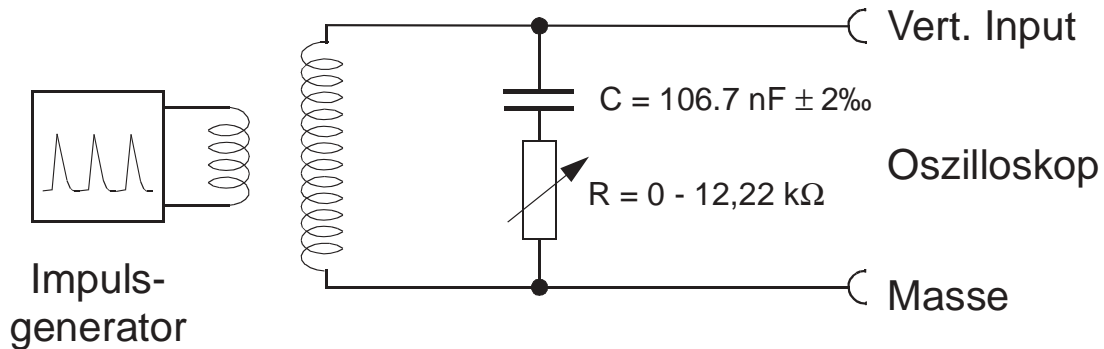


Abb. 1: Schaltungsskizze zu Aufgabe 1

## Aufgabe 2: Erzwungene Schwingungen

Untersuchen Sie die Frequenzabhängigkeit erzwungener Schwingungen der unten skizzierten Anordnung. Messen Sie dazu  $U$  in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz sowie gleichzeitig den Teilstrom  $I_C$ , der durch den Kondensator fließt, und tragen Sie diese Größen in ein Diagramm ein. Da der Erreger induktiv eingekoppelt wird, gehen die Übertragungseigenschaften dieser Spule ein. Die niedrigen Frequenzen werden schlecht übertragen!

- Führen Sie die Messung bei minimaler Dämpfung ( $R = 0$ ) und
- mit einem Dämpfungswiderstand von  $R = 300 \Omega$  durch.
- Geben Sie in beiden Fällen die Resonanzfrequenz  $\omega_{res}$  an und diskutieren Sie das Ergebnis. (Beachten Sie, daß die Frequenzen, bei denen Strom, Spannung und Energie im Schwingkreis maximal werden, unterschiedlich sind). Bestimmen Sie die Resonanzfrequenz mit Hilfe des Oszilloskops!

- d) Berechnen Sie die Resonanzfrequenz für den Fall, dass die Dämpfung tatsächlich Null wäre.

Berechnen Sie für die Fälle a) und b) die Kreisgüte und den Verlustfaktor.

### Zur Messung 2

Ersetzen Sie den Impulsgenerator von Aufgabe 1 durch den Wavetek-Funktionsgenerator (rechte Ausgangsbuchse) und koppeln Sie ein Sinussignal in den Schwingkreis ein. Wählen Sie eine Ausgangsspannung des Generators zu etwa  $4 V_{SS}$  (Index SS bedeutet: Spitze-Spitze). Schließen Sie zur Messung der Spannung  $U$  Punkt 1 (siehe Schaltung) an die Masse und Punkt 3 an den Y-Eingang des Oszilloskops (VERT. INPUT) an. Nachdem Sie den Schalter TIME BASE auf EXT geschaltet haben, verbinden Sie den Punkt 2 mit dem X-Eingang (HOR. INPUT). Da der Strom durch den Widerstand  $R$  gleich dem Strom  $I_C$  ist, ist es nun möglich, gleichzeitig  $U$  und  $I_C$  zu beobachten. Für diese Messung ist der X-Eingang des Oszilloskops zu eichen!

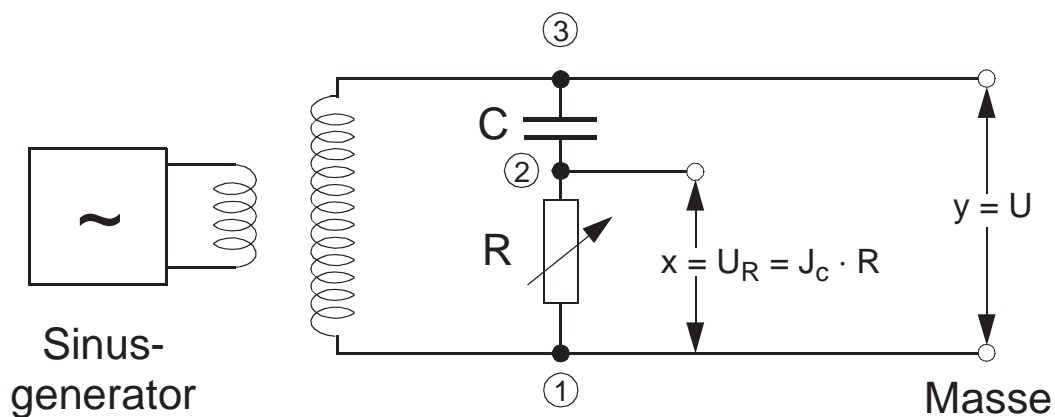


Abb. 2: Schaltungsskizze zu Aufgabe 2

### Aufgabe 3: Phasenverschiebung

Messen Sie mit Hilfe des Oszilloskops dieselbe Schaltung wie bei Aufgabe 2. Die Gesamtspannung  $U$  liegt am Y-Verstärker und die Spannung  $U_R = I_C \cdot R$  am X-Verstärker des Oszilloskops. Es erscheint auf dem Schirm eine Ellipse, deren Hauptachsenlage von der Phasendifferenz zwischen den beiden Signalen abhängt. Die Phasenverschiebung  $\varphi$  lässt sich aus  $x$  und  $X$  bzw.  $y$  und  $Y$  errechnen. Es gilt:

$$\sin \varphi = \frac{x}{X} = \frac{y}{Y}.$$

Mehrdeutigkeiten im Vorzeichen lassen sich mit Hilfe der Wechselstromgesetze klären.



Wie erhält man den angegebenen Ausdruck für  $\varphi$ ?

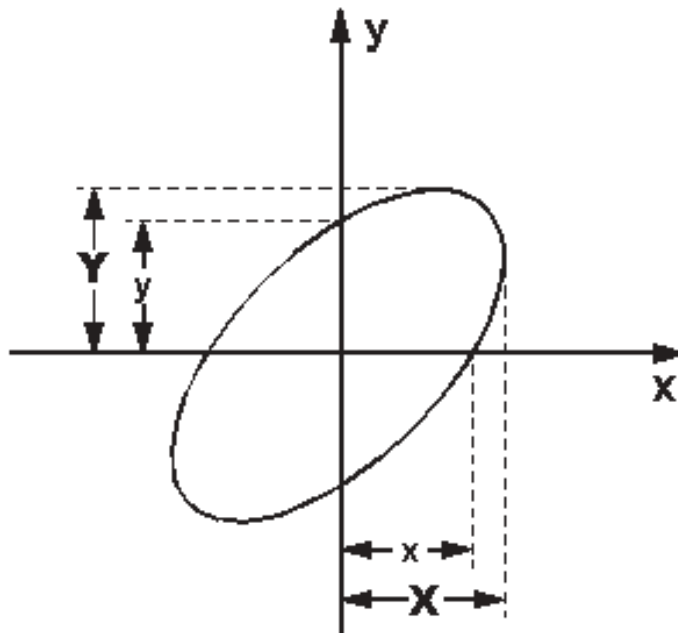


Abb. 3: Skizze der Ellipse, wie sie auf dem Schirm des Oszilloskops erscheint

---

# E 3b Transformator

---

## Aufgabenbeschreibung

Untersuchung der Funktionsweise und der Eigenschaften eines verlustbehafteten Transformators.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. 5, Nr. 47
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 7.5.8
3. Schilling: Technische Elektrizitätslehre, Kap. 2.6
4. Kupfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik
5. Spring: Grundlagen der Elektrotechnik
6. Schäfer: Transformatoren
7. Hanncke: Kleintransformatoren und Eisenkerndrosseln
8. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 5.6

Da der Transformator in Lehrbüchern der Physik i. a. nur äußerst knapp dargestellt wird, werden die theoretischen Grundlagen des Transformators im übernächsten Abschnitt genauer erläutert.

## Fragen zum Versuch

1. Was versteht man unter Wirk-, Blind- und Scheinleistung, und wie hängen diese Größen zusammen?
2. Wozu dient der Eisenkern im Transformator, und warum setzt man ihn aus gegeneinander isolierten Eisenblechen zusammen?
3. Welche Bedeutung hat der Transformator beim Transport von elektrischer Energie über große Entfernungen?
4. Wie kann man Gleichstrom transformieren?
5. Wie ist die Wirkungsweise des idealen Transformators?

6. Welche Verluste treten beim realen Transformator auf?
7. Wie sehen die einfachen Ersatzschaltungen für den unbelasteten und kurzgeschlossenen Transformator aus?
8. Was versteht man unter einem Transformator diagramm?
9. Wie entsteht die Hysteresekurve bei der Magnetisierung?
10. Wie sieht ein Zeit-Strom-Diagramm beim Ein- und Ausschalten einer Induktivität aus?

## Theoretische Grundlagen

### Leistung des Wechselstroms

Wird eine Wechselspannung

$$\begin{aligned} U &= U_0 \cdot e^{i\omega t} \\ U &= U_{eff} \cdot \sqrt{2} \end{aligned}$$

an einen komplexen Widerstand  $Z$  gelegt

$$Z = R + iX$$

$R$  = ohmscher Widerstand (Wirkwiderstand)

$X$  = Blindwiderstand

$$\text{Kondensator: } X = -\frac{1}{\omega C}$$

$$\text{Spule: } X = \omega L$$

so fließt ein Strom

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot e^{i\omega t - i\varphi} \\ I_0 &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \end{aligned}$$

der gegen die Spannung um den Winkel  $\varphi$  phasenverschoben ist. Es gelten folgende Relationen (siehe auch Aufgabe Wechselstromkreise):

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} \qquad I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + X^2}} \qquad (1)$$

Die im ohmschen Widerstand verbrauchte mittlere Leistung nennt man Wirkleistung  $P$

$$P = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

Die momentan in Spulen und Kondensatoren aufgenommene und dann wieder abgegebene Leistung bezeichnet man als Blindleistung

$$P_{Bl} = I_{eff} \cdot U_{eff} \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

Unter der Scheinleistung versteht man das Produkt aus  $U_{eff}$  und  $I_{eff}$  bei einem sinusförmigen Wechselstrom:

$$P_{Sch} = I_{eff} \cdot U_{eff} = \sqrt{P^2 + P_{Bl}^2} \quad (4)$$

Die komplexen Größen  $Z$ ,  $U$ ,  $I$  können in einem Zeigerdiagramm in der komplexen Ebene dargestellt werden (Abb. 1).

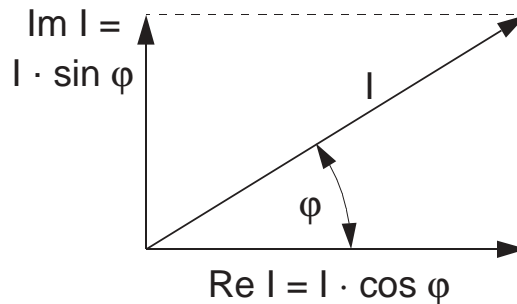


Abb. 1: Darstellung einer komplexen Größe  $I$  in der komplexen Ebene

## Der ideale Transformator

Der ideale Transformator besteht aus zwei vollständig gekoppelten, verlustfreien Spulen  $L_1$ ,  $L_2$ , mit den Windungszahlen  $n_1$ ,  $n_2$ . Das Verhältnis der Windungszahlen wird Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  genannt.

$$\ddot{u} = \frac{n_2}{n_1}$$

Der Strom  $I_1$  erzeugt in der Spule  $L_1$  einen magnetischen Fluss  $\Phi_1$ . Die durch den zeitlich veränderlichen Fluss induzierte Gegenspannung muss gleich  $U_1$  sein (Induktionsgesetz)

$$U_1 = +n_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt}$$

Bei idealer Kopplung durchsetzt der Fluss  $\Phi_1$  vollständig die Spule  $L_2$ , es gilt also  $\Phi_1 = \Phi_2$ . Der Fluss  $\Phi_2$  induziert in der Spule  $L_2$  eine Spannung

$$\begin{aligned} U_2 &= -n_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = \frac{n_2}{n_1} \cdot U_1 \\ U_2 &= -\ddot{u} \cdot U_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Beim idealen Transformator werden die Spannungen im Verhältnis der Windungszahlen transformiert und sind gegeneinander um  $180^\circ$  phasenverschoben. Dabei ist gleicher Windungssinn der Spulen vorausgesetzt. Die Punkte in Abb. 2 und 3 kennzeichnen den Windungsanfang.

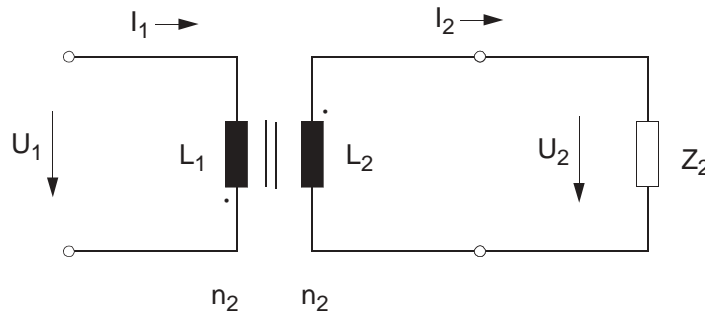


Abb. 2: Der ideale Transformator

Wirk-, Blind- und Scheinleistung sind beim idealen Transformator primär- und sekundärseitig gleich. Also gilt

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

woraus für die Ströme folgt

$$I_2 = \frac{-I_1}{\ddot{u}} \quad (6)$$



Der primärseitig erscheinende Widerstand

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$$

ergibt sich mit den Gl. reft-gl1, 6 zu

$$Z_1 = \frac{1}{\ddot{u}^2} \cdot Z_2 \quad (7)$$

Der Widerstand wird im Quadrat des Übersetzungsverhältnisses transformiert. Das ist eine der wichtigsten Transformatoreigenschaften (Widerstandsanpassung).

Für den idealen, belasteten Transformator gelten die Gleichungen

$$\begin{aligned} U_1 &= i\omega L_1 \cdot I_1 - i\omega M \cdot I_2 \\ U_2 &= i\omega L_2 \cdot I_2 + i\omega M \cdot I_1 \end{aligned}$$

Die Rückwirkung des Stromes  $I_2$  bzw.  $I_1$  auf die Spannung  $U_1$  bzw.  $U_2$  wird durch die Gegeninduktivität  $M$  berücksichtigt. Es gilt:

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (8)$$

## Der reale Transformator

Beim realen Transformator treten Verluste auf durch

- ohmschen Widerstand der Spule. Dieser wird durch einen Verlustwiderstand  $R_1, R_2$  berücksichtigt, der jeweils mit den Spulen  $L_1, L_2$  in Reihe liegt.
- Ummagnetisierung- und Wirbelstromverluste im Eisenkern. Diese werden durch einen parallel zur Spule geschalteten Verlustwiderstand  $R_v$  berücksichtigt.
- Streuverluste infolge unvollständiger Kopplung der beiden Spulen. Es gilt nicht mehr Gl. 8, sondern

$$M < \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

Die Größen

$$S_1 = L_1 - M \qquad S_2 = L_2 - M$$

werden als Streuinduktivitäten bezeichnet. Weiter werden definiert

$$\text{Kopplungsfaktor: } K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

$$\text{und Streufaktor: } \sigma = 1 - K^2$$

Das Ersatzschaltbild des realen, belasteten Transformators wird entsprechend kompliziert.

## Der reale, unbelastete Transformator

Der Sekundärkreis macht sich nicht bemerkbar. Der Transformator wirkt wie eine verlustbehaftete Spule. Da i. a.  $R_1 \ll \omega L_1$ , kann  $R_1$  vernachlässigt werden. Aus der Messung von  $U_1$ ,  $I_1$  und dem Phasenwinkel  $\varphi$  kann  $R_v$  bestimmt werden. Man bezeichnet den Strom durch  $R_v$  als Eisenverluststrom  $I_{Fe}$ , den Strom durch die Spule als Magnetisierungsstrom  $I_M$ .

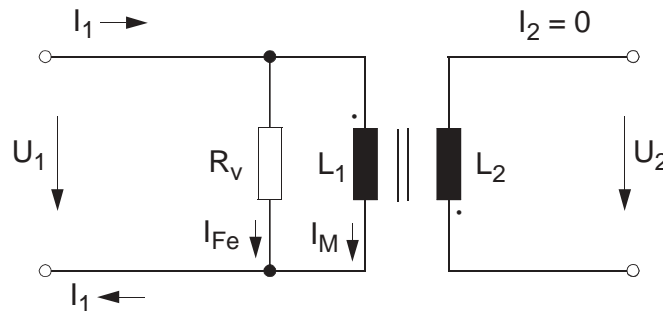


Abb. 3: Ersatzschaltbild für den realen Transformator im Leerlaufbetrieb

## Der reale Transformator im Kurzschluss

Wenn die Sekundärseite kurzgeschlossen wird, fließt maximaler Strom, der i. a. sehr viel größer ist als der Eisenverluststrom durch  $R_v$ . Folglich kann  $R_v$  vernachlässigt werden. Beim idealen Transformator im Kurzschluss wäre die Induktivität null, beim realen

Transformator bleibt die Streuinduktivität  $S$  übrig, so dass jetzt Ersatzschaltbild Abb. 4 gilt.

$R = R_1 + R_2 \cdot \ddot{u}^2$ ,  $R_{1,2}$  = ohmscher Widerstand der Primär- bzw. Sekundärwicklung.

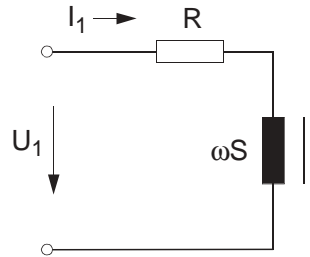


Abb. 4: Ersatzschaltbild für den realen Transformator im Kurzschlußbetrieb

## Hysteresis und magnetische Verlustleistung

Die Kraftflußdichte  $\vec{B}$  eines ferromagnetischen Materials ist nicht proportional zur magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$ , sondern es gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H}$$

wobei  $\mu$  die relative Permeabilität, eine Funktion von  $\vec{H}$  ist. Mit steigender Feldstärke  $\vec{H}$  erfolgt eine zunehmende Ausrichtung der Elementarmagnete (Weissche Bereiche) und entsprechend erhöht sich  $\vec{B}$ . Dazu muss Arbeit geleistet werden, d. h. im Magneten wird Energie gespeichert. Aus der Energiedichte des Magnetfeldes ergibt sich für die pro Volumen geleistete Arbeit, wenn  $\vec{H}$  von einem Wert  $\vec{H}_1$  auf einen Wert  $\vec{H}_2$  verändert wird

$$A = \int_{H_1}^{H_2} \vec{B} d\vec{H}$$

Ist  $\vec{H}$  eine periodische Funktion der Zeit mit der Frequenz  $\nu$ , so ist die Leistung

$$P_H = \nu \cdot \oint \vec{B} d\vec{H} \quad (9)$$

Im verlustfreien Fall wird die gesamte, im Magnetfeld gespeicherte Energie wieder an das erregende Feld  $H$  zurückgegeben, und das Integral Gl. 9 für einen Umlauf ist null (reine Blindleistung). Tatsächlich treten jedoch stets Verluste auf, d. h. die Funktion  $\vec{B}(\vec{H})$  zeigt für zu- und abnehmendes Feld einen anderen Verlauf (Hysteresis) und die Fläche dieser geschlossenen Kurve nach Gl. 9 gibt die magnetische Verlustleistung an. Die Verluste entstehen im wesentlichen durch die bei der Ausrichtung der Elementarmagnete auftretenden Reibungskräfte. Im folgenden werden nur isotrope Stoffe betrachtet. Dann ist  $\mu$  ein Skalar,  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  sind parallel zueinander und der Vektorcharakter braucht im folgenden nicht berücksichtigt werden.

Aus dem Durchflutungsgesetz

$$\oint \vec{H} \, d\vec{s} = H \cdot l = n_1 \cdot I_1 \quad (10)$$

folgt die Beziehung zwischen dem Strom  $I_1$  und dem Magnetfeld  $H$ . Hierbei ist  $l$  die gesamte Länge des Eisenkerns.

Die Kraftflussdichte

$$B = \frac{\phi}{F}$$

ist über das Induktionsgesetz mit der Sekundärspannung  $U_2$  verknüpft.

$$\begin{aligned} U_2 &= n_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ B &= \frac{1}{n_2 F} \int U_2 \, dt \end{aligned} \quad (11)$$

Um die Hysteresekurve auf dem Oszilloskop darzustellen, muß auf die Horizontalablenkung des Oszilloskops der Primärstrom  $I_1$ , auf die Vertikalablenkung das Integral über die Sekundärspannung gegeben werden. Dazu wird die Schaltung nach Abb. 7 benutzt. Es lässt sich leicht zeigen, dass für den Fall  $R \gg I/\omega C$  das RC-Glied an der Sekundärseite als Integrierglied arbeitet und für die Spannung

$U_c$  am Kondensator gilt

$$U_c = \frac{1}{RC} \int U_2 dt \quad (12)$$

Aus Gl. 11, 12 folgt dann

$$B = \frac{RC}{n_2 F} \cdot U_c \quad (13)$$

## Aufgabenstellung

### Aufgabe 1

1. Messen Sie am unbelasteten Trafo bei einer Primärspannung  $U_1 \approx 40 \text{ V}$  (Effektivwert) den Primärstrom  $I_1$  und die Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen  $U_1$  und  $I_1$ .
2. Berechnen Sie daraus die Wirkleistung  $P$ , den Eisenverluststrom  $I_{Fe}$ , den Magnetisierungsstrom  $I_m$ , den Widerstand  $R_v$  und die Induktivität  $L_1$  sowie den Wirkwiderstand des Stromkreises.
3. Nehmen Sie die Primärspule aus dem Transformator Kern heraus und messen Sie bei einer Spannung  $U_1 \approx 5 \text{ V}$  den Strom  $I'_1$  und die Phasenverschiebung  $\varphi'_1$  zwischen  $U'_1$  und  $I'_1$ .
4. Berechnen Sie den ohmschen Widerstand  $R_1$  (Wirkwiderstand) und die Induktivität  $L_1$  des Stromkreises (Abb. 6). Vergleichen Sie die Ergebnisse aus 1.2 und 1.4.
5. Zeichnen Sie die Ergebnisse aus 1.2 und 1.4 in ein Zeigerdiagramm (analog Abb. 1).

### Aufgabe 2

1. Messen Sie am kurzgeschlossenen Trafo bei der gleichen Primärspannung  $U_1$  wie bei 1.1 den Primärstrom  $I_1$  und die Phasenverschiebung  $\varphi$ .

2. Berechnen Sie die Wirkleistung  $P$ , den Wirkwiderstand  $R$ , den ohmschen Widerstand des Sekundärkreises  $R_2$  und die Gesamtstreuinduktivität  $S$  des Trafos.
3. Ermitteln Sie unter der Annahme, dass die Streuinduktivitäten beider Wicklungen gleich groß sind ( $S_1 = S_2 = S/2$ ), den Kopplungsfaktor  $K$  und den Streufaktor  $\sigma$ .
4. Fertigen Sie ein Zeigerdiagramm analog zu Abb. 1 an.

### Aufgabe 3



1. Ermitteln Sie in einer Messreihe die Änderung der Phasenverschiebung mit der sekundärseitigen Belastung  $R_B$  (rein ohmscher Widerstand). Beachten Sie, dass die Phasenverschiebung  $\varphi$  vom Verhältnis  $R_B$ /induktiver Widerstand der Sekundärseite abhängt. Wie groß ist  $\varphi$  für die beiden Grenzfälle  $R_B \rightarrow 0$ ,  $R_B \rightarrow \infty$ ?
2. Zeichnen Sie den Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  (Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung) als Funktion der Belastung in ein Diagramm.

### Aufgabe 4

1. Nehmen Sie die Hysteresisschleife des Transformator-kerns auf und fotografieren Sie sie mit der Polaroidkamera ab.
2. Berechnen Sie aus der Fläche der Hysteresiskurve die magnetische Verlustleistung  $P_H$ .
3. Berechnen Sie mit Hilfe der Wirkleistung aus 1.2 die Wirbelstromverluste  $P_W$ . Bei Vernachlässigung der geringen ohmschen Verluste gilt:  $P = P_W + P_H$ .

## Anleitungen zu den Aufgaben

- Schalten Sie den Regeltrafo nur ein, wenn er auf 0 V heruntergeregelt ist. Regeln Sie den Trafo auch zwischen den einzelnen Versuchen immer auf 0 V herunter (Beachten Sie Frage 10).
- $I_1$  maximal 0,8 A wählen!
- Das Messgerät gibt Effektivwerte an, das Oszilloskop dagegen Scheitelwerte!
- Die beiden Spulen des Trafos sind identisch!
- Wird das Ohmmeter in den Stromkreis geschaltet, darf keine Spannung am Regeltrafo anliegen!



### Zu Aufgabe 1.-3.

Messen Sie die Spannungen und Ströme mit einem Vielfachmessgerät. Ermitteln Sie die Phasenverschiebung mit Hilfe eines 2-Kanal-Oszilloskops (HM 412). Machen Sie sich vor Beginn der Versuchsdurchführung mit der Funktionsweise des HM 412 vertraut. (Betriebsanleitung befindet sich beim Versuch).

### Hinweise zum Gebrauch des Oszilloskops

- Nach dem Einschalten (Kontrolllampe leuchtet auf) die Qualität des Strahls ggf. mit INTENS und FOCUS verbessern.
- TIMEBASE auf 5 ms einstellen.
- Drehknopf AMPL I und AMPL II auf geeigneten Bereich einstellen (kleiner Drehknopf auf Rechtsanschlag).
- MONO/DUAL und ALT/CHOP eindrücken.

- AC-DC-SCHALTER auf unterste Stellung bringen und mit Hilfe der Drehknöpfe POS I und POS II die durch die Zeitablenkung entstehende Linie auf dem Oszilloskop mit der waagrechteten Koordinatenachse zur Deckung bringen (Nullpunkteinstellung).
- Nullpunkteinstellung zwischen den einzelnen Versuchen und nach Bereichsänderungen des Drehknopfes AMPL I bzw. AMPL II überprüfen.
- Anschließend AC-DC-SCHALTER auf AC umschalten.
- Mit den Drehknöpfen X-POS und X-MAGN die Kurve, die die Primärspannung wiedergibt, so einstellen, dass sich der volle Amplitudenbereich über die markierten 10 cm des Leuchtschirms erstreckt und außerdem symmetrisch zu dem Koordinatenkreuz zu liegen kommt.

### Zu Aufgabe 1.

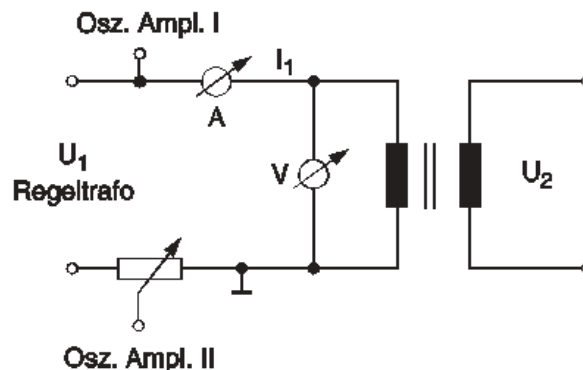


Abb. 5: Schaltung zur Messung des Leerlaufverhaltens. Beachten Sie die  $180^\circ$ -Phasenverschiebung zwischen Transformatorstrom und dem auf AMPL II gegebenen Signal am Oszilloskop.

Verwenden Sie die Schaltung nach Abb. 5. Bei Leerlauf mit Eisenkern ist die ohmsche Verlustleistung vernachlässigbar. Daher entspricht die Wirkleistung in guter Näherung der Eisenverlustleistung



$P_{Fe}$ . Legen Sie für die Berechnungen das Ersatzschaltbild Abb. 3 zugrunde mit  $R_1 = 0$ .

### Zu Aufgabe 2.

- Verwenden Sie ebenfalls die Schaltung nach Abb. 5, schließen Sie aber die Sekundärseite kurz.
- Im Kurzschlußversuch ist die Eisenverlustleistung vernachlässigbar. Die Ersatzschaltung für den kurzgeschlossenen Trafo (Abb. 4) besteht aus der Reihenschaltung des Wirkwiderstandes  $R = R_1 + R_2 \dot{u}^2$  und dem induktiven Gesamtwiderstand  $\omega S$ .

### Zu Aufgabe 3.

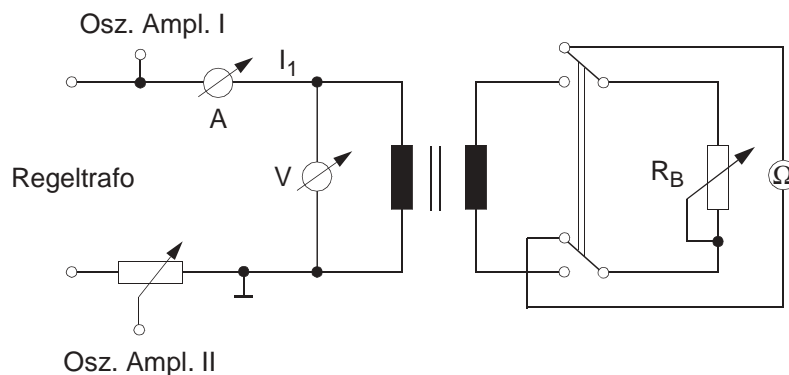


Abb. 6: Schaltung zu Aufgabe 3.

- Verwenden Sie die Schaltung Abb. 6.
- Verringern Sie die Phasenverschiebung in „mm-Schritten“ mit Hilfe des Potentiometers und lesen Sie dann die Belastung nach Umlegen des Schalters am Ohmmeter ab. Stellen Sie, um besser ablesen zu können, mit dem Drehknopf AMPL II einen empfindlicheren Bereich ein.

## Zu Aufgabe 4.

- Verwenden Sie die Schaltung nach Abb. 7.
- Stellen Sie das Oszilloskop auf 1-Kanalbetrieb um. Tasten MONO/DUAL und ALT/CHOP herausdrücken und die Taste HOR.EXT. eindrücken. AMPL I (Vert. Ablenkung) auf 50 mV/cm. AMPL II (Hor. Ablenkung) auf 5 mV/cm.
- Die Horizontalablenkung des Oszilloskops muss in Ampere geeicht werden. (Zur Erleichterung der Eichung sollten Sie den linken AC-DC-SCHALTER auf die unterste Position einstellen. Aus dem Strom  $I_1$  kann das Feld  $H$  nach Gl. 10 ermittelt werden.  $l = 48$  cm.

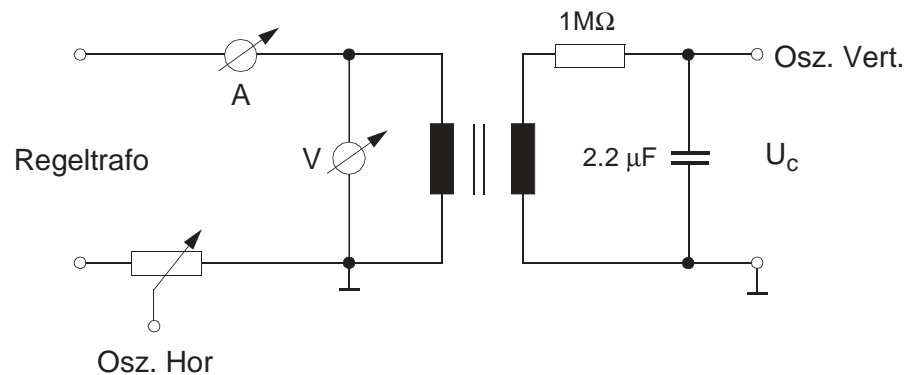


Abb. 7: Schaltung zu Aufgabe 4.

- Die Spannung  $U_c$  kann direkt abgelesen werden. Die Umrechnung in  $B$  erfolgt über Gl. 13.  $F = 16$  cm<sup>2</sup>.
- Bestimmen Sie die Fläche der Hystereseschleife mit einem Planimeter (bei dem Praktikumstechniker erhältlich).
- Beachten Sie bei der Aufnahme der Lissajous-Figur mit der Polaroidkamera Intensität am HM 412 zurückzudrehen. Blende 16 einstellen und ca. eine Sekunde belichten.

---

# E 3c Wechselstromkreise

---

## Aufgabenbeschreibung

Untersuchung des Wechselstromverhaltens von einfachen linearen Netzwerken aus Ohmschen Widerständen, Kondensatoren und Spulen.

1. Messung des Stroms durch verschiedene Kondensatoren bekannter Kapazität und Bestimmung zweier unbekannter Kapazitäten.
2. Messung des Frequenzgangs
  - a) eines Hochpasses aus Ohmschem Widerstand und Kapazität
  - b) eines Tiefpasses aus Ohmschem Widerstand und Induktivität
  - c) eines Tiefpasses aus Ohmschem Widerstand und Kapazität
  - d) eines Bandpasses aus Ohmschen Widerstand, Kapazität und Induktivität
3. Bei dem Hochpass und einem Tiefpass ist die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung zu beobachten.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. 5, Nr. 45
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 7.5.1–7.5.5
3. Schilling: Techn. Elektrizitätslehre, Kap. 2.2–2.5
4. Leonhard: Wechselströme und Netzwerke

5. Meinke: Die kompl. Berechnung von Wechselstromsch.
6. Kerkhofs: Einführung in die Gleich- und Wechselstromtechnik
7. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 5.4, 5.5

## Fragen zum Versuch

1. Wie sind die Begriffe Strom, Spannung und Widerstand definiert?  
Wie sind deren Einheiten festgelegt?
2. Was sagt das Ohmsche Gesetz aus?  
Was besagen die Kirchhoffschen Regeln?
3. Was versteht man unter Wechselstrom?  
Wie kann man ihn erzeugen?  
Was versteht man unter den Begriffen Amplitude, Phase, Frequenz, Effektivwert der Spannung oder des Stroms?  
Wie kann man Wechselstromspannungen oder -ströme mathematisch darstellen?
4. Wie stellt man eine Wechselspannung der Frequenz  $\omega_0$  in der komplexen Ebene dar?  
Wie stellt man in der komplexen Ebene zwei Wechselspannungen der gleichen Frequenz  $\omega_0$  dar, wenn zwischen beiden eine Phasendifferenz  $\phi$  besteht?
5. Wie sind die Begriffe Induktivität und Kapazität definiert?  
Was sind Blindwiderstände?  
Was versteht man unter dem Verlustwinkel einer realen Spule oder eines realen Kondensators?
6. Wie sind Wirk-, Blind- und Scheinwiderstand eines Wechselstromkreises definiert?  
Was bedeutet es, wenn ein Wechselstromgenerator mit einem reinen Blindwiderstand, einem reinen Wirkwiderstand oder einer Kombination aus beiden belastet wird?  
Wie sehen die entsprechenden Leistungen aus?
7. Was ist ein Hochpass, Tiefpass, Bandpass? Wozu benutzt man solche Filter?  
Was versteht man unter dem Frequenzgang eines Filters?

8. Wie kann man mit einem Oszilloskop die Phasenverschiebung zweier Wechselstromgrößen messen?
9. Wie groß ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung in den beiden Schaltungen in Abb. 1?

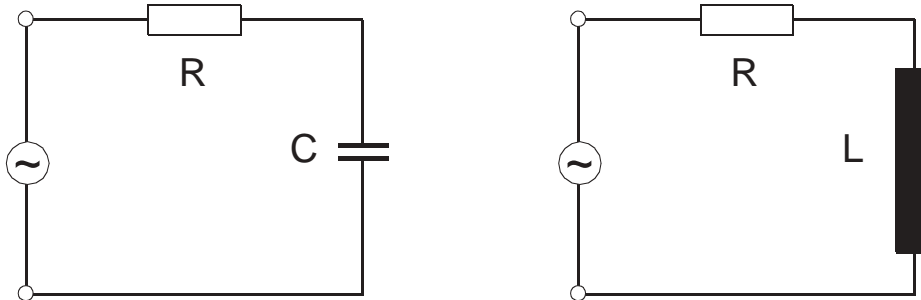


Abb. 1: Schaltungsskizzen zu Frage 9

## Versuchsdurchführung

### Zu Aufgabe 1

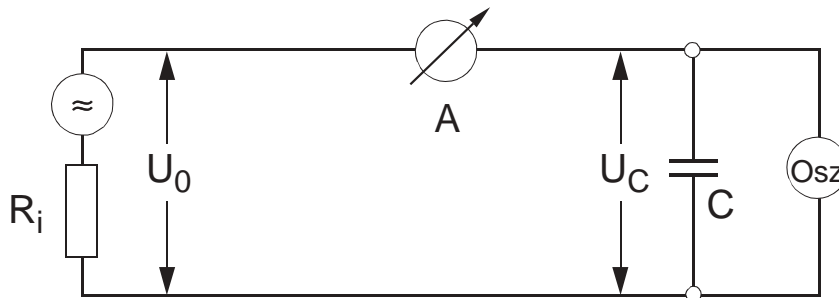


Abb. 2: Schaltungsskizze zu Aufgabe 1

In dem in Abb. 2 dargestellten Wechselstromkreis ist die Stromstärke  $I$  als Funktion der Kapazität  $C$  eines Kondensators (Kapazitätensatz benutzen) zu messen und zeichnerisch darzustellen. Die Spannung sei konstant. Bestimmen Sie anhand der aufgenommenen Kurve die Kapazität der unbekanntenen Kondensatoren

$C_X$  und  $C_Y$ . Die Spannung am Kondensator ist konstant zu halten. Die Frequenz ist geeignet zu wählen.

### Zu Aufgabe 2a

Bestimmen Sie die Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung der Schaltung („Hochpass“) in Abb. 3. Die Spannung  $U_0$  wird dazu auf die Y-Ablenkung, die Spannung  $U_R$  auf die X-Ablenkung des Oszilloskops gegeben. Bestimmen Sie  $\varphi$  in Abhängigkeit von der Frequenz und zeichnen Sie den Verlauf der Funktion.

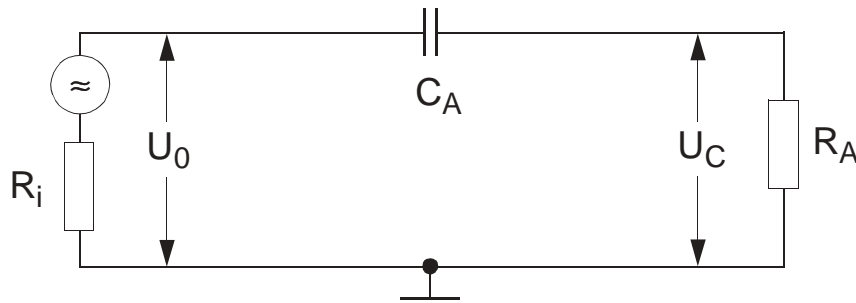


Abb. 3: Schaltungsskizze zu Aufgabe 2a), mit  $C_A = 1.5\mu\text{F}$ ,  $R_A = 333\ \Omega$

### Hinweise:

- Schwarze Buchse am Oszilloskop ist Erdung, ebenfalls Umhüllung des Koaxialkabels.
- Benutzen Sie halblogarithmisches Papier. Um gleichmäßige Abstände der Messpunkte zu erzielen, messen Sie zweckmäßigerweise z. B. bei 18, 32, 56, 100, 180, 320, 560, 1000 Hz, usw.
- Benutzen Sie zur Bestimmung der Phasenverschiebung die Lissajous-Figur (siehe Abb. 4) und die Ellipsengleichung:

$$\left[\frac{X}{A}\right]^2 - 2\frac{X}{A}\frac{Y}{B}\cos\varphi + \left[\frac{Y}{B}\right]^2 = \sin^2\varphi$$

Mit  $X = 0 \Rightarrow \sin\varphi = \frac{Y_0}{B}$

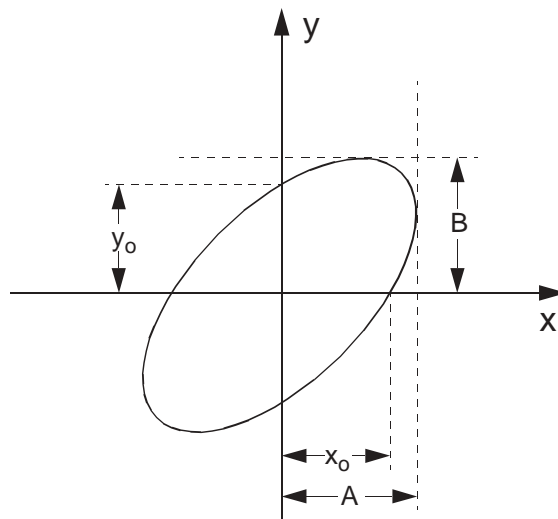
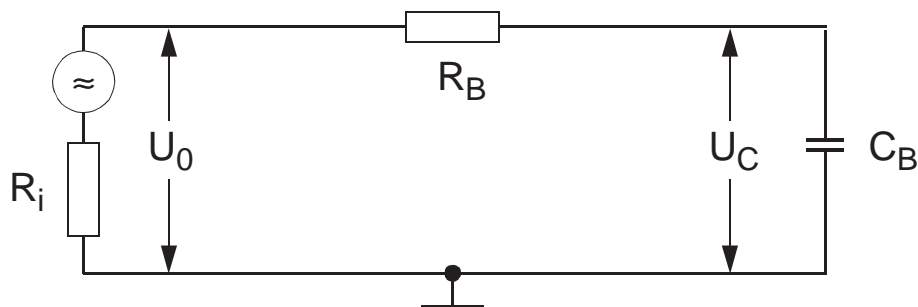


Abb. 4: Schematische Darstellung der Lissajous-Figur

### Zu den Aufgaben 2b und 2c

Bestimmen Sie die Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung der Schaltung („Tiefpass“) in Abb.5. Die Spannung  $U_0$  wird dazu auf die Y-Ablenkung, die Spannung  $U_C$  auf die X-Ablenkung des Oszilloskops gegeben. Eine analoge Messung ist mit der Induktivität durchzuführen, indem  $C$  durch  $L$  ersetzt wird ( $R = 300 - 1000 \Omega$ ).

Abb. 5: Schaltungsskizze zu Aufgabe 2b) + (2c)), mit  $C_B = 33 \text{ nF}$ ,  $R_B = 1 \text{ k}\Omega$

## Zu Aufgabe 2d

Nehmen Sie den Frequenzgang eines Bandpasses auf (siehe Abb.6 mit  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1.45 \mu\text{F}$ ,  $L = 11 \text{ mH}$ ). Messen Sie dazu das Verhältnis  $U_{out}/U_{in}$  in Abhängigkeit von der Frequenz und tragen Sie diese Transmissionsfunktion auf, wobei Sie die Frequenzskala logarithmisch wählen sollten.

Eingangs- und Ausgangsspannung werden jedesmal mit dem Oszilloskop gemessen. Dazu wird das Oszilloskop mittels des Umschalters abwechselnd an den Eingang bzw. Ausgang des „Vierpols“ gelegt.

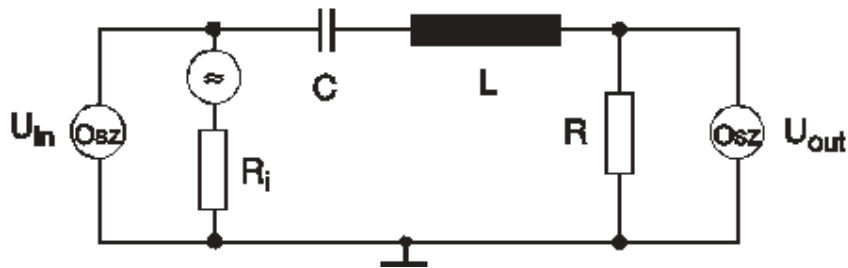


Abb. 6: Schaltungsskizze zu Aufgabe 2d)

## Zu Aufgabe 3

Berechnen Sie für Aufgabe 2a und 2b das Übertragungsverhalten und die Phasenverschiebung als Funktion der Frequenz und vergleichen Sie die theoretischen mit den experimentellen Abhängigkeiten. Welche Werte haben das Übertragungsverhältnis für  $\varphi = 45^\circ$  und die „Übergangsfrequenz“ des Hoch- und des Tiefpasses, d. h. die Frequenz, bei der die Phasenverschiebung zwischen  $U_{out}$  und  $U_{in}$  gerade  $\varphi = 45^\circ$  beträgt. Dort ist



$$\left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = \frac{1}{2} \sqrt{2} \quad (\text{Wieso?})$$

(Man sagt auch: Bei der Übergangsfrequenz „öffnet“ der Hochpass bzw. „schließt“ der Tiefpass).



---

# E 5a Elektromaschinen

---

## Aufgabenstellung

Aus verschiedenen Bauelementen sind elektrische Motoren und Generatoren aufzubauen.

### 1. Generatoren und Motoren mit Permanentmagneten

- a) Bauen Sie einen Generator mit Permanentmagneten. Skizzieren Sie den Spannungsverlauf an den Schleifringen. Greifen Sie die Spannung an dem Kollektor ab und skizzieren Sie den Spannungsverlauf für verschiedene Bürstenstellungen.
- b) Betreiben Sie den Aufbau als Gleichstrommotor. Beschreiben Sie das unterschiedliche Laufverhalten der verschiedenen Rotoren.

### 2. Gleichstrommotoren

Bestimmen Sie die Leistungskennlinien von einem Nebenschluss- und einem Hauptschlussmotor. Bestimmen Sie jeweils den Wirkungsgrad bei maximaler mechanischer Leistung.

### 3. Drehstrommotoren

Bauen Sie mit dem Vielpolrotor einen Drehstrommotor mit Kurzschlussläufer (Asynchronmotor). Messen Sie die max. Drehzahl für verschiedene Widerstände in den Ankerwicklungen.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. II, Kap. 5, Nr. 48
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 7.5.10

3. Grimsehl: Lehrbuch der Physik II, Kap. III, D
4. Leybold-Heraeus: Versuchsanleitungen für physikalische Apparate der Grundsammlung, Heft 7, Elektrische Maschinen
5. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 5.1

## Fragen zum Versuch

1. Geben Sie verschiedene Formulierungen des Induktionsgesetzes an (integrale und differentielle Form).
2. Welche Kräfte wirken auf Elektronen in einem elektromagnetischen Feld?
3. Welche Kräfte wirken auf eine stromdurchflossene Leiterschleife im homogenen Magnetfeld?
4. Informieren Sie sich über das Anlaufverhalten von Haupt-, Nebenschluss-, Synchron- und Asynchronmaschinen.
5. Erklären Sie das Prinzip des selbsterregten Dynamos (W. v. Siemens).
6. Wie muss ein Verbraucher an einen Generator angeschlossen werden, um maximale Leistung aufzunehmen?
7. Informieren Sie sich über den Anteil der elektrischen Energie am Gesamtenergieverbrauch Deutschlands.
8. Wie groß ist der Wirkungsgrad eines Generators (mechanische Energie  $\rightarrow$  elektrische Energie), wie groß ist der Wirkungsgrad eines Kohlekraftwerks (Heizenergie  $\rightarrow$  elektrische Energie)?
9. Wie kann man elektrische Energie speichern?

## Hinweise zur Durchführung und Auswertung

### Zu Aufgabe 1

- a) Treiben Sie den Rotor mit dem Exp. Motor an (max. Drehzahl). Benutzen Sie den Zweipolrotor und beobachten Sie den Spannungsverlauf auf einem Oszilloskop mit einem  $2 \Omega$  Lastwiderstand. Erklären Sie den Zusammenhang zwischen Rotorstellung und Spannung (Skizze).

Für den Gleichstromgenerator soll die optimale Bürstenstellung gefunden werden. Benutzen Sie auch hier einen  $2 \Omega$  Lastwiderstand. Erklären Sie die gefundene Abhängigkeit des Spannungsverlaufes von der Bürstenstellung.

- b) Beobachten Sie das Anlaufverhalten und das Laufverhalten bei kleinen Drehzahlen.

## Zu Aufgabe 2

Benutzen Sie den Vielpolrotor und eine Gleichspannungsquelle. Treiben Sie die Hilfswelle zur Messung des Drehmoments (s. Anhang) an. Benutzen Sie für beide Motoren die  $1,8 \Omega$  Feldspulen. Messen Sie jeweils den Ankerstrom und die Drehzahl bei verschiedenen Drehmomenten und konstanter Spannung. Führen Sie die Messung für einen Nebenschlußmotor ( $U = 10 \text{ V}$ ) ohne und mit einem Regulierwiderstand  $R$  von  $2,2 \Omega$  im Erregerkreis und für einen Hauptschlußmotor ( $U = 13 \text{ V}$ ) durch. Tragen Sie jeweils die Drehzahl gegen die mechanische Leistung und das Drehmoment auf.

Lassen Sie den Nebenschlußmotor ohne Last (auch ohne Treibriemen) bei  $U_k = 10 \text{ V}$  laufen mit  $R = 0 \Omega, 2,2 \Omega$ . Optimieren Sie jeweils die Bürstenstellung. Beobachten Sie Drehzahl und Drehrichtung. Erklären Sie, warum der Motor auch ohne Strom in den Erregerpulsen läuft. Wie kann man zeigen, dass es sich hier nicht um Restmagnetismus handelt?

Der Ankerstrom darf nur kurzzeitig  $1.6 \text{ A}$  übersteigen!



## Zu Aufgabe 3

Tragen Sie den Schlupf gegen den Widerstand in den Ankerwicklungen auf.

## Anhang

Das Drehmoment einer Motorwelle wird über die Reibungskraft, mit der die Welle abgebremst wird, gemessen. Ein Band, das um die Wel-

le geschlungen ist, wird durch zwei Federwaagen gespannt. Über die Differenz der Kräfte an den Federwaagen erhält man die tangential angreifende Reibungskraft und über den Wellendurchmesser den zugehörigen Hebelarm. Bei bekanntem Drehmoment und bekannter Drehzahl kann die mechanische Leistung des Motors bestimmt werden.

---

# O 1a Linsensysteme

---

## Aufgabenstellung

Es sind die Abbildungseigenschaften und Abbildungsfehler einer Linse zu untersuchen. Außerdem soll ein Fernrohr aufgebaut und dessen Vergrößerung bestimmt werden.

## Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 21.4–21.5, 21.8
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 1.9, 1.10, 1.12
3. Born: Optik, Kap. 2 (Geometrische Optik)
4. Kohlrausch: Praktische Physik II, Kap. 5.1
5. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl, Kap. 9.1–9.3
6. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 9.5, 9.6

## Fragen zum Versuch

### Geometrische Optik

1. Was versteht man unter der geometrischen Optik und welche Erscheinungen des Lichtes kann man mit ihrer Hilfe beschreiben, welche nicht?
2. Beschreiben Sie phänomenologisch die Erscheinungen Brechung, Reflexion und Totalreflexion.
3. Durch welches Grundprinzip der geometrischen Optik lassen sich die gradlinige Ausbreitung des Lichtes sowie das Reflexions- und Brechungsgesetz theoretisch begründen?

## Linsen

1. Beschreiben Sie qualitativ die Wirkung einer Linse. Was versteht man unter der Brennweite einer Linse, und wovon hängt die Brennweite ab?
2. Wie konstruiert man sich das Bild, das eine dünne Konvex- bzw. eine dünne Konkavlinse von einem Gegenstand entwirft?
3. Welche Bilder werden von einer Konvexlinse entworfen, wenn der Gegenstand sich
  - a) zwischen Linse und Brennebene
  - b) in der Brennebene
  - c) zwischen einfacher und doppelter Brennweite
  - d) im Abstand doppelter Brennweite und mehrbefindet? Was für Bilder entwirft eine Konkavlinse?
4. Was ist der Unterschied zwischen einem reellen und einem virtuellen Bild?
5. Wie beschreibt man geometrisch die Abbildung durch dicke Linsen?
6. Was ist eine Fresnelsche Linse?

## Brennweitenbestimmung einer Linse

1. Was versteht man unter dem Begriff Dioptrie einer Linse und wie hängt diese mit der Brennweite der Linse zusammen?
2. Mit welchem Verfahren lässt sich die Brennweite einer konvexen Linse bestimmen?
3. Wie kann man die Brennweite einer konkaven Linse bestimmen?
4. Informieren Sie sich über das Verfahren von Bessel zur Brennweitenbestimmung. Leiten Sie die Brennweitenformel her. Für welche Abstände zwischen Gegenstand und Schirm sind reelle Bilder zu erwarten?

## Abbildungsfehler

1. Diskutieren Sie folgende Abbildungsfehler einer Linse: sphärische Aberration, chromatische Aberration und Astigmatismus.
2. Wie kann man den Einfluss dieser Abbildungsfehler möglichst gering halten?
3. Kennen Sie noch weitere Linsenfehler?
4. Wovon hängt der Brennpunktdurchmesser eines fokussierten, parallelen Strahls bei einer idealen Linse ab?

## Optische Instrumente

1. Wie ist die Winkelvergrößerung eines optischen Systems definiert?
2. Diskutieren Sie den Strahlengang und die Vergrößerung einer Lupe.
3. Skizzieren Sie den Strahlengang des astronomischen (Keplerschen), des holländischen (Galileischen) und des terrestrischen Fernrohres.
4. Informieren Sie sich über Bau und Wirkungsweise eines Huygensschen Okulars. Welche Vorteile besitzt dieses Okular?
5. Leiten Sie die Vergrößerung für ein Fernrohr her.

## Versuchsdurchführung

### Aufgabenstellung

1. **Brennweitenbestimmung einer bikonvexen Linse**  
Messen Sie die Brennweite einer Linse ( $f \approx 250$  mm) für grünes Licht
  - a) durch Aufsuchen des Brennpunktes eines parallel einfallenden Lichtbündels,
  - b) nach dem Besselschen Verfahren.
2. **Untersuchungen der Linsenfehler**

- a) Bestimmen Sie die chromatische Aberration der bikonvexen Linse durch Aufsuchen der Brennpunkte für parallel einfallendes rotes und blaues Licht.
- b) Bestimmen Sie die spärliche Aberration durch Aufsuchen der Brennpunkte für achsennahe und achsenferne Strahlenbündel bei parallel einfallendem Licht.
- c) Untersuchen Sie qualitativ den Astigmatismus schief einfallender Lichtbündel.

### 3. Bau eines Fernrohres

- a) Bauen Sie sich aus zwei Linsen verschiedene Fernrohre.
  - ein astronomisches (Keplersches Fernrohr), (eine kurz- und eine langbrennweitige Sammellinse).
  - ein holländisches (Galileisches Fernrohr), (eine kurz-brennweitige Zerstreuungslinse und eine langbrennweitige Sammellinse).
- b) Bestimmen Sie deren Vergrößerung und vergleichen Sie die experimentell ermittelten Werte mit den aus den angegebenen Brennweiten theoretisch berechneten.



## Versuchsaufbau

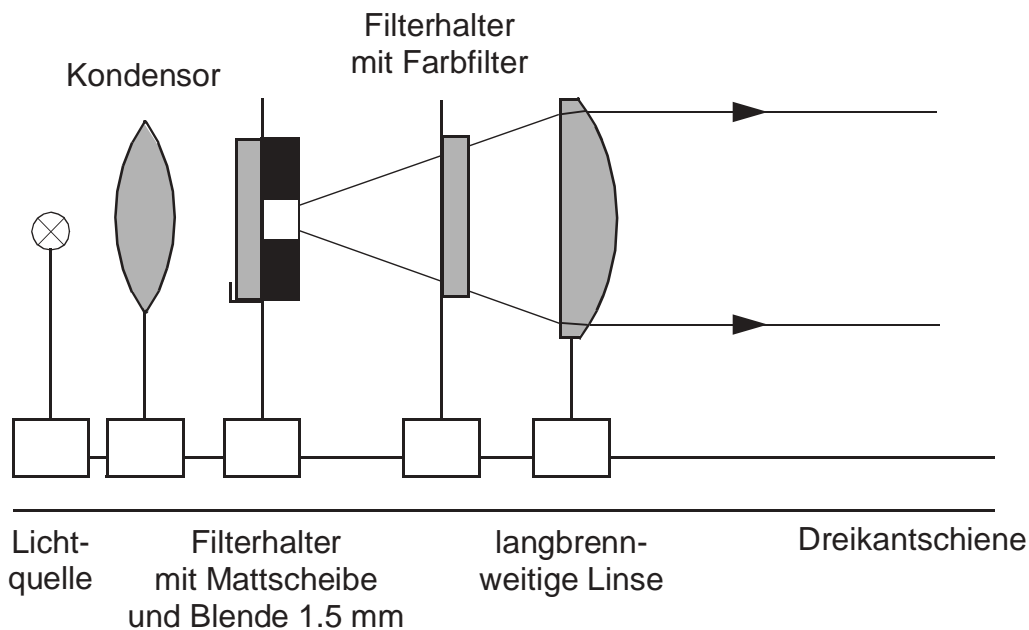


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

## Anleitung zu den einzelnen Aufgaben

### zu 1a)

Bringen Sie mittels des Verfahrens der Autokollimation alle Linsen auf eine optische Achse.

- Wodurch ist bei der gegebenen Versuchsanordnung die optische Achse definiert?



Erzeugen Sie sich mittels einer nahezu punktförmigen Lichtquelle und einer bikonvexen Linse ein paralleles Lichtbündel.

- Wie bauen Sie sich eine annähernd punktförmige Lichtquelle?
- Wie prüfen Sie nach, ob Ihr Lichtbündel nach der Linse tatsächlich parallel ist?



- Was für eine Linse muss man hierzu nehmen, um Linsenfehler möglichst klein zu halten?

Beachten Sie, dass die Linsenmitte i. a. keineswegs über der Ablesemarke des Stativs liegt und überlegen Sie sich, ob und wie dies bei den verschiedenen Messungen von Bedeutung ist.

### zu 1b)

Nehmen Sie als abzubildendes Objekt die beleuchtete Lochblende.



- Wie groß muss der Abstand zwischen dem Gegenstand (Lochblende) und dem Bildschirm mindestens sein, damit auf dem Bildschirm für zwei Stellungen der abbildenden Linse ein scharfes Bild der Lochblende entsteht?
- Aus welchen Messgrößen lässt sich beim Besselschen Verfahren die Brennweite der untersuchten Linse bestimmen?
- Beim Besselverfahren ist die Messung mehrfach zu wiederholen und das Ergebnis durch Mittelwertbildung zu ermitteln.

### zu 2a)



Benutzen Sie als abbildende Linse eine kurzbrennweitige Linse ( $f = 50 \text{ mm}$ ). Warum? Bei der Messung der chromatischen Abberation soll die sphärische Abberation ausgeschaltet werden.

### zu 2b)



Bei der Messung der sphärischen Abberation soll die chromatische Abberation ausgeschaltet werden. Als abbildende Linse soll wieder die kurzbrennweitige Linse mit  $f = 50 \text{ mm}$  benutzt werden. Wählen Sie für die Bestimmung des Brennpunktes für achsennahe Strahlen die Blendenöffnung nicht zu klein ( $8 - 10 \text{ mm}$ ). Warum?

## zu 3b)

Benutzen Sie zur experimentellen Bestimmung der Vergrößerung einen Strahlteiler, der zwischen Auge und Okularlinse gesetzt wird.

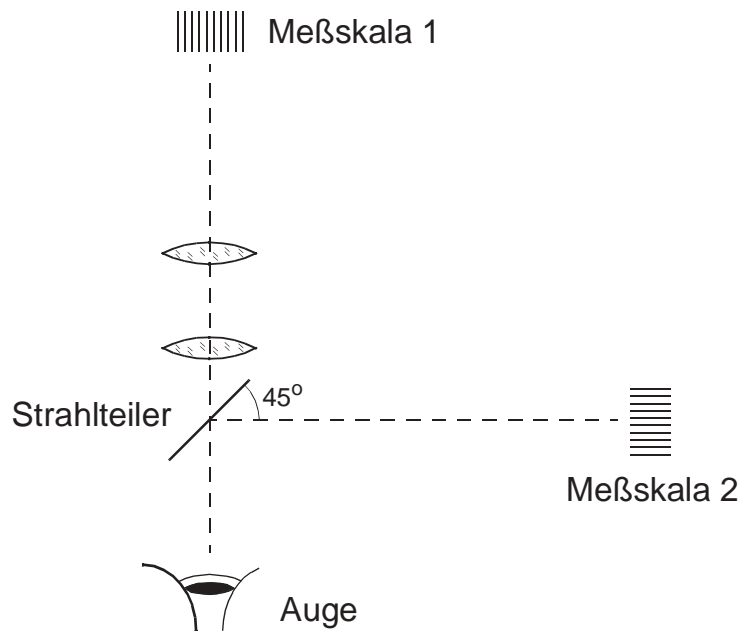


Abb. 2: Versuchsaufbauskitze zu Aufgabe 3b)

Da die Messskala 1 doppelt soweit wie Messskala 2 vom Fernrohr entfernt ist, sind die Abstände der Striche in Messskala 2 halb so groß.

Benutzen Sie für diese Art der Bestimmung der Vergrößerung  $v$  als langbrennweitige Linse nur eine Linse mit  $f = 250$  mm.

Für langbrennweitige Systeme muss zur Bestimmung der Vergrößerung der Abstand zwischen Fernrohr und Objekt (Messskala 1) wesentlich vergrößert werden. Da dann keine Vergleichsskala zur Verfügung steht, kann die Vergrößerung dadurch bestimmt werden, dass man die Messskala 1 mit einem Auge durch das Fernrohr und mit dem anderen Auge am Fernrohr vorbei betrachtet und beide Bilder vergleicht.

---

# O 1b Prisma

---

## Aufgabenbeschreibung

Ein Prisma soll als dispergierendes Element zur Spektralanalyse benutzt werden. Als Lichtquellen werden Metalldampf-Spektrallampen benutzt.

## Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 21.6
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 2.3, 2.10, 3.1, 3.9
3. Born: Optik, Kap. IV § 53
4. Kohlrausch: Praktische Physik, Kap. 5.1.2.6
5. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 9.1.5
6. Hellwege: Einführung in die Physik der Atome, Kap. F
7. Finkelnburg: Einführung in die Atomphysik, Kap. III
8. Knaubühl: Repetitorium der Physik, Kap. 6.13.2
9. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 9.4

## Fragen zum Versuch

1. Wie heißt das Snelliussche Brechungsgesetz?
2. Was besagt das Prinzip von Fermat?
3. Was versteht man bei einem Prisma unter den Begriffen brechende Kante, Ablenkwinkel, Hauptschnitt und Basis?
4. Wie lautet die Fraunhofersche Ablenkbedingung?
5. Was versteht man unter der optischen Dispersion und welche Abhängigkeit wird in einer Dispersionskurve dargestellt? Was bedeutet normale bzw. anormale Dispersion?
6. Nennen Sie Beispiele, wo die Dispersion störend ist und wo sie erwünscht ist.

7. Worin unterscheiden sich Gitter und Prismenspektrometer?
8. Wie definiert man das Auflösungsvermögen eines Spektrometers?
9. Wodurch ist das Auflösungsvermögen eines Prismas gegeben?
10. Wie erklärt man sich die Entstehung von Licht?
11. Wodurch entsteht ein Emissionsspektrum?
12. Worin unterscheidet sich das Spektrum eines glühenden Festkörpers vom Spektrum freier Atome oder Moleküle?
13. Was versteht man unter der natürlichen Linienbreite einer Spektrallinie?
14. Nennen Sie bekannte kontinuierliche Lichtquellen.
15. Wie funktioniert eine Gasentladungslampe?

## Versuchsdurchführung

1. Bestimmen Sie den Winkel  $\varepsilon$  der brechenden Kante.
2. Messen Sie für die in dem in Abb.1 dargestellten Spektrum unterstrichenen Spektrallinien des Quecksilbers die zugehörigen minimalen Ablenkungswinkel  $\delta_{min}$ . Verwenden Sie dabei die Differenzmethode.

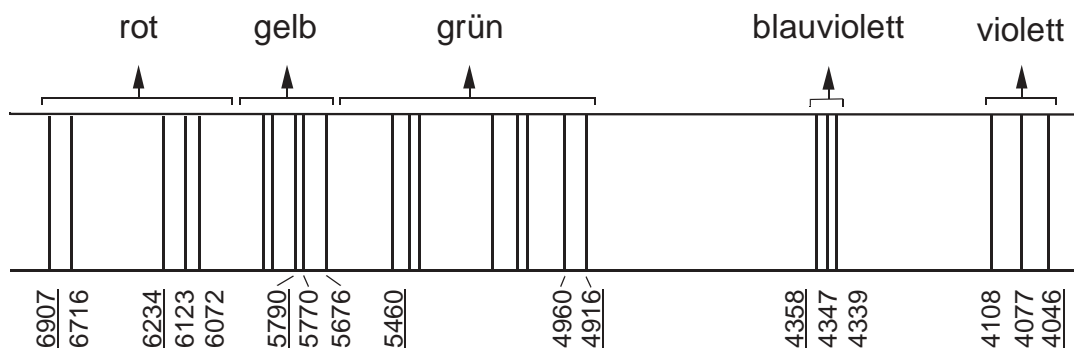


Abb. 1: Schematische Darstellung des Linienspektrums von Quecksilber (Ausschnitt)

3. Berechnen Sie aus den minimalen Ablenkwinkeln  $\delta_{min}$  dieser sieben Spektrallinien den jeweiligen Brechungsindex  $n(\lambda)$  und zeichnen Sie damit die Dispersionskurve des Prismenmaterials. Versehen Sie die Messpunkte mit Fehlerbalken, die unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung gewonnen werden sollten.
4. Lesen Sie für die fünf intensivsten Linien einer Cd-Lampe die zugehörigen Ablenkwinkel ab und bestimmen Sie durch Vergleich mit den Ergebnissen in 2. deren Wellenlängen.
5. Wählen Sie aus dem Hg-Spektrum zwei geeignete (identifizierbare) Linienpaare zur Abschätzung des Auflösungsvermögens des Spektralapparates aus und vergleichen Sie mit dem theoretisch zu erwartenden Wert.

---

# O 1d Rotationsdispersion

---

## Aufgabenbeschreibung

Die Drehung der Polarisationsene linear-polarisierten Lichtes durch Rohrzuckerlösungen bekannter Konzentration als Funktion der Wellenlänge wird gemessen und daraus die spezifische Drehung  $\alpha_{spez}(\lambda)$  bestimmt (Rotationsdispersion). Mit dem gleichen Messverfahren wird dann die Konzentration einer unbekanntes Rohrzuckerlösung bestimmt.

## Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 20.11
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 4.8, 7. Einleitung–7.3
3. Born: Optik, Kap. 63, 64
4. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 10.2
5. Pohl: Optik und Atomphysik, Bd. III, Abschnitt X
6. Grimsehl: Lehrbuch der Physik, Bd. III
7. Flügge: Studienbuch zur technischen Optik, Kap. 1.5
8. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 8.7

## Theoretische Grundlagen

Besonders ausführlich sind die Grundlagen in Lit. 2. und 3. dargestellt. Als kurze einprägsame Ausführungen wird auf Lit. 6. und 7. hingewiesen. Sie sollte man für die Beantwortung der nachfolgenden Fragen zum Versuch zuerst heranziehen.

## Fragen zum Versuch

1. Was ist eine Welle, was eine Schwingung? Wie kann man sie mathematisch beschreiben? Geben Sie für beide Phänomene einige Beispiele an.
2. Erklären Sie folgende Begriffe: Amplitude, Frequenz, Wellenlänge, Wellenvektor, Phase, Phasenverschiebung.
3. Was versteht man unter linear, zirkular und elliptisch polarisierten Wellen und wie kann man sie mathematisch darstellen?
4. Erklären Sie die Wirkungsweise eines  $\lambda/4$  Blättchens bzw.  $\lambda/2$  Blättchens.
5. Was versteht man unter dem Begriff Polarisationsgrad und wie ist dieser für Licht definiert?
6. Wie kann man linear polarisiertes Licht herstellen und nachweisen?
7. Informieren Sie sich über die Wirkungsweise eines Nicolschen Prismas und einer Polarisationsfolie.
8. Wie kann man mit Hilfe der Strahlcharakteristik eines Dipols die Polarisation durch Reflexion bzw. Brechung anschaulich erklären? Wann ist der reflektierte Strahl vollständig polarisiert?
9. Was ist Dispersion und speziell Rotationsdispersion?
10. Welche Phänomene kennen Sie, bei denen die Polarisationsebene von linear polarisiertem Licht gedreht wird? Wie kann man die Drehung der Polarisationsebene durch Zerlegung der linear polarisierten Wellen in zwei geeignete zirkular polarisierte Wellen anschaulich erklären?



## Versuchsaufbau

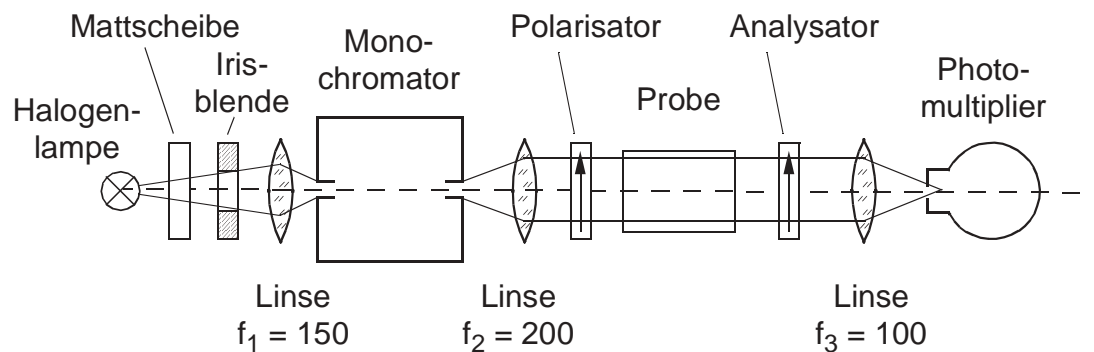


Abb. 1: Versuchsaufbauskizze

## Versuchsdurchführung

### 1. Herstellung der Messbereitschaft

#### a) Justierung des Versuchsaufbaus

- i. Zuerst werden alle Teile (Lampe, Irisblende, Linsen, Monochromator, Polarisator, Analysator und Multiplier) auf gleiche Höhe über der optischen Achse gebracht. Danach wird die Halogenlampe durch Mattscheibe und Irisblende (Warum?) mit Linse 1 ( $f_1 = 150$  mm) auf den Eintrittsspalt ( $b = 2,5$  mm) des Monochromators abgebildet. Dazu werden Linse und Monochromator verschoben, bis ein scharfes Bild auf dem Eintrittsspalt entsteht.
- ii. Die Wellenlängenanzeige des Monochromators wird mit Hand (Motorgehäuse lösen und etwas beiseite schieben) auf 0 gedreht (0-te Ordnung). Das in der 0-ten Ordnung aus dem Monochromator austretende Licht wird mit Linse 2 ( $f_2 = 200$  mm) parallel gemacht (Methode?) und mit Linse 3 ( $f_3 = 100$  mm



mm) auf den Multipliereintrittsspalt scharf abgebildet (**keine** Ziehspannung ( $U_{zieh}$ ) am Multiplier!).

- b) Die Ziehspannung ( $U_{zieh}$ ) des Multipliers wird so gewählt, dass die Ausgangsspannung ( $U_{signal}$ ) des Multipliers maximal 0,2 V beträgt. Vor jedem Telexperiment muss überprüft werden, dass diese Obergrenze nicht überschritten wird!



Ein ungeschützter Multiplier mit angelegter Spannung verträgt kein Tageslicht.

## 2. Messungen und Auswertung

- a) Prüfen Sie mit dem Polarisator (Analyзатор aus dem Strahlengang nehmen), wie das Licht des Monochromators (0-te Ordnung) polarisiert ist. Drehen Sie dazu den Polarisator von Hand langsam und gleichmäßig einmal durch und nehmen Sie dabei die Intensität  $I_1(\varphi_1)$  mit dem (x-t)-Schreiber auf. berechnen Sie den Polarisationsgrad des Lichtes.

$$P = \frac{I_{1max} - I_{1min}}{I_{1max} + I_{1min}}$$

- b) Stellen Sie den Polarisator auf maximale Durchlassintensität ( $\varphi_{1max}$ ). In diesem Fall verläuft die Schwingungsebene parallel zur Durchlassrichtung des Polarisators.  $\varphi_{1max}$  hat dann den Wert  $0^\circ$  bzw.  $180^\circ$ . Drehen Sie den Analysator langsam einmal durch. Die Intensität  $I_2(\varphi_1 = \varphi_{1max} = \text{const.}, \varphi_2)$  wird wieder mit dem (x-t)-Schreiber aufgenommen und der Polarisationsgrad anschließend berechnet.
- c) Drehen Sie mit der Hand den Monochromator auf  $\lambda = 400$  nm und wählen Sie eine geeignete Ziehspannung ( $U_{zieh}$ ) des Multipliers ( $U_{signal} < 0,2$  V). Dann drehen Sie weiter bis auf  $\lambda = 700$  nm, wobei die Ziehspannung derart heruntergeregelt wird, dass die Signalspannung

0,2 V nicht überschreitet. Mit dieser (für das Maximum der spektralen Intensitätsverteilung optimalen) Ziehspannung wird dann ein Spektrum (400 - 700 nm) mit dem (x-t)-Schreiber aufgenommen.

Dazu werden bei 400 nm der Motor des Monochromators angekuppelt (Zahnräder ineinanderschieben und mit Schraube arretieren), am Schreiber eine geeignete Schreibgeschwindigkeit eingestellt und beide Geräte gestartet. Markieren Sie auf dem Registrierpapier Anfangs- und Endpunkte (ggf. auch einige Zwischenpunkte) des  $\lambda$ -Scans.

Nach der Aufnahme des Spektrums wählen Sie 5 geeignete Wellenlängen aus, bei denen die folgenden Messungen durchgeführt werden sollen.

- d) Bestimmung der Drehwinkel  $\alpha(\lambda)$  für drei Rohrzuckerlösungen bekannter Konzentrationen als Funktion der Wellenlänge des Lichtes. Dazu werden die Küvetten mit den Lösungen zwischen Polarisator und Analysator gestellt. Der Polarisator wird auf den in 2a) gefundenen Wert  $\varphi_{1max}$  gestellt und mit dem Analysator wird der Drehwinkel bei den 5 verschiedenen Wellenlängen bestimmt. Es bieten sich 2 Möglichkeiten zur Bestimmung des Drehwinkels an: Man schaut bei welchem Winkel  $\varphi_2$  maximale bzw. minimale Intensität  $I_1(\varphi_2)$  auftritt und rechnet daraus  $\alpha(\lambda)$  jeweils aus. Welche Methode ist genauer? Für den Drehwinkel gilt:



$$\alpha(\lambda) = c \cdot l \cdot \alpha_{spez}(\lambda)$$

mit

$c$  = Konzentration [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] ( $= \frac{\text{Menge des Zuckers}}{\text{Volumen der Lösung}}$ ),

$l$  = Länge der Lösung, die vom Licht durchsetzt wird [cm] und

$\alpha_{spez}(\lambda)$  = Drehvermögen des entsprechenden Zuckers [ $\frac{\text{grad} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}}$ ] bei einer bestimmten Wellenlänge.

Zeichnen Sie die gemessenen Drehwinkel in ein geeignetes Diagramm, aus dem die Abhängigkeit von der Konzentration und der Wellenlänge ersichtlich ist (Eichdiagramm).

- e) Bestimmung der Drehwinkel  $\alpha(\lambda)$  einer Rohrzuckerlösung unbekannter Konzentration als Funktion der Wellenlänge des Lichtes. Es wird wie unter 2d) bei den gleichen 5 Wellenlängen verfahren. Die erhaltenen Drehwinkel  $\alpha(\lambda)$  werden in das Diagramm aus 2d) eingetragen und daraus wird die Konzentration graphisch bestimmt.

---

# O 2d Beugung am Spalt

---

## Aufgabenstellung

In der Versuchsanordnung werden Einfach- und Mehrfachspalte durch einen aufgeweiteten parallelen Laserstrahl beleuchtet. Die entsprechenden Beugungserscheinungen sollen in einer Fraunhoferschen Beugungsanordnung untersucht werden. Aus den Beugungsbildern soll die Wellenlänge des benutzten Laserlichtes bestimmt werden.

## Literatur

1. Alonso-Finn II: Kap. 23
2. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 38
3. Born: Optik, Kap. 4, § 48
4. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 10.1
5. Kneubühl: Repetitorium der Physik, § 6.15.1–3
6. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 10.5

## Fragen zum Versuch

### Natur des Lichtes

1. Welche verschiedenen Vorstellungen von der Natur des Lichtes hat man sich im Laufe der Zeit gemacht?
2. Welche Erscheinungen sprechen für die Wellennatur des Lichtes?
3. Was versteht man unter monochromatischem, was unter kohärentem Licht?

## Wellenoptik

1. Welches sind die wichtigsten Prinzipien der Wellenoptik?
2. Was sagt das Huygenssche Wellenprinzip aus? Ist seine Anwendung auf Lichtwellen begrenzt?
3. Was versteht man unter dem Begriff Interferenz von Wellen?
4. Welche Eigenschaften muss Licht haben, damit man stehende Interferenzerscheinungen beobachten kann?
5. Was versteht man unter dem Begriff Beugung von Licht? Ist das Phänomen Beugung auf Lichtwellen beschränkt?
6. Welche Bedingungen müssen zwischen der Wellenlänge der gebeugten Welle und der Ausdehnung des Beugungshindernisses (z.B. der Breite eines Spaltes) erfüllt sein, damit man Beugungserscheinungen beobachten kann?
7. Wie unterscheidet sich die Fraunhofersche von der Fresnel'schen Beugungsanordnung, und welche der beiden findet bei diesem Versuchsaufbau Anwendung?

## Beugung am Einzelspalt

1. Wie sieht die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines Einzelspaltes aus?
2. Wie kann man die Lage der Intensitätsminima und -maxima mit Hilfe geometrischer Überlegungen anschaulich erklären?
3. Was versteht man unter Zweistrahl-, was unter Vielstrahl-Interferenz?
4. Leiten Sie die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines Einzelspaltes durch Vielstrahl-Interferenz her.
5. Diskutieren Sie anhand dieser Gleichung die Lage der Intensitätsextrema und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den geometrisch ermittelten Lagen.

## Beugung am Doppelspalt

1. Wie ändert sich die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes, wenn man statt eines Einzelspaltes der Breite  $b$  einen Doppelspalt mit Einzelspaltbreiten  $b$  und Mittenabstand  $2b$  benutzt?

2. Erklären Sie mittels geometrischer Überlegungen die Lage und Zahl der zusätzlich auftretenden Intensitäts-Nebenminima in den einzelnen Beugungsordnungen.
3. Was versteht man hierbei unter Hauptmaximum und Hauptminimum, was unter Nebenmaximum und Nebenminimum?

## **Messtechnische Anwendungen von Beugungserscheinungen**

1. Machen Sie sich klar, wie bei der Fraunhoferschen Beugungsanordnung aus dem Beugungsbild eines Einzelspaltes oder eines Doppelspaltes die Wellenlänge des gebeugten Lichtes bestimmt werden kann.
2. Wie lässt sich mittels Beugung die Spaltbreite eines unbekanntes Spaltes bestimmen?
3. Welche weiteren Anwendungen von Beugungserscheinungen kennen Sie?
4. Welche Bedeutung hat die Beugung bei der Abbildung durch optische Geräte, z. B. Linse, Fernrohr, Mikroskop?

## **Apparativer Aufbau**

1. Wodurch zeichnet sich bei Beugungsexperimenten Laserlicht besonders aus?
2. Machen Sie sich den Strahlengang der zur Verfügung stehenden Versuchsanordnung klar (diese Anleitung).
3. Welche Möglichkeiten kennen Sie, einen parallelen Laserstrahl aufzuweiten?
4. Informieren Sie sich über die Funktionsweise eines Photomultipliers bzw. eines Phototransistors.

# Versuchsdurchführung

## Aufgabenstellung

### 1. Inbetriebnahme der Apparatur

- a) Weiten Sie den Laserstrahl mit einem Teleskopsystem aus zwei Linsen auf.
- b) Bauen Sie eine Fraunhofersche Beugungsanordnung auf.

### 2. Untersuchung verschiedener Beugungsbilder

- a) Machen Sie sich mit der Handhabung von APLAB<sup>©</sup> vertraut. Dazu finden Sie an Ihrem Arbeitsplatz eine Anleitung. Sollten Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich an Ihren Betreuer.
- b) Nehmen Sie die Intensitätsverteilung eines Einzelspaltes der Breite  $b = 65 \mu\text{m}$  (bzw.  $b = 55 \mu\text{m}$ ) bis mindestens zur 3. Beugungsordnung auf.
- c) Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Abstände zweier benachbarter Intensitätsminima eines Einzelspaltes als Funktion der Spaltbreite.
- d) Nehmen Sie die Intensitätsverteilung des Zentralmaximums des Doppelspaltes (Dia 1) mit der Spaltbreite  $b = 65 \mu\text{m}$  (bzw.  $55 \mu\text{m}$ ) auf und vergleichen Sie diese mit dem Zentralmaximum des Einfachspaltes aus Aufgabe 2a).
- e) Nehmen Sie mit Hilfe des Schreibers die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines Dreifachspaltes (Dia 2) und eines Sechsfachspaltes (Dia 3) auf. Vergleichen Sie die Beugungsbilder von Doppel-, Dreifach- und Sechsfachspalt miteinander.
- f) Es empfiehlt sich, alle Messungen durchzuführen, bevor Sie mit dem Anfitzen und Ausdrucken beginnen, da diese Maßnahmen relativ zeitintensiv sind.



### 3. Wellenlängenbestimmung

- a) Bestimmen Sie aus dem Beugungsbild des Einzelspaltes die Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Laserlichtes. Benutzen Sie dazu möglichst viele Messungen aus den Aufgaben 2a) und 2b). Ermitteln Sie in einer ausführlichen Fehlerfortpflanzungsrechnung Fehlerschranken für die bestimmte Wellenlänge.

### Versuchsaufbauskitze

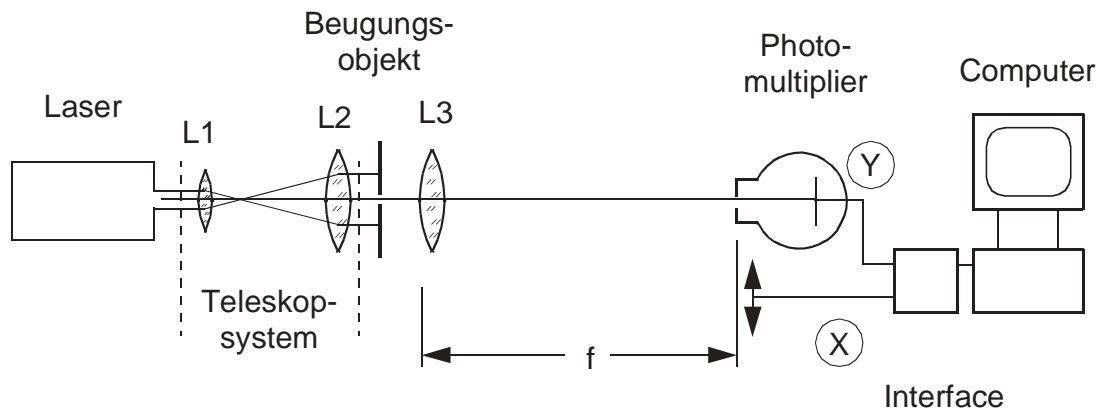


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus

### Anleitung zur Versuchsdurchführung

#### zu 1a)

Bauen Sie aus zwei bikonvexen Linsen ein Teleskopsystem, mit dem der parallele Laserstrahl so aufgeweitet wird, dass der aufgeweitete Strahl wieder parallel ist.

- Wie muss man die Brennweiten der einzelnen Linsen wählen und wie müssen die Linsen angeordnet werden, damit der aufgeweitete Strahl parallel bleibt?





- Gibt es andere Möglichkeiten einen schmalen parallelen Lichtstrahl aufzuweiten?

Bei der Justierung des Teleskopsystems gehen Sie wie folgt vor:

- Justieren Sie den Laser so ein, dass der Strahl horizontal über der Mitte der optischen Bank verläuft.
- Verschieben Sie den Photodetektor seitlich und in der Höhe bis das Kreuz auf der Abdeckklappe in der Mitte des Laserstrahles liegt.
- Stellen Sie nun die Linse L1 unmittelbar vor dem Laser in den Strahlengang. Verschieben Sie die Linse in vertikaler Richtung bis die Mitte des (aufgeweiteten) Strahles die Höhe der Markierung auf der Abdeckklappe hat. Drehen Sie nun den Laser bis die Strahlmitte mit dem Markierungskreuz übereinstimmt.
- Stellen Sie die Linse L2 grob im richtigen Abstand von L1 auf und justieren Sie sie wie L1 ein.
- Verschieben Sie die Linse L2 bis der aufgeweitete Strahl parallel ist. Die Parallelität können Sie überprüfen, indem Sie den Strahldurchmesser beobachten, wenn Sie ein Stück Papier entlang des Strahles bewegen.

### zu 1b)

Stellen Sie nun eines der Beugungsobjekte in den aufgeweiteten parallelen Lichtstrahl und bilden Sie dessen Beugungerscheinungen mittels einer langbrennweitigen Linse ( $f = 1000 \text{ mm}$ ) auf dem verschiebbaren Photodetektor ab.



- Würden Sie auch ohne diese Linse Beugungerscheinungen sehen?
- Wenn ja, wozu braucht man dann diese Linse?



Vor jeder Messung mit einem neuen Beugungsobjekt muss die geeignete Verstärkung am Photodetektor eingestellt werden. Montieren Sie dazu das jeweilige Beugungsobjekt und fahren Sie den Eintrittsspalt des Detektors auf die Stelle der höchsten Intensität und regeln Sie mit dem Abschwächer die Ausgangsspannung auf unter 10V.

**zu 2b)**

Verwenden Sie den fest eingestellten Spalt ( $b = 65 \mu\text{m}$  bzw.  $55 \mu\text{m}$ ). Verändern Sie auf keinen Fall die eingestellte Spaltbreite durch Lösen der Schrauben. Nehmen Sie zunächst mit dem XY-Schreiber von APLAB<sup>©</sup> ein Beugungsbild auf. Die Eingänge des XY-Schreibers müssen dazu im Verbindungsfenster mit den geeigneten Signalausgängen am Experiment verbunden werden. Zur Aufnahme des Beugungsbildes fahren Sie den Photodetektor durch Drehen der Kurbel des Verschiebetisches gleichmäßig über das Beugungsbild. Wählen Sie geeignete Einstellungen für X- und Y-Eingang des Schreibers. Messen Sie nun die Intensitätsverteilung des Einzelspalt.

**zu 2c)**

Messen Sie für zwei weitere Spaltbreiten z. B. 0,1 mm und 0,2 mm die Intensitätsverteilungen in gleicher Weise wie in 2a). Verwenden Sie den mit Mikrometerschraube einstellbaren Spalt.

**zu 2d)**

Wie 2b).

**zu 2e)**

Messen Sie die Intensitätsverteilung hinter einem Dreifach- (Dia 2) und einem Sechsfachspalt (Dia 3). Verwenden Sie jeweils die enger beieinander liegenden Spalte auf den Dias.

## Hinweise zur Auswertung

### zu 2b)

Erläutern Sie das sich ergebende Beugungsbild. Bestimmen Sie das Intensitätsverhältnis zwischen Hauptmaximum und erstem Nebenmaximum und vergleichen Sie es mit dem theoretisch erwarteten Verhältnis.

### zu 2c)

Überlegen Sie sich eine geeignete graphische Darstellung, um die experimentell ermittelte Abhängigkeit der Abstände  $\Delta x(b)$  zweier benachbarter Intensitätsmaxima von der Spaltbreite  $b$  direkt mit der theoretisch zu erwartenden Abhängigkeit vergleichen zu können.



- Wie muss man die Werte  $\Delta x(b)$  auftragen, damit sich eine Gerade ergibt?
- Welche aus den Werten  $\Delta x(b)$  und  $b$  gebildete Größe sollte als Funktion von  $b$  aufgetragen eine waagrechte Gerade ergeben?

### zu 2d)

Kommentieren Sie zum Vergleich der Beugungsbilder von Einzel- und Doppelspalt stichwortartig das Aussehen der Intensitätsverteilungen der beiden Zentralmaxima.

Überlegen Sie sich zu allen Diagrammen, mit welcher Genauigkeit die aufgetragenen Größen bestimmt wurden und zeichnen Sie entsprechende Fehlerbalken ein.

### zu 3a)

Ermitteln Sie die Mittelwerte  $\overline{\Delta x}(b)$  der Abstände zweier benachbarter Minima für jeden Spalt aus Aufgabe 2a) und 2b). Berechnen Sie daraus unter Verwendung der Spaltbreite  $b$  und der Brennweite  $f$  die Wellenlänge des Lasers.

**zu 3b)**

Bestimmen Sie zunächst den Messfehler für den Mittelwert  $\overline{\Delta x}(b)$  und ermitteln Sie dann in einer Fehlerfortpflanzungsrechnung eine Fehlerschranke für die zuvor berechnete Wellenlänge des Laserlichts.

---

# O 2c Interferometrie

---

## Aufgabenbeschreibung

In diesem Versuch sollen verschiedene Interferometer untersucht und messtechnisch ausgenutzt werden. Mittels eines Jamin-Interferometers soll man den Brechungsindex von Luft als Funktion des Druckes bestimmen. Mit einem Michelson-Interferometer wird der Kontrast einer Interferenzfigur ausgemessen.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. III, Kap. 3.1-3.4
2. Born: Optik, Kap. 3, § 40, 41
3. Kohlrausch: Praktische Physik I, Kap. 5.3.3.5
4. Demtröder: Experimentalphysik 2, Kap. 10.1, 10.2, 10.3

## Fragen zum Versuch

### Wellennatur des Lichts

1. Durch welche Modellvorstellung von Licht kann man Interferenzerscheinungen erklären?
2. Welche Vorstellung macht man sich von einer elektromagnetischen Welle?
3. Wie sind folgende Begriffe definiert:  
Amplitude, Intensität, Wellenlänge, Frequenz, Wellenvektor, Phase, Phasenverschiebung, Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit? Wie hängen diese Größen untereinander zusammen?
4. Wie misst man Intensität, Wellenlänge, Frequenz und Lichtgeschwindigkeit?

## Interferenz

1. Was ist Interferenz, was ist Beugung?
2. Was versteht man unter Zweistrahl-, was unter Vielstrahlinterferenz?
3. Nennen Sie einige Anwendungsbeispiele für beide Fälle?
4. Unter welchen Versuchsbedingungen erhält man stehende Interferenzbilder?
5. Was versteht man unter dem Begriff Kohärenz von Lichtwellen? Was sind örtliche und zeitliche Kohärenz?
6. Machen Sie sich die Interferenzerscheinungen an einer planparallelen und an einer keilförmigen Glasplatte klar!
7. Wie entstehen Newtonsche Ringe?

## Interferometer

1. Machen Sie sich den Aufbau und Funktionsweise folgender Interferometer klar:
  - a) Michelson-Interferometer
  - b) Jamin-Interferometer
  - c) Fabry-Perot-Interferometer
  - d) Mach-Zehnder-Interferometer
2. Wie kann man mit Hilfe des Jamin-Interferometers den Brechungsindex eines Gases bestimmen?
3. Kennen Sie weitere Anwendungen der unter Punkt 1 genannten Interferometer?
4. Wodurch ist das Auflösungsvermögen eines Interferometers gegeben?

## Versuchsdurchführung

### Bestimmung des Brechungsindex von Luft

1. Justieren Sie das Jamin-Interferometer so, dass die zwei Teilstrahlen durch je einen der beiden Behälter verlaufen.

2. Bestimmen Sie den Brechungsindex  $n$  von Luft in Abhängigkeit vom jeweiligen Druck.
3. Ermitteln Sie aus der obigen Messung den Brechungsindex von Luft für Normaldruck.

## Beobachtung von Interferenzerscheinungen

1. Justieren Sie das Michelson-Interferometer so, dass auf dem Schirm ein Streifensystem entsteht mit einem Streifenabstand von  $\Delta x \approx 2$  mm.
2. Beobachten Sie, wie empfindlich die Interferenzfigur auf mechanische Störungen reagiert, z. B. Druck auf die Grundplatte oder Luftwirbel.
3. Messen Sie die Intensitätsverteilung  $I(d_2)$  als Funktion von  $d_2$ , indem Sie  $d_2$  mittels des Piezoquarzes um mindestens  $5 \lambda/2$  verändern. Führen Sie die Messung für  $d_1 = d_2$  und  $d_1 = d_2 + 10$  cm durch und ermitteln Sie daraus den Kontrast. Der Kontrast nimmt schnell ab, da der Laser auf zwei Frequenzen oszilliert (warum?).
4. Bestimmen Sie die Empfindlichkeit des Piezoquarzes (nm/V).
5. Nehmen Sie die langbrennweitige Linse  $f_2$  heraus und beobachten Sie das konzentrische Ringsystem. Der Abstand zweier Ringe nimmt quadratisch ab.



## Hinweise zur Versuchsdurchführung

### Allgemeine Aspekte

Bei allen Interferometern wird eine möglichst ebene Lichtwelle in zwei Teilstrahlen  $E_1$ ,  $E_2$  gleicher Amplitude aufgespalten. Anschließend werden die Teilstrahlen, die gegeneinander um eine Zeitdifferenz  $\Delta t$  verzögert sind, wieder vereinigt. Da die Justierung der



verschiedenen Elemente des Interferometers nicht ideal ist, treffen die beiden Teilstrahlen unter einem kleinen Winkel  $2 \cdot \alpha$  auf dem Beobachtungsschirm auf. Die Interferenz der beiden Strahlen ergibt bei ebenen Wellen ein Streifensystem, bei Kugelwellen ein konzentrisches Ringsystem.

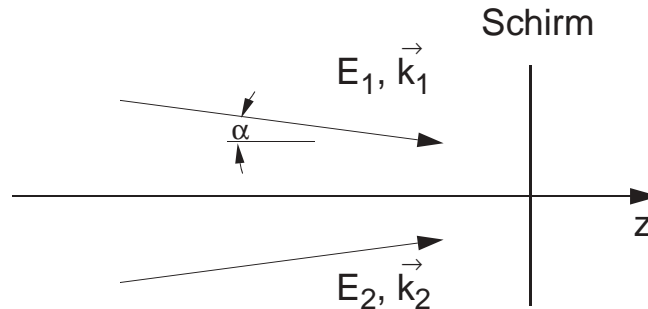


Abb. 1: Skizze zur Verdeutlichung der theoretischen Herleitung

Bei ebenen Wellen gilt für die Amplituden

$$E_{1,2}(\vec{r}, t) = E_0 \cdot e^{i\omega t_{1,2} - ik_{1,2}\vec{r}} \cdot e^{-t_{1,2}/\tau}$$

Es bedeuten:

$$\vec{k}_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda}(\pm \sin \alpha, 0, \cos \alpha) \cong \frac{2\pi}{\lambda}(\pm \alpha, 0, 1) = \text{Wellenvektor}$$

$$\vec{r} = (x, y, z) = \text{Ortsvektor}$$

$$\omega = \text{Frequenz}$$

Da die beiden Lichtwellen durch das Interferometer um die Zeit  $\Delta t$  gegeneinander verzögert wurden, gilt  $t_2 - t_1 = \Delta t$ . Es ist zweckmäßig, z.B.  $t_1 = 0$  zu setzen (Festlegung des Zeitnullpunktes).

Der Faktor  $e^{-t/\tau}$  berücksichtigt die endliche Länge aller Wellenzüge (auch beim Laser). Man bezeichnet  $\tau$  als die Kohärenzzeit. Die resultierende Amplitude ist die Summe der Einzelamplituden  $E_1 + E_2$  und die beobachtbare Intensität  $J$  ist proportional dem Betragsquadrat

$$J \sim |E_1 + E_2|^2$$

Das liefert

$$J = J_0 \cdot \left[ 1 - e^{-2\Delta t/\tau} + 2e^{-\Delta t/\tau} \cdot \cos \left( 2\alpha x \frac{2\pi}{\lambda} - \omega \Delta t \right) \right] \quad (1)$$

Es ergibt sich auf dem Schirm eine in x-Richtung periodische Intensitätsverteilung, ein Streifensystem. Bei fester Zeitverzögerung  $\Delta t$  beträgt der Abstand zweier Streifen

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

Für die maximale bzw. minimale Intensität folgt aus obiger Gleichung:

$$J_{max,min} = J_0 \left[ 1 + e^{-2\Delta t/\tau} \pm 2e^{-\Delta t/\tau} \right] \quad (2)$$

Man bezeichnet

$$K = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}} \quad (3)$$

als Kontrast der Interferenzfigur. Er ergibt sich aus Gl. (2), (3) zu

$$K = \frac{2e^{-\Delta t/\tau}}{1 + e^{-2\Delta t/\tau}} \quad (4)$$

Maximaler Kontrast tritt für  $\Delta t = 0$  auf, d. h. wenn beide Lichtstrahlen die gleichen Weglängen im Interferometer durchlaufen. Mit zunehmender Verzögerung gegeneinander wird der Kontrast schlechter und schließlich verschwindet die Interferenzfigur. Der Kontrast hängt wesentlich von der Kohärenzzeit  $\tau$  ab, einer charakteristischen Größe der benutzten Lichtquelle.

## Jamin-Interferometer

Abbildung 2 zeigt schematisch das Vakuumsystem zum Evakuieren der Behälter 1 und 2, die von den beiden Teilstrahlen des Lasers durchsetzt werden. Das Manometer zeigt die Druckdifferenz zwischen Behälter 2 und Außendruck an. Herrscht im Behälter 2 Atmosphärendruck, so zeigt das Manometer 0 Torr an. Ist der Behälter

weitgehend evakuiert, zeigt das Manometer Atmosphärendruck an. Sie sollten also vor Beginn der Aufgabe den Atmosphärendruck messen, um den Absolutdruck im Behälter 2 bestimmen zu können.

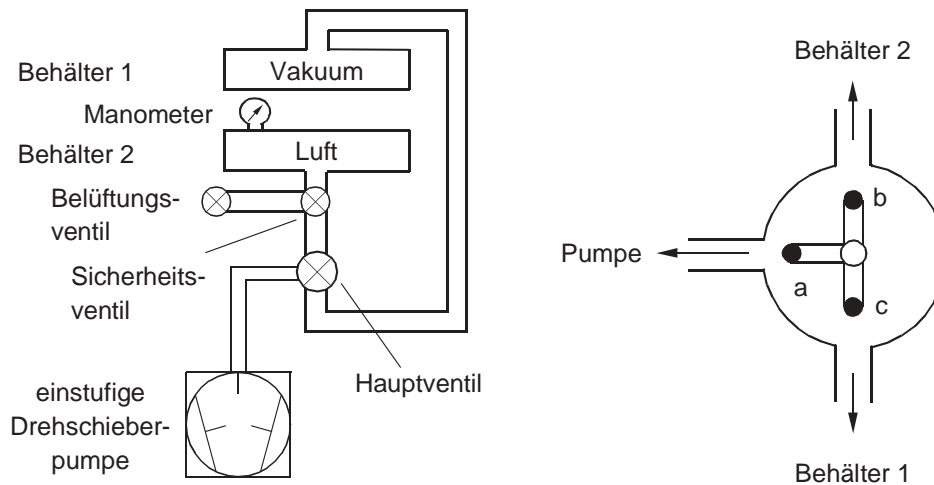


Abb. 2: Schematische Darstellung des Vakuumsystems

Das Hauptventil hat drei Einstellmöglichkeiten:

In Stellung a wird keiner der beiden Behälter ausgepumpt, da die Leitung von der Pumpe zu beiden Behältern gesperrt ist. In Stellung b ist die Verbindung zwischen Pumpe und Behälter 2 hergestellt. Behälter 1 wird nicht ausgepumpt. In Stellung c wird Behälter 1 ausgepumpt, Behälter 2 nicht.

Zunächst werden beide Behälter evakuiert. Während des Abpumpens justieren Sie das Interferometer folgendermaßen: Stellen Sie eine der beiden planparallelen Platten vor dem He-Ne-Laser auf und justieren Sie diese entsprechend Abbildung 3, allerdings vorerst noch ohne Zerstreungslinse.

Dabei müssen Sie darauf achten, dass die zwei Lichtstrahlen, die aus der Platte austreten, durch je einen Behälter hindurchtreten. Auf der anderen Seite der beiden Behälter stellen Sie die zweite Platte so, dass sie die zwei Teilstrahlen zu einem Strahl vereinigt. Nun weiten Sie den Laserstrahl mit Hilfe der beiliegenden Zerstreungslinse auf. Wenn Sie dies erreicht haben, bringen Sie das Hauptventil in Stel-

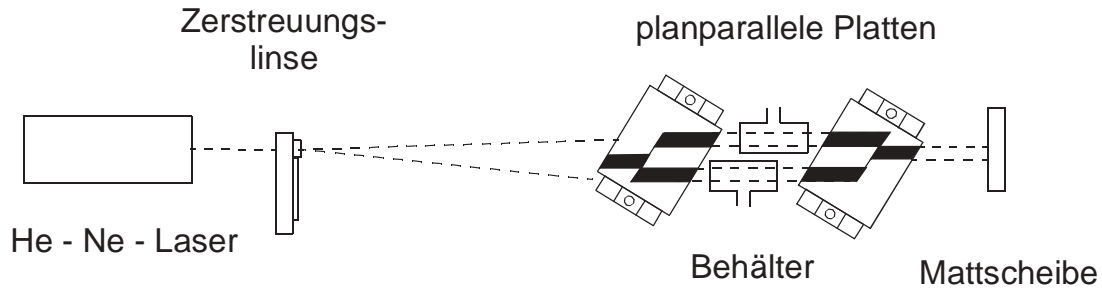


Abb. 3: Versuchsaufbau mit Jamin-Interferometer

lung c. Behälter 2 wird damit von der Pumpe abgetrennt, während Behälter 1 weiterhin evakuiert wird.

Durch vorsichtiges Öffnen des Belüftungsventils lassen Sie Luft in den Behälter 2 einströmen.

Messen Sie die Anzahl der verschobenen Streifen als Funktion des jeweiligen Druckes. Diese Verschiebung ist besonders gut auf der beiliegenden Mattscheibe mit Fadenkreuz zu beobachten.



Welche weiteren Größen müssen Sie messen, um  $n$  zu bestimmen?

Überlegen Sie sich, wie man aus den obigen Messungen den Brechungsindex von Luft bei Normaldruck bestimmen kann.

Zwischen den Glasplatten befinden sich zwei Behälter der Länge  $l$ . Der eine ist evakuiert, in dem anderen befindet sich ein Gas, dessen Brechungsindex  $n$  bestimmt werden soll. Strahl 1 durchdringt den evakuierten, Strahl 2 den gasgefüllten Behälter. Die Strahlen erleiden also einen Gangunterschied von  $\Delta S = l \cdot n - l = l \cdot (n - 1)$  und haben daher nach Austreten aus den Behältern eine Phasendifferenz  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta S = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l \cdot (n - 1)$ . Diese Phasendifferenz bewirkt eine Verschiebung der Interferenzstreifen gemäß:

$$\Delta m = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{l}{\lambda} \cdot (n - 1)$$

Der Brechungsindex eines Gases ist abhängig vom Gasdruck  $p$ . Bei konstanter Temperatur gilt

$$(n - 1) = k \cdot p$$

Aus den beiden Gleichungen folgt:

$$\Delta m = k \cdot \frac{l}{\lambda} \cdot p$$

Wenn Sie die Zahl  $\Delta m$  der durchlaufenden Interferenzstreifen als Funktion des Druckes  $p$  auftragen, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung  $k$ .

## Michelson-Interferometer

Abbildung 4 zeigt schematisch den Aufbau des Michelson-Interferometers. Justieren Sie zunächst das Interferometer ohne Linsen. Decken Sie jeweils einen Spiegel ab und justieren Sie den anderen derart, dass der Laserstrahl in sich zurückreflektiert wird. Wenn beide Spiegel richtig justiert sind, können Sie bereits auf dem Schirm ein undeutliches, stark fluktuierendes Interferenzmuster erkennen.

Jetzt setzen Sie die kurzbrennweitige Linse  $f_1$  in den Strahlengang und justieren diese. Anschließend verfahren Sie ebenso mit der langbrennweitigen Linse  $f_2$ . Beachten Sie, dass der Abstand der Linsen gleich der Summe der Brennweiten ist.

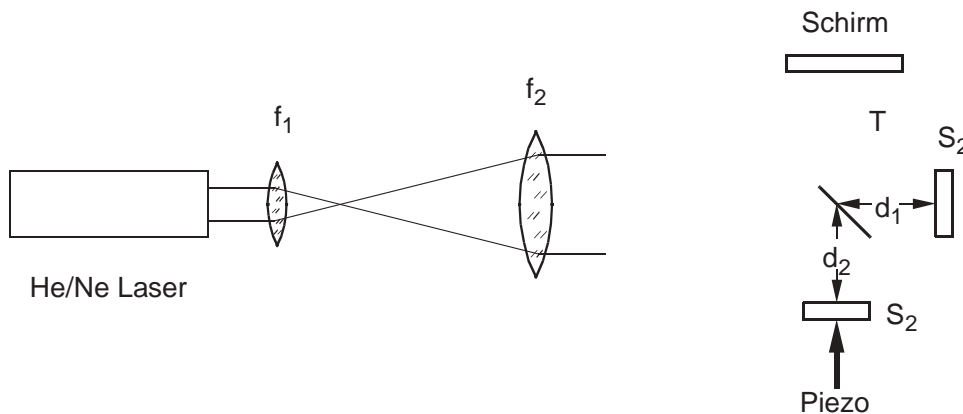


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Michelson-Interferometer

---

# M 1c Ultraschall

---

## Aufgabenbeschreibung

Mit einem Ultraschall-Geber werden in einer Flüssigkeit bzw. in verschiedenen Probekörpern Ultraschallwellen erzeugt und diese durch einen Ultraschallempfänger nachgewiesen. Dabei werden sowohl kontinuierliche Ultraschallwellen als auch Ultraschallimpulse verwendet. Im ersten Fall sollen durch geeignete gleichzeitige Darstellung von Geber- und Empfängersignal auf dem Zweistrahl-Oszilloskop deren Phasenbeziehung untersucht und Lissajousfiguren erzeugt werden. Im zweiten Fall sollen Laufzeitmessungen durchgeführt werden.

Nach der Laufzeitmethode soll die Schallgeschwindigkeit in Wasser und in sechs Probekörpern bestimmt werden. Zum Vergleich soll die Schallgeschwindigkeit in Wasser zusätzlich durch Abtasten des Schallwellenzuges bestimmt werden.

## Literatur

1. Bergmann-Schäfer: Bd. I, Kap. 9, Nr. 84
2. Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik, 16. Aufl., Kap. 4.5
3. Alonso-Finn II: Kap. 18.5
4. Westphal: Physik, 26. Aufl., § 96
5. Kutzner: Grundlagen der Ultraschallphysik, Kap. 9, 10
6. Demtröder: Experimentalphysik 1, Kap. 10.9–10.12

## Fragen zum Versuch

1. In welchem Frequenzbereich spricht man von Ultraschallwellen?
2. Auf welche Arten kann man Ultraschallwellen erzeugen?

3. Wie breiten sich Ultraschallwellen in homogenen Festkörpern aus?
4. Warum muss der Ultraschallgeber an einen Festkörper durch einen Flüssigkeitsfilm angekoppelt werden?
5. Was sind die Hauptanwendungsgebiete von Ultraschallwellen?
6. Warum werden hauptsächlich longitudinale Ultraschallwellen benutzt?
7. Wie kann man in einem Festkörper rein transversale Ultraschallwellen erzeugen?
8. Warum werden Ultraschallwellen in Festkörpern nicht oder nur wenig absorbiert?
9. Wie kommen Lissajousfiguren zustande?
10. Wie sieht die Spannung aus, welche am Oszilloskop die Zeitablenkung bewirkt?

## Versuchsdurchführung

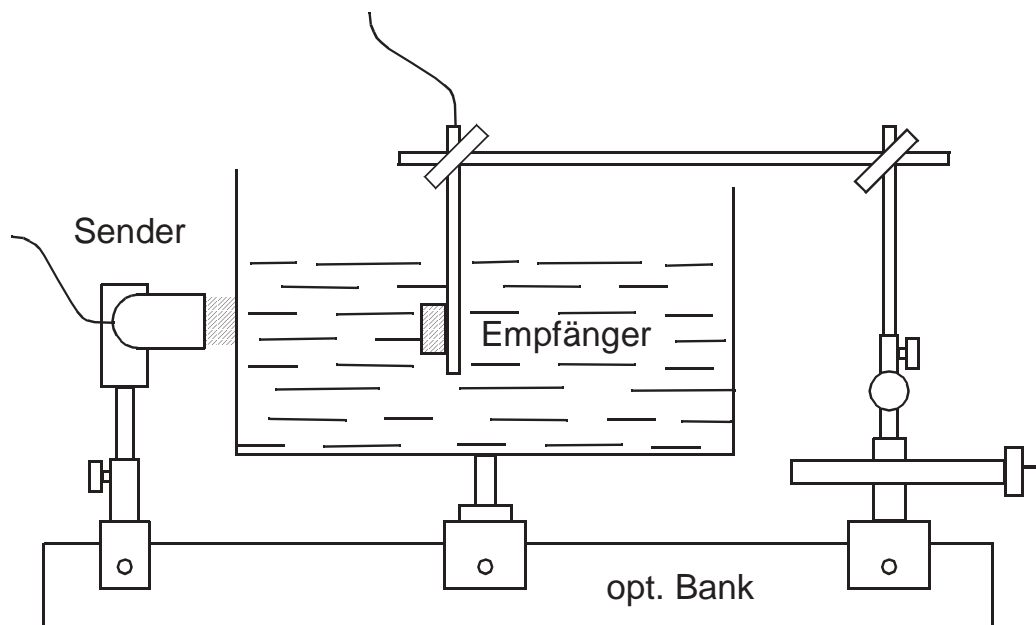


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

1. Tasten Sie mit dem Ultraschallaufnehmer die vom Schallgeber an das Wasserbad kontinuierlich abgestrahlte Schallwelle ab und beobachten Sie die Phasenbeziehung zwischen Sender- und Empfängersignal auf einem Zweistrahloszilloskop, wie beide relativ zueinander verschoben werden. Ermitteln Sie aus Wellenlänge und Frequenz die Schallgeschwindigkeit im Wasser. Überzeugen Sie sich bei der Bestimmung der Frequenz davon, dass die Zeitbasis des Oszilloskops kalibriert ist!



2. Erzeugen Sie mit der gleichen Versuchsanordnung auf dem Oszilloskop Lissajousfiguren, indem Sie das Gebersignal (SYNCHRON) auf die externe X-Ablenkung (Eingang Y1, Einstellung HOR.EXT und MONO) und das Empfängersignal auf die Y-Ablenkung (Eingang Y2) geben. Stellen Sie durch geeignete Wahl der Verstärkungsfaktoren am Oszilloskop sowie geeigneten Geber-/Empfänger-Abstand einen Kreis dar. Wie ist hierbei die Phasenlage von Geber- und Empfänger-Signal? Bestimmen Sie die Ultraschall-Wellenlänge in Wasser durch Reproduzieren identischer Lissajousfiguren bei Verschieben des Ultraschall-Detektors und bestimmen Sie daraus und aus der Frequenz die Schallgeschwindigkeit. Welche Lissajousfigur ist hierfür am besten geeignet?



3. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Wasser mit der Laufzeitmethode. Benutzen Sie Ultraschall-Pulse und stellen Sie Geber- und Empfänger-Signal synchron auf dem Zweistrahloszilloskop dar, indem auf das Geber-Signal getriggert wird. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit aus der zeitlichen Versetzung von Geber- und Empfänger-Signal bei Verschiebung des Empfängers um einen Betrag  $\Delta l$ . Überlegen Sie sich hierfür ein geeignetes Verfahren ( $\Delta t(\Delta l)$  oder  $\Delta l(\Delta t)$ ?) und ermitteln Sie mindestens 5 Wertepaare.





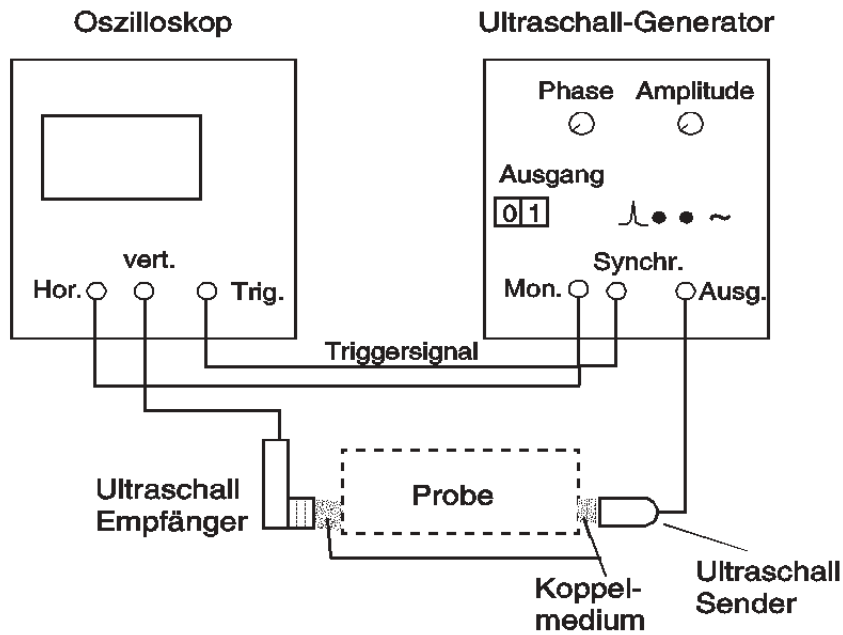


Abb. 2: Schaltung von Ultraschallgenerator, Sender, Empfänger und Oszilloskop

- Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in 6 Probekörpern nach der Methode 3. Berücksichtigen Sie hierbei die Versetzung der Signale, wenn Geber und Empfänger in direktem Kontakt sind.





<b>Versuch</b>	<b>Physikalische Fragestellung</b>	<b>Raum</b>	<b>Seite</b>
E 1c	Elektrolytischer Trog	379	4
E 2a	Kompensationsschaltungen	379	10
E 3a	Elektrische Schwingkreise	379	16
E 3b	Transformator	379	21
E 3c	Wechselstromkreise	379	35
E 5a	Elektromaschinen	379	41
O 1a	Linsensysteme	389, 390	45
O 1b	Prisma	364, 370	52
O 1d	Rotationsdispersion	377, 378	55
O 2d	Beugung am Spalt	374, 375	61
O 2c	Interferometrie	376, 380	70
M 1c	Ultraschall	379	78