



FH MÜNSTER  
University of Applied Sciences



FB Elektrotechnik und Informatik  
Department of Electrical Engineering  
and Computer Science

# Praktikum

## Grundgebiete der Elektrotechnik 2

Prof. Dr.-Ing. R. Nitzsche

Prof. Dr.-Ing. P. Richert

Prof. Dr.-Ing. F. Salewski

Version 09.02.2023

# Inhaltsverzeichnis

Übersicht: .....	4
1.1 Inhalte.....	6
1.2 Vorbereitung .....	6
1.3 Geräteliste .....	7
1.4 Messaufgaben .....	8
1.4.1 Kennlinie Glühlampe .....	8
1.4.2 Messungen mit dem Oszilloskop.....	8
1.4.3 Induktive Last .....	8
1.4.4 Bestimmung der Kenngrößen der Spule .....	9
1.4.5 Frequenzabhängigkeit und Leistung .....	9
1.4.6 Blindleistungskompensation .....	10
1.4.7 Variation der Induktivität .....	10
1.4.8 Variation der Frequenz.....	10
1.4.9 Zusatzaufgabe: Leistungsmessgerät.....	11
1.5 Ausarbeitung .....	11
1.6 Hilfestellungen.....	11
1.6.1 Messgeräte .....	11
1.6.2 Wechselspannungsquellen.....	15
1.6.3 Hilfsmittel Simulation .....	15
2. Reihenschwingkreis.....	16
2.1 Inhalte.....	16
2.2 Vorbereitung .....	16
2.3 Geräteliste .....	17
2.4 Messaufgaben .....	18
2.4.1 Eigenschaften der Spule .....	18
2.4.2 Eigenschaften des Kondensators.....	18
2.4.3 Eigenfrequenz eines Schwingkreises.....	19
2.4.4 Resonanzfrequenz eines Schwingkreises .....	19
2.4.5 Bandbreite und Blindwiderstände eines Schwingkreises.....	20
2.5 Ausarbeitung .....	20
2.6 Hilfestellungen.....	21
2.6.1 Reihenschwingkreis.....	21
2.6.2 Messung der vier Spannungen über gemeinsamen Bezugspunkt .....	21
3. Tiefpass.....	22
3.1 Inhalte.....	22

3.2 Vorbereitung.....	22
3.3 Geräteliste .....	23
3.4 Messaufgaben .....	24
3.4.1 RC-Tiefpass an sinusförmiger Wechselspannungsquelle .....	24
3.4.2 Auswirkung der Last auf RC-Tiefpass .....	25
3.4.3 RC-Tiefpass an rechteckförmiger Wechselspannungsquelle .....	25
3.4.4 Fourieranalyse RC-Tiefpass .....	25
3.4.5 LC-Tiefpass an sinusförmiger Wechselspannungsquelle.....	26
3.5 Ausarbeitung .....	26
3.6 Hilfestellungen.....	27
3.6.1 Tiefpass und Hochpass .....	27

# Übersicht:

Das Praktikum zum Modul Grundgebiete der Elektrotechnik 2 ergänzt die Vorlesungs- und Übungsinhalte durch vorwiegend praktische Tätigkeiten. Insbesondere lernen Sie die strukturierte Umsetzung grundlegender Messaufgaben in Wechselspannungsanwendungen. Dazu bauen Sie Schaltungen aus Wechselspannungsquellen und Wirkwiderständen, Kondensatoren und Spulen auf. Neben der eigentlichen Messung elektrischer Ströme und Spannungen spielen auch in diesem Praktikum Überlegungen zur Messgenauigkeit sowie die Dokumentation der Messergebnisse eine wichtige Rolle.

Das Praktikum verteilt sich auf folgende drei Praktikumstermine

- 1) Einführende Messungen in Wechselstromnetzwerken
  - Messung elektrischer Ströme und Spannungen sowie deren Phasenlage
  - Bestimmung von Wechselstromwiderständen
  - Leistung in Wechselstromnetzwerken
- 2) Reihenschwingkreis
  - Bestimmung der Eigenschaften von Spule und Kondensator
  - Bestimmung der Kenngrößen eines Reihenschwingkreises
- 3) Tiefpass
  - Messung der Filterwirkung verschiedener Tiefpässe
  - nicht-sinusförmige Spannungen in linearen Schaltungen
  - Grenzen von Messgeräten in Wechselstromanwendungen

Jeder Praktikumsversuch ist von allen Teilnehmern vorzubereiten und die Vorbereitungsfragen sind vor dem Beginn des Praktikums schriftlich zu beantworten. Erforderliche Informationen zur Vorbereitung erhalten Sie z.B. aus den Vorlesungsunterlagen sowie den Hilfestellungen zu den einzelnen Versuchen.

Bei allen Arbeiten im Labor ist die Laborordnung zu beachten. Diese liegt im Labor aus und ist zudem online verfügbar ([https://www.fh-muenster.de/eti/labore\\_forschung/st/index.php](https://www.fh-muenster.de/eti/labore_forschung/st/index.php) bzw. Link im ILIAS). Im Besonderen sind folgende Punkte zu beachten:

- Aufbauten dürfen nur nach Freigabe durch das Laborpersonal eingeschaltet werden.
- Änderungen an den Aufbauten dürfen nur im ausgeschalteten Zustand durchgeführt werden.
- Arbeiten erfolgen nur an Schutzkleinspannung ( $< 25\text{ V}$  Wechselspannung bzw.  $< 40\text{ V}$  Gleichspannung).
- Bauteile können im Betrieb heiß werden, entsprechende Bauteile (in diesem Praktikum in erster Linie Widerstände) daher nicht anfassen.

Zu jedem Versuch ist von jeder Praktikumsgruppe **ein Protokoll zu erstellen, welches eine eindeutige Reproduktion der Messungen ermöglichen muss**. Dies beinhaltet neben den Messungen die Auflistung aller verwendeten Messmittel (soweit diese in der Aufgabenstellung aufgelistet sind,

kann auf diese verwiesen werden). Weiterhin sind folgende allgemeinen Anforderungen an die Erstellung von Dokumenten zu beachten:

1. Das Protokoll ist auf dem Deckblatt mit folgenden Informationen zu versehen
  - a. Inhalt (Nummer des Versuchs)
  - b. Datum der Durchführung der Messungen
  - c. Bearbeitern (inkl. Matrikelnummer)
  - d. Version (wichtig, falls Nacharbeiten erforderlich sind)

Im Praktikum stellen wir Ihnen für jeden Versuch ein Deckblatt zur Verfügung.

2. Ein Protokoll sollte dokumentenecht erstellt werden (hier im Praktikum ist Bleistift auch zulässig, insbesondere für Grafiken. Eine Weitergabe eines solchen Protokolls sollte im späteren Berufsleben aber in dokumentenechter Form erfolgen (z.B. Einscannen, Kopieren).
3. Das Protokoll ist in einem Schnellhefter oder vergleichbaren Hefter anzulegen, um die Zuordnung der einzelnen Inhalte sicherzustellen. Hinter dem Deckblatt sind die Antworten auf die Vorbereitungsfragen sowie die Messungen mit den dazugehörigen Auswertungen mit eindeutiger Beschriftung und in chronologischer Reihenfolge abzuheften.

# 1. Einführende Messungen in Wechselstromnetzwerken

## 1.1 Inhalte

In diesem Praktikumsversuch lernen Sie das Messen von Spannungen und Strömen in Wechselstromnetzwerken mit Multimetern und dem Oszilloskop. Dabei wird auch die Messung der Phasen zwischen Spannung und Strom sowie die messtechnische Bestimmung der Kenngrößen von komplexen Widerständen am Beispiel einer Spule behandelt.

## 1.2 Vorbereitung

Die folgenden Fragen sind vor dem Termin der Versuchsdurchführung schriftlich zu beantworten, die Antworten zur Versuchsdurchführung mitzubringen und dem Protokoll beizuheften. Weiterhin sind die im Kapitel 1.4 zu jeder Teilaufgabe aufgeführten Vorbereitungen zu bearbeiten (z.B. Schaltungsskizzen), soweit dies ohne Versuchsaufbauten möglich ist.

1. Messung Wechselfspannung mit dem Multimeter: Was ist zu beachten?
2. Wie kann mit einem Oszilloskop ein Strom gemessen werden (2 Möglichkeiten)?
3. Was ist zu beachten, wenn mit einem Oszilloskop mehrere Spannungen gleichzeitig gemessen werden (z.B. mit allen 4 Kanälen)?
4. Welchen Phasenwinkel  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  hat ein idealer Kondensator, welchen ein realer?
5. Welchen Phasenwinkel  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  hat eine ideale Induktivität, welchen ein reale?
6. Wie lässt sich eine Induktivität berechnen, wenn Wirkwiderstand und Betrag der Impedanz einer Spule gegeben sind.
7. Wie kann man einen Phasenwinkel aus einem Oszilloskop-Bild bestimmen?
8. Was wird unter Blindleistungskompensation verstanden und wozu wird diese eingesetzt?
9. Berechnen Sie die erforderliche Kapazität um die Blindleistung einer Reihenschaltung aus einem Wirkwiderstand von  $10\ \Omega$  und einer Spule mit den Kenngrößen  $10\ \text{mH}$  und  $2\ \Omega$  an einer sinusförmigen Wechselspannungsquelle mit  $U_Q = 10\ \text{V}$  und  $f = 50\ \text{Hz}$  vollständig zu kompensieren.

Zu Beantwortung dieser Fragen können Sie die Vorlesungsunterlagen des ersten und aktuellen Semesters sowie die am Ende dieses Kapitel aufgeführten Hilfestellungen nutzen.

### 1.3 Geräteliste

Folgendes Material steht für diesen Versuch zur Verfügung

Anzahl	Gerät	Typ	Bemerkungen
1	Frequenzgenerator mit Verstärker als Wechselspannungsquelle	Toellner TOE7741	Bedienungsanleitung im ILIAS
4	Multimeter	Metraline DM62	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Oszilloskop 4-Kanal	Keysight DSOX4024A	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Messwiderstand 1 $\Omega$		
1	Strommesszange		Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Glühlampe	12 V, 10 W	Als ohmsche Last
1	Spule	600 Windungen, 2,5 $\Omega$ , 9 mH	
1	Kern für Spule		
1	Kapazitätsdekade		
2	Kondensator	50 $\mu\text{F}$	
diverse	Verbindungsleitungen		

*Tabelle 1.3-1: Geräteliste*

Datenblätter zu den Geräten finden Sie im ILIAS-Kurs zum Praktikum.

## 1.4 Messaufgaben

Alle Messungen in diesem Versuch erfolgen mit sinusförmiger Wechselspannung. Soweit keine weiteren Angaben gemacht werden sind die Versuche mit einer Frequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$  durchzuführen.

Tipp: Schalten Sie für alle Messungen ein Multimeter als Spannungsmessgerät direkt an die Ausgänge des Frequenzgenerators um dessen Ausgangsspannung zu dokumentieren, weiterhin kann ein Multimeter parallel zur Lampe sinnvoll sein.

### 1.4.1 Kennlinie Glühlampe

In diesem Versuch ist die Abhängigkeit des Stromes durch eine Glühlampe sowie und der in der Glühlampe umgesetzten Wirkleistung von der Betriebsspannung zu bestimmen.

Vorbereitung: Skizzieren Sie einen **Versuchsaufbau** um die Kennlinien des Wirkwiderstands  $R_{La}(U_{La})$  und der Wirkleistung  $P_{La}(U_{La})$  der Glühlampe zu bestimmen. Nutzen Sie in diesem Versuch ausschließlich die verfügbaren Multimeter als Messgeräte. Wenn Sie ein Amperemeter verwenden: Welchen **maximalen Strom** erwarten Sie?

Durchführung: Stimmen Sie Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab. Führen Sie im Anschluss die erforderlichen Messungen durch. Achtung: betreiben Sie die Glühlampe ausschließlich im Rahmen Ihrer Bemessungsgrößen!

Auswertung: Bestimmen Sie mit aus Ihren Messwerten die Kennlinien für den Wirkwiderstand  $R_{La}(U_{La})$  und die Wirkleistung  $P_{La}(U_{La})$  der Glühlampe in Abhängigkeit zur anliegenden Spannung. Stellen Sie diese Kennlinien in einem Koordinatensystem grafisch dar. Wie ist der Verlauf zu erklären?

### 1.4.2 Messungen mit dem Oszilloskop

Die Quellenspannung und der Strom durch die Glühlampe sollen gemeinsam auf dem Oszilloskop dargestellt werden.

Vorbereitung: Überlegen Sie sich, wie Sie den Strom mit dem Oszilloskop ohne Strommesszange messen können und skizzieren Sie eine **mögliche Schaltung**. Was ist dabei zu beachten?  
Müssen Sie die **Messeingänge am Oszilloskop auf AC oder DC** stellen?

Durchführung: Stimmen Sie Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab. Stellen Sie die Quellenspannung derart ein, dass  $U_{La} = 8 \text{ V}$  an der Glühlampe anliegen. Stellen Sie nun die Spannung  $U_{quelle}$  und den Strom  $I_{La}$  auf dem Oszilloskop dar und bestimmen Sie beide Effektivwerte durch Ablesen der Spitze-Spitze-Werte. Welchen Phasenwinkel können Sie erkennen?  
Sind die Effektivwerte von  $U_{La}$  und  $I_{La}$  abhängig von der Frequenz (variieren von 1 .. 100 Hz)?

Auswertung: Dokumentation von Versuchsaufbau und Messergebnissen.

### 1.4.3 Induktive Last

Im Aufbau nach 1.4.2 schalten Sie nun eine Luftspule (600 Windungen, Aufdruck  $2,5 \Omega$ ,  $9 \text{ mH}$ ) in Reihe zur Glühlampe. Stellen Sie die Frequenz wieder auf  $f = 50 \text{ Hz}$ . Es soll untersucht werden,



welcher zusätzliche Spannungsabfall und welcher Phasenwinkel zwischen Quellenspannung und dem Strom durch die Reihenschaltung durch diese Spule entsteht.

- Vorbereitung: Um wie viel ist die **Ausgangsspannung** der Wechselspannungsquelle anzuheben, damit wieder die Spannung nach 1.4.2 an der Glühlampe anliegt (gesucht ist eine Formel, für den Wert benötigen Sie dann ihre Messwerte)?  
Skizzieren Sie einen **Versuchsaufbau** um Ihre Berechnung messtechnisch zu überprüfen. Welche **Phasenverschiebung** erwarten Sie (Berechnung)?
- Durchführung: Schalten Sie die Luftspule gemäß Ihrer Skizze in Reihe zur Glühlampe und überprüfen Sie Ihr berechnetes Ergebnis. Der Messwiderstand verbleibt für alle Versuche in der Schaltung. Vergleichen Sie den berechneten Winkel mit dem am Oszilloskop dargestellten Winkel.
- Auswertung: Dokumentation von Versuchsaufbau, Rechen- und Messergebnissen.

#### 1.4.4 Bestimmung der Kenngrößen der Spule

Mit den verfügbaren Multimetern soll nun die Induktivität der Spule sowie der Wirkwiderstand der Spule bestimmt werden (Aufbau nach 1.4.3 beibehalten und ggf. Spule für Messungen aus Schaltung herausnehmen).

Wie verhalten sich die ermittelten Werte zu den aufgedruckten Werten? Vergleichen Sie den berechneten Winkel mit dem am Oszilloskop dargestellten Winkel.

- Vorbereitung: Wie kann der **Wirkwiderstand** der Spule ( = Reihenersatzwiderstand  $R_{Spule}$  ) bestimmt werden?  
Wie kann der **Blindwiderstand** und die **Induktivität** der Spule bestimmt werden?
- Durchführung: Stimmen Sie Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab. Führen Sie die geplanten Messungen durch und dokumentieren Sie diese. Führen Sie erforderliche Berechnungen durch.
- Auswertung: Dokumentation von Versuchsaufbau, Rechnungen und Messergebnissen.

#### 1.4.5 Frequenzabhängigkeit und Leistung

Es soll der Einfluss einer Änderung der Frequenz auf den Aufbau nach 1.4.3 in Analogie zur Messung in 1.4.2 untersucht werden.

Weiterhin ist zu bestimmen, welche Schein-, Wirk- und Blindleistung von der Schaltung nach 1.4.4 aufgenommen wird.).

- Vorbereitung: Wie können **Schein-, Wirk- und Blindleistung** auf Basis der bisherigen Messergebnisse bestimmt werden?
- Durchführung: Bestimmen Sie die aufgenommene Schein-, Wirk- und Blindleistung des Aufbaus ( $f = 50 \text{ Hz}$ ).  
Variieren Sie die Frequenz der Quelle von 10 bis 100 Hz (Quellenspannung konstant halten) und dokumentieren Sie die Auswirkungen auf die Spannung an der Lampe und den Phasenwinkel zwischen Strom und Quellenspannung.
- Auswertung: Stellen Sie den Phasenwinkel des Stromes (Bezug zur Quellenspannung) sowie die Effektivwerte von Lampenspannung und Strom als Funktion der Frequenz in einem Koordinatensystem grafisch dar.

#### 1.4.6 Blindleistungskompensation

Die von der Schaltung nach 1.4.5 aufgenommene Blindleistung soll vollständig kompensiert werden.

- Vorbereitung: Wie kann die für eine vollständige Kompensation erforderliche **Kapazität** aus den bisherigen Messergebnissen bestimmt werden?  
Welches Risiko entsteht grundsätzlich bei einer vollständigen Kompensation?
- Durchführung: Berechnen Sie die für eine vollständige Kompensation der Reihenschaltung aus Spule und Lampe erforderliche Kapazität und schalten Sie diese parallel zu dieser Reihenschaltung.  
  
Stimmen Sie diesen Aufbau mit dem Laborpersonal ab.  
  
Prüfen Sie die Kompensation am Oszilloskop.  
  
Messen Sie mit einer Stromzange die Beträge und näherungsweise die Phasen aller Ströme in der Schaltung und erläutern Sie diese.
- Auswertung: Dokumentieren Sie alle durchgeführten Messungen. Skizzieren Sie **ein** Zeigerdiagramm aller Spannungen ( $\underline{U}_{\text{Quelle}}, \underline{U}_{\text{Lampe}}, \underline{U}_{R_{\text{Mess}}}, \underline{U}_{\text{Spule}}, \underline{U}_L, \underline{U}_{R_{\text{Spule}}}$ ) und Ströme ( $\underline{I}_{\text{Quelle}}, \underline{I}_C, \underline{I}_{RL}$ ) auf Basis der mit dem Oszilloskop ermittelten Werte. Welchen Effekt hätte eine Veränderung der Quellenspannung (z.B. derart, dass ein Effektivwert von 9,5 V an der Glühlampe anliegt) auf die Kompensation?

#### 1.4.7 Variation der Induktivität

Die Induktivität lässt sich durch das Einführen eines Eisenkernes in die Spule erhöhen. Die Auswirkungen dieser Induktivitätserhöhung auf die Schaltung nach 1.4.6 sind zu untersuchen.

- Vorbereitung: Welchen Effekt erwarten Sie durch die Erhöhung der Induktivität auf die **Phasenverschiebung**, den **Gesamtstromes** und die **Helligkeit** der Lampe?
- Durchführung: Führen Sie den Kern langsam in die Spule ein und dokumentieren Sie den auf dem Oszilloskop sichtbaren Effekt. Bestimmen Sie die zur vollständigen Blindleistungskompensation erforderliche Kapazität für einen Aufbau in dem der Eisenkern vollständig in die Spule eingeschoben ist. Passen Sie die Spannung an der Glühlampe **nicht** auf 8 V an (soll „gedimmt“ bleiben).
- Auswertung: Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen.

#### 1.4.8 Variation der Frequenz

Welchen Einfluss hat eine Änderung der Frequenz auf den Aufbau nach 1.4.7 (kompensierte Schaltung)?

- Vorbereitung: keine
- Durchführung: Variieren Sie die Frequenz zwischen 10 und 100 Hz und messen Sie die Phasenverschiebung zwischen Quellenspannung und Strom sowie den Effektivwert der Spannung an der Glühlampe.
- Auswertung: Stellen Sie  $U_{La}(f)$  und  $\varphi(f)$  in einem Koordinatensystem grafisch dar.

#### 1.4.9 Zusatzaufgabe: Leistungsmessgerät

Bestimmen Sie mit einem Leistungsmessgerät die Schein-, Wirk- und Blindleistung die von der gesamten Schaltung aufgenommen wird (Schaltung nach 1.4.6 , kompensiert **und** nicht kompensiert).

### 1.5 Ausarbeitung

Erstellen Sie eine Dokumentation der von Ihnen durchgeführten Messungen und Auswertungen nach den genannten Vorgaben (siehe auch Kapitel Übersicht). Stellen Sie insbesondere sicher, dass Sie eindeutig dokumentieren welche Spannungen und Ströme an welcher Stelle mit welchem Messgerät gemessen wurden.

Fügen Sie dieser Ausarbeitung auf den ersten Seiten eine Beantwortung aller obigen Vorbereitungsfragen hinzu.

### 1.6 Hilfestellungen

Die Grundlagen der Praktika aus dem ersten Semester sind auch hier weiter gültig, im Zweifel also noch einmal ansehen. Im Folgenden wird ergänzend auf einige Besonderheiten in Wechselstromanwendungen eingegangen.

#### 1.6.1 Messgeräte

Nach den Messungen von Gleichgrößen im ersten Semester werden in diesem Semester Wechselgrößen gemessen. Wechselgrößen sind charakteristische Kenngrößen von Signalen, die sich periodisch ändern. Bei einer Wechselgröße interessiert man sich häufig nicht für einen einzelnen Momentanwert (z.B.:  $u(t)$  ), sondern für diejenigen Kenngrößen, die sich aus einer Periode ermitteln lassen (z.B.: Effektivwert  $U$  , Amplitude  $\hat{u}$  ). In diesem Fall eignen sich in der Regel Multimeter zum Messen der Wechselgrößen, mehr dazu finden Sie im Abschnitt 1.6.1.1.

Für den Fall, dass auch der zeitliche Verlauf einer Wechselgröße betrachtet werden soll, kann der Kurvenverlauf mit einem Oszilloskop dargestellt werden (siehe Abschnitt 1.6.1.2). Zudem bieten aktuelle Oszilloskope in der Regel auch alle Funktionen eines Multimeters (Anzeige von Effektivwerten etc.).

Wechselgrößen können reine Sinusschwingungen, aber auch beliebige andere Kurvenverläufe sein. Nicht-Sinusschwingungen lassen sich durch eine Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen darstellen (Fourier-Analyse). Die Amplituden der einzelnen Sinusschwingungen lassen sich auch messtechnisch bestimmen, mehr dazu finden Sie im Abschnitt 1.6.1.3.

Leitungsfarben: Wechselspannungsquellen haben zunächst keine Polarität. Trotzdem ist es hilfreich unterschiedliche Potentiale in der Schaltung voneinander farblich zu trennen (z.B. ein Pol der Wechselspannungsquelle rot zum anderen Pol der Quelle blau). Leitungen für bestimmte Aufgaben (z. B. Anschluss eines Kondensators zur Blindleistungskompensation, Anschluss eines Messgerätes) können zur Übersichtlichkeit in eigener Farbe ausgeführt werden. Anmerkung: bei Messungen in Mehrphasensystemen (umgangssprachlich „Drehstrom“) haben sich konkrete Farben für die einzelnen Leitungen (L1, L2, L3, N, PE) etabliert (mehr dazu später im Studium).

### 1.6.1.1 Multimeter

Heutige Multimeter digitalisieren Spannungswerte und stellen diese auf einer Anzeige dar (siehe auch Hilfestellungen aus GdE1). Für die Messung von Wechselgrößen gibt es prinzipiell zwei Vorgehensweisen:

- 1) **Analoge Signalverarbeitung:** Die Wechselgröße wird gleichgerichtet und mit einem Tiefpassfilter geglättet (siehe Abbildung 1.6.1.1). Die Ausgangsgröße entspricht weitgehend dem Mittelwert des zugeführten Signals. Typisch ist die im Bild angedeutete Restwelligkeit, die umso geringer ausfällt, je hochwertiger die Filterschaltung ausgeführt wird. Die analoge Ausgangsgröße wird mit einem Analog-Digital-Umsetzer für die weitere digitale Verarbeitung (in der Regel Berechnung des Effektivwertes) umgewandelt. Wichtig bei dieser Vorgehensweise ist, dass man die Kurvenform der gemessenen Größe kennt, um den Gleichrichtwert korrekt interpretieren zu können. Diese Vorgehensweise wird daher in der Regel nur für die Messung von Sinussignalen verwendet.

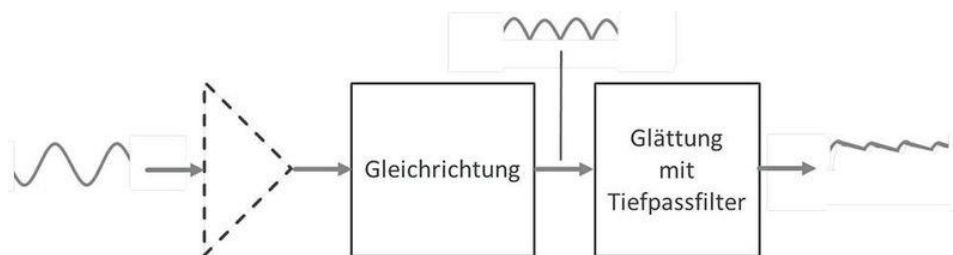


Abbildung 1.6.1.1

- 2) **Digitale Signalverarbeitung:** hier erfolgt keine Gleichrichtung, sondern es werden pro Periode in regelmäßigen Zeitabständen zahlreiche Momentanwerte einer Wechselgröße messtechnisch erfasst (Abtastung). Jeder Momentanwert wird mit einem Analog-Digital-Umsetzer digitalisiert und der Kurvenverlauf der Wechselgröße so erfasst. Bei ausreichend vielen Abtastungen pro Periode lassen sich so auch unbekannte Signalformen erfassen. Multimeter, die diese Vorgehensweise nutzen werden oft als *True RMS* bezeichnet (sprich: wahre Messung des Effektivwertes).

Häufig berücksichtigen Multimeter bei der Messung von Mischgrößen einen eventuell vorhandenen **Gleichanteil** nicht. Höherwertige Messgeräte haben dagegen zwei Messbereiche: reine Wechselgröße (ohne Gleichanteil) und Mischgröße (Wechselgröße + Gleichanteil).

Weiterhin hat die **Frequenz der Messgröße** einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Messergebnisses. Bei der analogen Signalverarbeitung ist beispielsweise die Glättung frequenzabhängig, bei der digitalen Signalverarbeitung benötigt man bei einem hochfrequenten Signal erheblich mehr Abtastungen pro Zeiteinheit um die gleiche Anzahl von Messpunkten pro Periode zu erhalten wie bei einem niederfrequenten Signal.

Bei der Messung von Wechselgrößen wird daher stets ein Blick in das Datenblatt/die Anleitung der genutzten Messgeräte empfohlen um zu überprüfen, ob das Messgerät für die erwarteten Messsignale geeignet ist!

### 1.6.1.2 Oszilloskope

Oszilloskope können für eine oder mehrere elektrische Spannungen deren zeitlichen Verlauf auf einem Bildschirm sichtbar machen. Bei Anzeige mehrerer Spannungen sind so auch Beziehungen zwischen diesen Messgrößen (z.B. Phasenverschiebung) darstellbar. Das Oszilloskop stellt einen Verlaufsgraphen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem dar, wobei üblicherweise die horizontale Achse die Zeitachse ist und die vertikale Achse die Spannungsachse. Das so entstehende Bild wird als Oszillogramm bezeichnet.

Wie bei Multimetern waren auch Oszilloskope zunächst rein analoge Messgeräte. Aktuelle Geräte sind in der Regel digital, tasten also die Messgröße sehr häufig ab, digitalisieren den gemessenen Wert und stellen diesen auf dem Bildschirm dar. Wie häufig ein Oszilloskop abtastet bestimmt wie genau ein Signal mit einer bestimmten Frequenz dargestellt werden kann, hinzu kommt die interne „Rechenleistung“ des Gerätes. Die Häufigkeit der Abtastung (in samples/s) und die max. Frequenz einer Messgröße (in MHz) hängt vom Typ des Gerätes ab (in der Regel auf der Front aufgedruckt, sonst hilft ein Blick ins Datenblatt).

Oszilloskope verfügen über sehr viele Einstellmöglichkeiten, die Anwender zunächst abschrecken können. Hersteller bemühen sich jedoch zunehmend die Bedienkonzepte intuitiver zu gestalten und Basisfunktionen von Spezialeinstellungen geeignet abzugrenzen. Wesentliche Punkte zum Arbeiten mit einem Oszilloskop beinhalten:

- **Auswahl** der anzuzeigenden **Kanäle** (meist eine Taste über dem Messleitungsanschluss)
- **Vertikale Einstellung** für jeden Kanal: Skalierung der vertikalen Achse kann so optimal an die Amplituden der jeweiligen Messgrößen angepasst werden. Zudem kann jede Kurve in vertikaler Richtung verschoben werden, z.B. um mehrere Kurvenverläufe übereinander zu platzieren. Bedienung: Meist je ein Drehknopf für Skalierung und Position über dem Messleitungsanschluss, z.T. je ein Knopf für alle Kanäle mit Auswahl-tasten.
- **Horizontale Einstellung** für alle Kanäle gemeinsam: Skalierung der horizontalen Achse kann so optimal an den Zeitverlauf der Messgrößen angepasst werden (meist ein Drehknopf mit der Bezeichnung *Time/Dev* oder *Horizontal*)
- **Trigger**: Damit die Kurvenverläufe nicht über den Bildschirm flimmern, sondern ein stehendes Bild ergeben, kann der Benutzer für einen Kanal eine Schwelle (Triggerpegel) angeben. Überschreitet der Messwert diese Schwelle, beginnt die Darstellung auf dem Bildschirm. Bei periodischen Signalen führt dies zu einem stehenden Bild. Bedienung: die Auswahl des Kanals erfolgt in der Regel über Tasten, die Schwelle wird meist über einen Drehregler eingestellt.
- **Messfunktionen**: Aus den Kurvenverläufen lassen sich Kenngrößen wie Effektivwerte, Phasenverschiebungen etc. bestimmen. Viele Oszilloskope können diese Kenngrößen direkt bestimmen und anzeigen. Bedienung: Meist kann über einen Menüpunkt *Measure* die anzuzeigende Kenngröße sowie die relevanten Kanäle ausgewählt werden.
- **Berechnungen**: Viele Oszilloskope bieten die Möglichkeit Berechnungen mit den Signalverläufen vorzunehmen. Eine sehr nützliche Funktion ist dabei die Subtraktion eines Kurvenverlaufes von einem anderen (siehe dazu auch *Gemeinsames Bezugspotential aller Kanäle* weiter unten). Bedienung: In der Regel über eine Taste (Beschriftung z.B. *Math*), die ein entsprechende Menü öffnet.
- **Tastkopfeinstellungen**: Erlauben einen Spannungsteiler im Tastkopf zu berücksichtigen sowie einen Eingangsfilter zum Abblocken von Gleichanteilen (Einstellung AC) vorzuschalten.  
**Achtung**: Der Eingangsfilter hat Auswirkungen auf den Frequenzgang → Im Praktikum stets Einstellung DC verwenden.

Zur grundlegenden Bedienung ist zudem eine Kurzanleitung für das im Praktikum verwendete Oszilloskop verfügbar. Tipp: Die Taste „Default Setup“ setzt die meisten Einstellungen auf Grundeinstellungen (nicht die Tastkopfeinstellungen)

Bei mehrkanaligen Oszilloskopen ist zu beachten, dass **alle Messeingänge ein gemeinsames Bezugspotential** haben. In einer Schaltung können zwar mehrere Spannungen gemessen werden, jedoch müssen bei direkter Messung alle Messeingänge den gleichen Bezugspunkt haben<sup>1</sup>. Sollen beispielsweise die drei Spannungen aus Abbildung 1.6.1.2 mit einem Oszilloskop dargestellt werden, so ist dies mit direkter Messung zunächst nicht möglich (egal wo der Bezugspunkt gewählt wird, er gilt stets nur für zwei der drei Spannungen). Eine Darstellung ist aber beispielsweise durch die Messung der Größen  $U$  und  $U_C$  möglich (gemeinsamer Bezugspunkt unten), die Größe  $U_{SP}$  wird dann durch Berechnung  $U_{SP} = U - U_C$  auf dem Oszilloskop dargestellt.

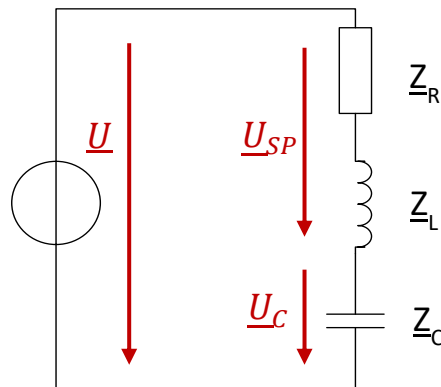


Abbildung 1.6.1.2

**Messung von Strömen:** Oszilloskope erfassen lediglich Spannungen, um Ströme zu messen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- Wie bei der Gleichspannungstechnik kann auch hier ein Strom über einen **Spannungsabfall an einem Messwiderstand** gemessen werden. Dazu stehen im Labor Messwiderstände zur Verfügung.
- Alternativ kann eine **Strommesszange** genutzt werden. Diese Messzange misst das vom Strom erzeugte Magnetfeld, welches proportional zum Strom durch die Zange ist. Ausgegeben wird eine zum gemessenen Strom proportionale Spannung, die auf dem Oszilloskop dargestellt werden kann. Ein paar Tipps zur Anwendung:
  - a. Die Messzange hat oft einen DC-Offset, d.h. auch ohne Stromfluss durch die Zange wird eine Spannung ungleich Null angezeigt. Dieser ist vor der Messung auf Null zu regeln (bei der im Praktikum verwendeten Messzange mit dem großen Drehregler).
  - b. Der Stromwert kann am Oszilloskop direkt in Ampere angezeigt werden, dafür ist die Einheit für den verwendeten Kanal anzupassen. Alternativ kann über die abgelesene Spannung und dem auf der Messzange aufgedruckten Umrechnungsfaktor der Stromwert bestimmt werden.
  - c. Bei kleinen Strömen kann es hilfreich sein die Mittelwertbildung des Oszilloskops zu nutzen (Bei kleinen Signalpegeln fällt das Rauschen sonst stärker ins Gewicht und die Messkurve wird verschwommen)

<sup>1</sup> Es ist sinnvoll nur für einen der Kanäle die Masseleitung anzuschließen um Störungen durch Masseschleifen zu vermeiden

- d. Die Phasenlage des ausgegebenen Spannungssignals gegenüber dem gemessenen Stromsignal ist frequenzabhängig! Dazu bitte die Bedienungsanleitung der Strommesszange beachten! Mit dem im Labor verfügbaren Equipment ist für genaue Messungen (Amplitude, Phase) die **Strommessung über einen Messwiderstand zu bevorzugen!**
- e. Nach den Messungen die Strommesszange ausschalten, da sich sonst der Akku im Gerät unnötig entlädt.

#### 1.6.1.3 Frequenzanalyse

Um die Amplituden der in einem Signal enthaltenen Frequenzanteile messtechnisch zu bestimmen gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- 1) Spektrumsanalysatoren sind auf die Frequenzanalyse spezialisierte Messgeräte, eingesetzt werden verschiedene Messmethoden (nur zur Info):
  - a. FFT-Analysatoren, basierend direkt auf der Schnellen Fourier-Transformation (englisch Fast Fourier Transform, abgekürzt FFT)
  - b. Analysatoren mit einem über die gesamte Bandbreite abstimmbaren Bandpassfilter
  - c. Heterodynprinzip mit eingebauten Messempfängern, Mischstufen und Zwischenfrequenzstufen
- 2) Aktuelle Oszilloskope verfügen häufig über die Funktion auf Basis der aufgenommenen Kurvenverläufe eine Fourier-Analyse (FFT, s.o.) durchzuführen, also die Amplituden der Frequenzanteile zu berechnen. Diese Funktion wird in einem späteren Versuch genutzt.

#### 1.6.2 Wechselspannungsquellen

Wechselspannungen werden beispielsweise durch rotierende Generatoren (in der Regel Synchronmaschinen), Sensoren (z.B. Mikrofon) oder das Schalten von Gleichspannungen (z.B. Wechselrichter) erzeugt. Um diese Signale nachzubilden können Funktionsgeneratoren genutzt werden. Dabei stehen in der Regel unterschiedliche Kurvenformen (meist zumindest Sinus, Dreieck, und Rechteck) zur Verfügung, deren Frequenz und Amplitude eingestellt werden kann. Die in diesem Praktikum verwendeten Funktionsgeneratoren verfügen zudem über eingebaute Verstärker, die einen Einsatz der Funktionsgeneratoren als Wechselspannungsquellen für unsere Versuche ermöglichen.

#### 1.6.3 Hilfsmittel Simulation

Simulationsprogramme können genutzt werden um eigene Experimente zu Hause am Rechner durchzuführen. Eine Möglichkeit bietet hier z.B. die kostenlose Software LT-Spice (siehe auch Praktikum GdE1).

## 2. Reihenschwingkreis

### 2.1 Inhalte

In diesem Praktikumsversuch wenden Sie die Messmethoden aus dem ersten Praktikumsversuch auf einen Reihenschwingkreis an. Zudem werden noch einmal die Eigenschaften realer Spulen und Kondensatoren betrachtet.

### 2.2 Vorbereitung

Die folgenden Fragen sind *vor* dem Termin der Versuchsdurchführung schriftlich zu beantworten, die Antworten zur Versuchsdurchführung mitzubringen und dem Protokoll beizuheften. Weiterhin sind die im Kapitel 2.4 zu jeder Teilaufgabe aufgeführten Vorbereitungen zu bearbeiten (z.B. Schaltungsskizzen), soweit dies ohne Versuchsaufbauten möglich ist.

1. Wie kann die Eigenfrequenz eines Schwingkreises messtechnisch bestimmt werden?
2. Wie kann die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises messtechnisch bestimmt werden?
3. Treten die Maxima der gemessenen Größen (Spannungen im Reihenschwingkreis, Ströme im Parallelschwingkreis) an  $R$ ,  $L$  und  $C$  bei den gleichen Frequenzen auf?
4. Wann ist die Eigenfrequenz eines Schwingkreises gleich der Resonanzfrequenz des Schwingkreises?
5. Leiten Sie aus den Gleichungen der Blindwiderstände für die beiden  $45^\circ$ -Frequenzen des Reihenschwingkreises die Gleichungen zur Berechnung der Induktivität und der Kapazität her (siehe auch Hilfestellungen).

Zu Beantwortung dieser Fragen können Sie die Vorlesungsunterlagen des ersten und aktuellen Semesters sowie die am Ende der Kapitel aufgeführten Hilfestellungen nutzen.



## 2.3 Geräteliste

Folgendes Material steht für diesen Versuch zur Verfügung

Anzahl	Gerät	Typ	Bemerkungen
1	Frequenzgenerator mit Verstärker als Wechselspannungsquelle	Toellner TOE7741	Bedienungsanleitung im ILIAS
4	Multimeter	Metraline DM62	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Oszilloskop 4-Kanal	Keysight DSOX4024A	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Messwiderstand 1 $\Omega$		
1	Widerstand 22 $\Omega$	25 WX	
1	Spule	600 Windungen, 2,5 $\Omega$ , 9 mH	
1	Kapazitätsdekade		Untersucht wird der 4 $\mu$ F-Kondensator
diverse	Verbindungsleitungen		

*Tabelle 2.3-1: Geräteliste*

Datenblätter zu den Geräten finden Sie im ILIAS-Kurs zum Praktikum.

## 2.4 Messaufgaben

In den folgenden Versuchen wird mit Wechselspannungen **unterschiedlicher Frequenz und Kurvenform** gearbeitet. Achten Sie daher immer genau auf die Aufgabenstellung.

Bei den gesuchten Phasenwinkeln ist die Quellenspannung jeweils als Bezug zu wählen.

### 2.4.1 Eigenschaften der Spule

In diesem Versuch ist die Induktivität  $L$  der Spule sowie der Reihenersatzwiderstand  $R_R$  der Spule aus den Kurvenverläufen von Spannung und Strom zu bestimmen. Dazu soll die Spule an einer sinusförmigen Wechselspannungsgröße mit  $U_{LSS} = 30\text{ V}$  und  $f = 1,1\text{ kHz}$  betrieben werden.

Vorbereitung: Wie lassen sich Spannung  $u_L(t)$  und Strom  $i_L(t)$  der Spule auf dem Oszilloskop darstellen? Beachten Sie dabei den gemeinsamen Bezugspunkt aller Kanäle des Oszilloskops. Wie lassen sich  $L$  und  $R_R$  aus den dargestellten Größen bestimmen?

Durchführung: Stimmen Sie Ihren Versuchsaufbau und Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab bevor Sie die Schaltung einschalten. Stellen Sie die beiden gesuchten Größen auf dem Oszilloskop dar und ermitteln Sie daraus  $U_L$ ,  $I_L$  und  $\varphi_L$ .

Auswertung: Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen. Wie würden sich die ermittelten Größen bei einer Verdopplung der Frequenz ändern? Tragen Sie die geschätzten Werte in das Messprotokoll ein.

Berechnen Sie die Induktivität  $L$  und den Reihenersatzwiderstand  $R_R$  aus Ihren in der Durchführung ermittelten Werten.

### 2.4.2 Eigenschaften des Kondensators

In diesem Versuch ist die Kapazität  $C$  des Kondensators ( $4\text{ }\mu\text{F}$ ) sowie dessen Reihenersatzwiderstand  $R_R$  und Parallelersatzwiderstand  $R_P$  aus den Kurvenverläufen von Spannung und Strom zu bestimmen. Dazu soll der Kondensator an einer sinusförmigen Wechselspannungsgröße mit  $U_{CSS} = 30\text{ V}$  und  $f = 1,1\text{ kHz}$  betrieben werden.

Vorbereitung: Wie lassen sich Spannung  $u_C(t)$  und Strom  $i_C(t)$  des Kondensators auf dem Oszilloskop darstellen? Beachten Sie dabei den gemeinsamen Bezugspunkt aller Kanäle des Oszilloskops. Wie lassen sich  **$C$ ,  $R_R$  und  $R_P$  aus den dargestellten Größen bestimmen?**

Durchführung: Stimmen Sie Ihren Versuchsaufbau und Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab bevor Sie die Schaltung einschalten. Stellen Sie die beiden gesuchten Größen auf dem Oszilloskop dar und ermitteln Sie daraus  $U_C$ ,  $I_C$  und  $\varphi_C$ .

Auswertung: Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen. Wie würden sich die ermittelten Größen bei einer Verdopplung der Frequenz ändern? Tragen Sie die geschätzten Werte in das Messprotokoll ein.

Berechnen Sie die Kapazität  $C$ , den Reihenersatzwiderstand  $R_R$  und den Parallelersatzwiderstand  $R_P$  aus Ihren in der Durchführung ermittelten Werten (In diesem Fall geht es darum den Wirkanteil eines realen Kondensators durch

EINEN Wirkwiderstand darzustellen. Dies kann durch einen Reihen- ODER einen Parallelwiderstand erfolgen.).

Ist eine Vernachlässigung des ohmschen Anteils für die betrachtete Schaltung zulässig?

Hinweis: schon kleine Messfehler in der Phasenverschiebung können zu negativen Werten für  $R_R$  führen. Falls dies der Fall sein sollte verwenden Sie im weiteren einen Ersatzwert von  $R_R = 1 \Omega$ .

### 2.4.3 Eigenfrequenz eines Schwingkreises

In den folgenden Versuchen wird folgender Schwingkreis betrachtet: Reihenschwingkreis aus den Elementen  $R = 22 \Omega$ ,  $L$  aus Versuch 2.4.1,  $C$  aus Versuch 2.4.2 und einem Messwiderstand von  $1 \Omega$ . Die Eigenfrequenz dieses Schwingkreises soll bei Anregung mit einer rechteckförmigen Spannung mit  $U_{qss} = 30 \text{ V}$  und  $f = 100 \text{ Hz}$  mit dem Oszilloskop gemessen werden.

- Vorbereitung: Skizzieren Sie den **Schwingkreis inkl. der Spannungspfeile** für  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  und  $U_{Mess}$ . Wie kann die Eigenfrequenz eines Schwingkreises durch Anregung mit einer Rechteckspannung bestimmt werden?
- Durchführung: Stimmen Sie Ihren Versuchsaufbau und Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab bevor Sie die Schaltung einschalten. Bestimmen Sie die Eigenfrequenz.
- Auswertung: Dokumentieren Sie durchgeführte Messungen und Berechnungen.

### 2.4.4 Resonanzfrequenz eines Schwingkreises

Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises soll ermittelt werden. Dazu wird an den Reihenschwingkreis eine Sinusspannung mit  $U_{qss} = 20 \text{ V}$  gelegt. Die Bestimmung der Resonanzfrequenz soll zum einen durch Minimierung der Phasenverschiebung zwischen Quellenspannung und Strom durch den Reihenschwingkreis erfolgen. Zum anderen soll die Frequenz ermittelt werden, bei der die Summenspannung über Spule und Kondensator minimal wird.

- Vorbereitung: Skizzieren Sie die **Schaltung** inkl. aller mit dem Oszilloskop zu messenden Spannungen. Wie realisieren Sie die Strommessung? Beachten Sie beim Aufbau weiterhin den gemeinsamen Bezugspunkt aller Kanäle des Oszilloskops. Als gemeinsamer Bezugspunkt wird ein Anschluss der Quelle empfohlen und ein Aufbau in der Reihenfolge  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R_{Mess}$ , *Bezugspunkt*.
- Bestimmen Sie **für jeden Wirkwiderstand** in diesem Versuch die in ihm umgesetzte **max. Verlustleistung**. Hinweis: bereits ab  $2 \text{ W}$  Verlustleistung können die eingesetzten Wirkwiderstände (Bauteile) heiß werden!
- Durchführung: Stimmen Sie Ihren Versuchsaufbau und Ihr Vorgehen mit dem Laborpersonal ab bevor Sie die Schaltung einschalten. Bestimmen Sie die Resonanzfrequenz auf die zwei beschriebenen Arten. Messen Sie mit dem Oszilloskop alle vier Spannungen (Spitze-Spitze-Werte). Tipp: Das Oszilloskop kann direkt Differenzen von Spannungen darstellen.

Auswertung: Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen.

Berechnen Sie den Wirkwiderstand  $R_{SK}$  des Schwingkreises aus den Messwerten der Eigenfrequenz, der Resonanzfrequenz und dem berechneten Wert der Induktivität. Bestimmen Sie zudem den Reihenersatzwiderstand  $R_R$  der Spule aus den Messwerten bei Resonanz.

### 2.4.5 Bandbreite und Blindwiderstände eines Schwingkreises

Die Bandbreite und die Blindwiderstände sollen auf Basis von Messwerten bestimmt werden.

Vorbereitung: Wie kann die Bandbreite mit Hilfe der beiden Eckfrequenzen  $f_{+45^\circ}$  und  $f_{-45^\circ}$  bestimmt werden?

Durchführung: Bestimmen Sie messtechnisch die beiden Eckfrequenzen und dokumentieren Sie jeweils alle vier Spannungen. (Tipp: gleiche Tabelle wie in 2.4.4 nutzen). Welche Messwerte müssten theoretisch identisch sein?  
Hinweis: Die Phase zwischen Quellenspannung und Strom kann grob anhand der Kurvenverläufe auf  $+45^\circ$  bzw.  $-45^\circ$  eingestellt. Genauer erfolgt die Einstellung durch Auswahl einer Messfunktion für die Phase.

Auswertung: Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen.

Berechnen Sie **aus den Messwerten für die beiden Eckfrequenzen**

1. die Bandbreite  $b_f$ ,
2. den Betrag  $Z$  des komplexen Scheinwiderstandes  $\underline{Z}$ ,
3. dessen Gesamtblindwiderstand  $X_B$ ,
4. die Einzelblindwiderstände  $X_C$  und  $X_L$ ,
5. die Kapazität  $C$  und die Induktivität  $L$ .

Welche Werte müssen theoretisch gleich sein?

Vergleichen Sie die Ergebnisse für die Kapazität und die Induktivität mit den Sollwerten und den in vorherigen Versuchen ermittelten Werten.

Konstruieren Sie ein Zeigerdiagramm aller Spannungen ( $U_q, U_{Spule}, U_L, U_{Cu}$  (Reihenersatzwiderstand der Spule),  $U_R, U_{RMESS}, U_C$ ) aus den Messwerten zur oberen Eckfrequenz  $f_{+45^\circ}$ .

## 2.5 Ausarbeitung

Erstellen Sie eine Dokumentation der von Ihnen durchgeführten Messungen und Auswertungen nach den genannten Vorgaben.

Fügen Sie dieser Ausarbeitung auf den ersten Seiten eine Beantwortung aller obigen Vorbereitungsfragen hinzu.

## 2.6 Hilfestellungen

### 2.6.1 Reihenschwingkreis

Für den komplexen Scheinwiderstand des elementaren<sup>2</sup> Reihenschwingkreises gilt:

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Z \cdot e^{j\varphi}$$

Er ist eine Funktion der Kreisfrequenz  $\omega$ . Die graphische Darstellung des komplexen Scheinwiderstandes in der komplexen Ebene nennt man seine Ortskurve, aus der sehr übersichtlich Betrag  $Z$  und Phase  $\varphi$  als Funktion der Kreisfrequenz hervorgehen. Diese Ortskurve ist eine Parallele zur imaginären Achse im Abstand  $R$ .

Im Schnittpunkt mit der reellen Achse sind der induktive und der kapazitive Blindwiderstand gleich groß, für den komplexen Scheinwiderstand gilt  $\underline{Z} = Z = R$ . Die Spannung  $U$  und der Strom  $I$  des Reihenschwingkreises sind in Phase. Die zugehörige Kreisfrequenz wird als Kompensationskreisfrequenz bezeichnet und entspricht im elementaren Reihenschwingkreis der Resonanzkreisfrequenz  $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Diejenigen Kreisfrequenzen, bei denen der komplexe Scheinwiderstand einen Winkel von  $+45^\circ$  bzw.  $-45^\circ$  zur reellen Achse einnimmt, nennt man die  $45^\circ$ -Frequenzen oder Eckfrequenzen. Der Betrag der zugehörigen Blindwiderstände ist dann jeweils gleich dem Wert des ohmschen Widerstandes  $R$ .

$$X_{+45^\circ} = \omega_{+45^\circ} L - \frac{1}{\omega_{+45^\circ} C} = R$$
$$X_{-45^\circ} = \omega_{-45^\circ} L - \frac{1}{\omega_{-45^\circ} C} = -R$$

Mit diesen beiden Gleichungen (Herleitung in der Vorbereitung durchführen) lassen sich die Kapazität und die Induktivität berechnen:

$$C = \frac{f_{+45^\circ} - f_{-45^\circ}}{2\pi f_{+45^\circ} f_{-45^\circ} X_{+45^\circ}}, \quad L = \frac{X_{+45^\circ}}{2\pi(f_{+45^\circ} - f_{-45^\circ})}$$

### 2.6.2 Messung der vier Spannungen über gemeinsamen Bezugspunkt

Im Abschnitt 2.4.4 sollen vier Spannungen gemessen werden, die keinen gemeinsamen Bezugspunkt haben. Ein gemeinsamer Bezugspunkt ist jedoch für direkte Messungen mit dem Oszilloskop erforderlich. Tipp: Wählen Sie als gemeinsamen Bezugspunkt für alle Spannungsmessungen einen Pol der Spannungsquelle. Überlegen Sie sich, wie Sie aus diesen Messgrößen die benötigten Spannungen berechnen können (siehe auch 1.6.1.2). Lassen Sie diese Berechnungen direkt vom Oszilloskop durchführen und zeigen Sie sich so die gesuchten Spannungen auf dem Oszilloskop an.

---

<sup>2</sup> Ein Schwingkreis wird als elementar bezeichnet, wenn alle nicht zu vernachlässigenden Wirkwiderstände zu einem diskreten Bauteil  $R$  zusammengefasst werden können. Dies trifft für in einem Reihenschwingkreis beispielsweise für den Wirkwiderstand der Spule zu.

## 3. Tiefpass

### 3.1 Inhalte

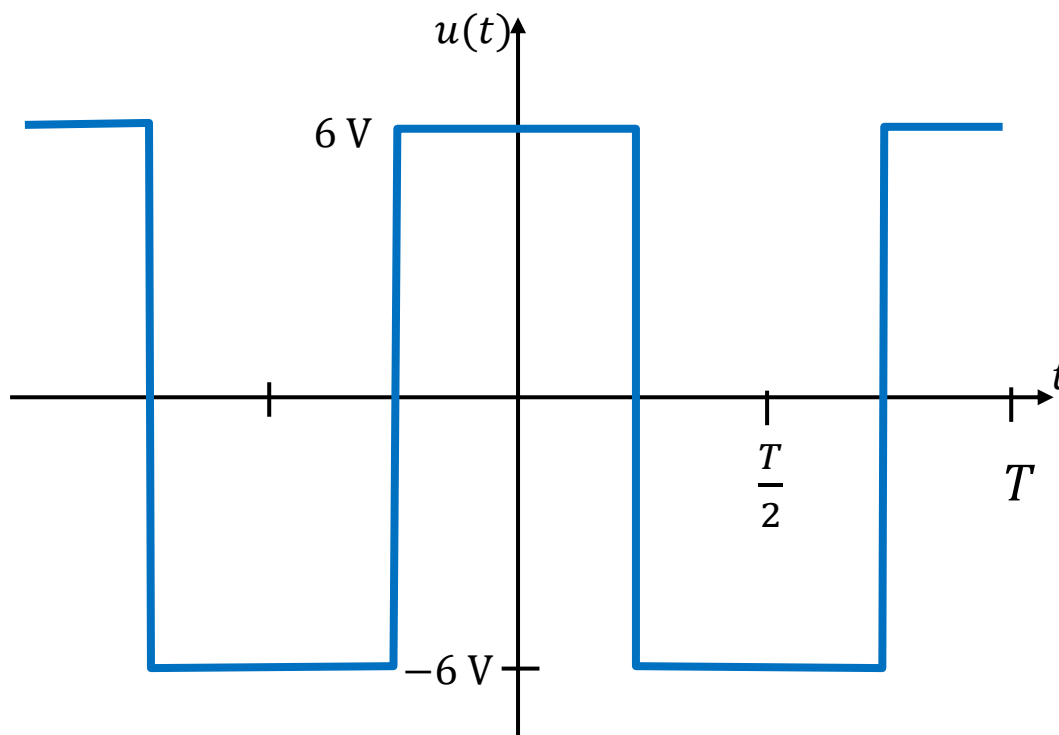
Durch das frequenzabhängige Verhalten von Kapazitäten und Induktivitäten ist es möglich gezielt Spannungen bestimmter Frequenzbereiche stärker zu bedämpfen als Spannungen anderer Frequenzbereiche. Diese Filterwirkung findet in der Signalverarbeitung umfangreiche Anwendung (z.B. die Frequenzweiche einer Lautsprecherbox filtert vereinfacht dargestellt tiefe Frequenzen in der Zuleitung zum Hochtönlautsprecher heraus während hohe Frequenzen in der Zuleitung zum Tieftönlautsprecher herausgefiltert werden). Aber auch in der Energietechnik werden Filter genutzt um z.B. hochfrequente Störfrequenzen in Versorgungsleitungen zu filtern. In diesem Versuch wird exemplarisch für Filterschaltungen ein einfacher Tiefpass untersucht.

Weiterhin wird in diesem Versuch auf die Einschränkungen von Messgeräten bei nicht-sinusförmigen Signalverläufen sowie Messungen in verschiedenen Frequenzbereichen eingegangen.

### 3.2 Vorbereitung

Machen Sie sich mit RC- und RL-Filterschaltungen vertraut. Insbesondere sollten Sie folgende Fragen beantworten können. Weiterhin sind die im Kapitel 3.4 zu jeder Teilaufgabe aufgeführten Vorbereitungen zu bearbeiten (z.B. Schaltungsskizzen), soweit dies ohne Versuchsaufbauten möglich ist.

1. Skizzieren Sie Hochpass aus  $R$  und  $C$  sowie einen aus  $L$  und  $C$ .
2. Skizzieren Sie Tiefpass aus  $R$  und  $C$  sowie einen aus  $L$  und  $C$ .
3. Wie ist die Grenzfrequenz eines Hoch- bzw. Tiefpassfilters definiert und wie wird Sie berechnet?
4. Bestimmen Sie die Amplituden (Fourier-Analyse) bis zur 8. Harmonischen für ein symmetrisches 2 kHz Rechtecksignal (50% 6 V, 50%  $-6$  V)



### 3.3 Geräteliste

Folgendes Material steht für diesen Versuch zur Verfügung

Anzahl	Gerät	Typ	Bemerkungen
1	Frequenzgenerator mit Verstärker als Wechselspannungsquelle	Toellner TOE7741	Bedienungsanleitung im ILIAS
4	Multimeter	Metraline DM62	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Oszilloskop 4-Kanal	Keysight DSOX4024A	Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Messwiderstand 1 $\Omega$		
1	Strommesszange		Bedienungsanleitung im ILIAS
1	Glühlampe	6 V, 100 mA	als ohmsche Last
1	Widerstand 22 $\Omega$	25 WX	
1	Spule	75 Windungen, 160 $\mu\text{H}$ , 0,8 $\Omega$	
1	Kapazitätsdekade		
diverse	Verbindungsleitungen		

Datenblätter zu den Geräten finden Sie im ILIAS-Kurs zum Praktikum.

### 3.4 Messaufgaben

In allen Teilversuchen soll eine Glühlampe (6 V, 100 mA) an einer Wechselspannungsquelle  $U_q$  mit  $f_q = 2$  kHz betrieben werden. Ggf. auftretende höhere Frequenzen (z.B. Störungen) sollen bedämpft werden.

#### 3.4.1 RC-Tiefpass an sinusförmiger Wechselspannungsquelle

Im ersten Schritt wird eine sinusförmige Quellenspannung gewählt. Skizzieren Sie einen Versuchsaufbau um das Verhalten der Ausgangsspannung (= Spannung  $U_{La}$  an der Last) und des Stromes  $I_{La}$  durch die Last in Abhängigkeit der Frequenz aufzunehmen.

**Vorbereitung:** Für einen Tiefpass stehen zunächst ein Widerstand mit  $R = 22 \Omega$  sowie Kapazitäten von  $1 \mu F$  und  $4 \mu F$  zur Verfügung. Skizzieren Sie die **Schaltung** aus Wechselspannungsquelle, Tiefpassfilter und Last (Glühlampe). Nutzen Sie für die Messung des Stromes  $I_{La}$  die Strommesszange.

Berechnen Sie die **Grenzfrequenzen** für mögliche Tiefpassfilter ( $C = 1 \mu F$  und  $4 \mu F$ ) für den belasteten **und** unbelasteten Fall und skizzieren Sie jeweils  $\frac{U_{La}}{U_q}$  als Funktion der Frequenz (alles in einer Grafik).

Sind die verfügbaren **Multimeter** Metraline DM 62 für die im folgenden beschriebenen Messungen geeignet?

**Durchführung:** Stimmen Sie Ihren Aufbau mit dem Laborpersonal ab und nehmen Sie  $U_{La}(f)$  und  $I_{La}(f)$  für  $C = 1 \mu F$  und  $C = 4 \mu F$  auf. Stellen Sie dazu den Effektivwert der Quellenspannung auf 7,5 V ( $\pm 0,05$  V, so genau einstellen wie möglich, tatsächlichen Wert notieren, Spannung für den Versuch konstant halten) ein und variieren Sie die Frequenz zwischen 10 Hz und 100 kHz.

**Tipps:**

- Überlegen Sie sich an Hand Ihrer Vorbereitung, in welchem Bereich Messpunkte sinnvoll sind und probieren Sie dies vor der Messreihe stichprobenartig aus.
- Lassen Sie sich die Effektivwerte (RMS) für Quellenspannung  $U_Q$  und Spannung  $U_{Last}$  auf dem Oszilloskop darstellen.

Durch Umklemmen der Strommesszange können neben dem Strom durch die Last auch der Gesamtstrom und der Strom durch den Kondensator dargestellt werden. Lassen Sie sich für  $C = 1 \mu F$  und die Frequenzen 200 Hz, 2 kHz und 20 kHz die drei unterschiedlichen Ströme (Amplitude und Phase zu Quellen- und Lastspannung) auf dem Oszilloskop darstellen.

**Auswertung:** Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen. Stellen Sie die Messergebnisse  $\frac{U_{La}}{U_q}$  sowie  $I_{La}$  als Funktion der Frequenz grafisch dar. Kennzeichnen Sie die Grenzfrequenzen und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem aus Ihrer Vorbereitung. Hinweis: hier ist eine logarithmische Einteilung der Frequenzachse sinnvoll.

Wie kann die frequenzabhängige Phasenverschiebung zwischen  $U_{Last}$  und  $I_{Last}$  erklärt werden? Tipp: Nutzen Sie das Datenblatt der Strommesszange.



### 3.4.2 Auswirkung der Last auf RC-Tiefpass

Ändern sich die Ergebnisse aus 3.4.1, wenn Sie den Aufbau ohne Last betreiben (Ausgang des Tiefpasses offen)?

Vorbereitung: Berechnen Sie, welchen **Quellenstrom** Sie **maximal** erwarten.

Durchführung: Stichprobenartige Vergleichsmessungen ohne Last

Auswertung: Vergleichen Sie die Messergebnisse aus 3.4.2. mit denen aus 3.4.1 und mit Ihren Berechnungen aus der Vorbereitung. Erläutern Sie die Unterschiede.

### 3.4.3 RC-Tiefpass an rechteckförmiger Wechselspannungsquelle

In diesem Versuch wird die sinusförmige Quellenspannung im Aufbau nach 3.4.1 durch eine rechteckförmige Quellenspannung mit einer Amplitude von 6 V (Gleichanteil = 0 V) ersetzt und die Kapazität  $C = 1 \mu\text{F}$  verwendet.

Vorbereitung: Bestimmen Sie die **maximale Verlustleistung** am  $22 \Omega$  - Widerstand!

In wie weit können die Multimeter für die Messung von nicht-sinusförmigen Signalen genutzt werden?

Durchführung: Betrachten Sie die Quellenspannung  $U_Q$  und die Spannung an der Last  $U_{La}$  auf dem Oszilloskop. Variieren Sie dabei die Frequenz (10 Hz – 50 kHz) und skizzieren Sie die beiden Spannungsverläufe für 2 kHz und 10 kHz.

Auswertung: Ab welcher Frequenz ist eine Veränderung der Kurvenform des Ausgangssignals erkennbar und wie ist diese Veränderung zu erklären?  
Wie passt die Kurvenform zu der in der Vorbereitung durchgeführten Fourieranalyse und den Ergebnissen nach 3.4.1 ?

### 3.4.4 Fourieranalyse RC-Tiefpass

Die verwendeten Oszilloskope ermöglichen eine sogenannte Fast Fourier Transformation (FFT) durchzuführen, die die Amplituden der einzelnen harmonischen Frequenzanteile darstellen kann. In diesem Versuch sollen Ihre in der Vorbereitung im Rahmen der Fourieranalyse berechneten Werte mit in diesem Versuch messtechnisch ermittelten Werten verglichen. Verwenden Sie den Aufbau nach 3.4.3 und stellen die Frequenz auf  $f = 2 \text{ kHz}$ .

Vorbereitung: Sehen Sie sich die Informationen zur Durchführung einer FFT in den Hilfestellungen (Anleitung im ILIAS) an.

Durchführung: Bestimmen Sie messtechnisch die Amplituden der harmonischen Frequenzanteile bis zur 8. Harmonischen in der Quellenspannung (Eingang des Tiefpasses) und in der Spannung an der Last (Ausgang des Tiefpasses)

Auswertung: Stellen Sie die Frequenzspektren von Eingangs und Ausgangssignal in jeweils einem Koordinatensystem dar. Tragen Sie jeweils auch die berechneten Werte ein. Woran erkennt man das Tiefpassverhalten?

### 3.4.5 LC-Tiefpass an sinusförmiger Wechselspannungsquelle

Ein RC-Tiefpass hat den Nachteil, dass auch bei niedrigen Frequenzen Wirkleistung im Wirkwiderstand umgesetzt wird und auch für niedrige Frequenzanteile ein Spannungsabfall in Abhängigkeit zum Gesamtstrom vorliegt (siehe auch 3.4.2). In einigen Anwendungen ist dies nicht erwünscht (z.B. ein Filter am Eingang einer Spannungsversorgung). In diesen Fällen finden sich daher häufig statt RC-Filtern sogenannte LC-Filter. Um die Eigenschaften eines solchen Filters zu untersuchen ersetzen Sie im Aufbau nach 3.4.1 den Wirkwiderstand  $R$  durch eine Spule mit folgenden Eigenschaften (75 Windungen, Luftspule,  $160\ \mu\text{H}$ ,  $0,08\ \Omega$ ), als Wert für die Kapazität wählen Sie  $1\ \mu\text{F}$ .

**Vorbereitung:** Skizzieren Sie einen **Aufbau**, in dem Sie Quellenspannung  $U_Q$ , Quellenstrom  $I_Q$  und Spannung an der Last  $U_{La}$  auf dem Oszilloskop darstellen können (Messungen ohne Strommesszange).

Mit welcher **Resonanzfrequenz** rechnen Sie für diesen Aufbau? Warum sollten rund um die Resonanzfrequenz mehr Messwerte aufgenommen werden?

**Durchführung:** Stimmen Sie Ihren Aufbau mit dem Laborpersonal ab. Stellen Sie den Effektivwert der **Quellenspannung auf  $U_Q = 2,5\ \text{V}$**  ( $\pm 0,2\ \text{V}$ , eingestellten Wert notieren, Spannung für diesen Versuch konstant halten) und nehmen Sie  $U_{Last}(f)$  und  $I_Q(f)$  auf für  $f = 10\ \text{Hz} \dots 100\ \text{kHz}$ . Regeln Sie den Effektivwert der Ausgangsspannung ggf. nach (Nutzen Sie zur Messung der Effektivwerte bei Frequenzen  $> 50\ \text{Hz}$  das Oszilloskop). Kennzeichnen Sie den Resonanzfall.

Dokumentieren Sie den Effekt der sich einstellt, wenn Sie im Resonanzfall die Last abtrennen. Wie ist dies zu erklären?

**Auswertung:** Dokumentieren Sie die durchgeführten Messungen und Berechnungen.

Stellen Sie  $\frac{U_Q}{U_{Last}}(f)$  und  $I_Q(f)$  grafisch dar.

Kennzeichnen Sie die Resonanzfrequenz in Messwerttabellen und Grafiken.

## 3.5 Ausarbeitung

Erstellen Sie eine Dokumentation der von Ihnen durchgeführten Messungen und Auswertungen.

Fügen Sie dieser Ausarbeitung auf den ersten Seiten eine Beantwortung aller obigen Vorbereitungsfragen hinzu.

Diese letzte Ausarbeitung geben Sie innerhalb einer Woche nach dem Praktikumstermin ab, innerhalb einer weiteren Woche erfolgt die Durchsicht durch den betreuenden Professor. Geben Sie zur Kommunikation auf dem Deckblatt der Ausarbeitung eine Emailadresse an.

## 3.6 Hilfestellungen

### 3.6.1 Tiefpass und Hochpass

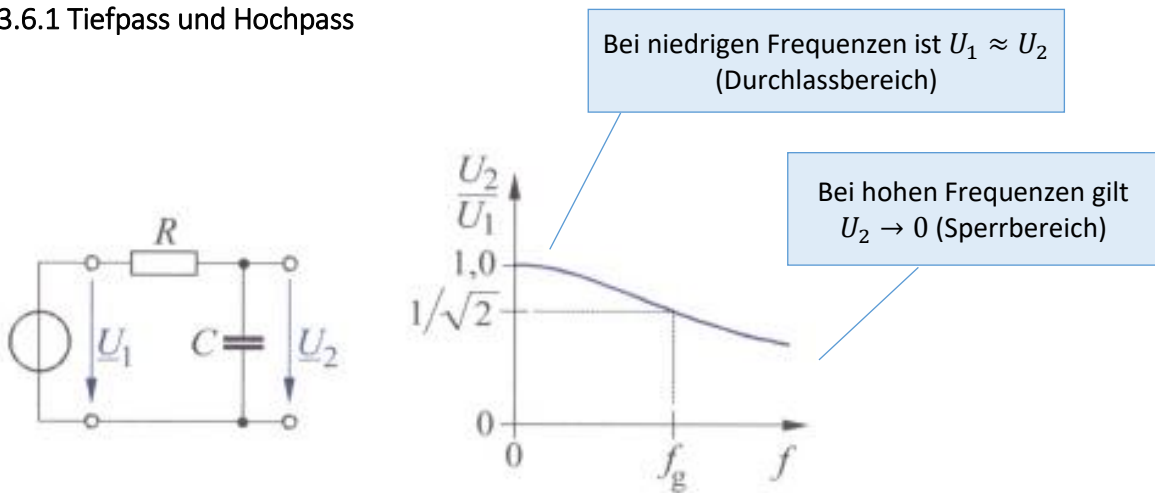


Abbildung 3.6.1.1: einfacher RC-Tiefpass

Grenzfrequenz trennt Durchlass- u. Sperrbereich.

$$\begin{aligned} \text{Definition: } \frac{U_2}{U_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Rightarrow R \cdot \omega_g \cdot C &= 1 \\ \Rightarrow f_g &= \frac{1}{2\pi RC} \end{aligned}$$

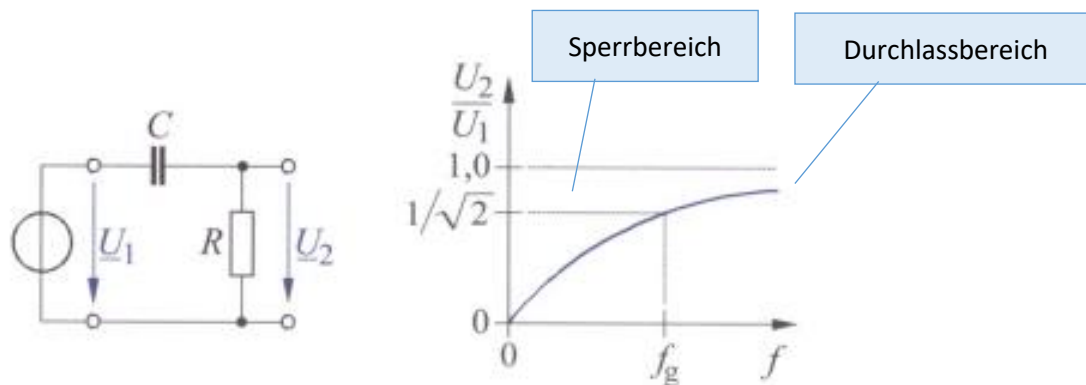


Abbildung 3.6.1.2: einfacher RC-Hochpass

Grenzfrequenz trennt Durchlass- u. Sperrbereich.

$$\begin{aligned} \text{Definition: } \frac{U_2}{U_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Rightarrow \frac{1}{R \cdot \omega_g \cdot C} &= 1 \\ \Rightarrow f_g &= \frac{1}{2\pi RC} \end{aligned}$$