

## Phase und Leistung im Wechselstromkreis

### Aufgabenstellung

1. Untersuchung der Anzeige von unterschiedlichen Spannungsmessinstrumenten bei verschiedenen Kurvenformen
2. Aufnahme des Amplitudenganges von unterschiedlichen Spannungsmessinstrumenten
3. Ermittlung der Phasenlage von Strom und Spannung an einem Kondensator
4. Ermittlung der Phasenlage von Strom und Spannung an einer Spule
5. Ermittlung der elektrischen Leistung in einer RC-Schaltung
6. Ermittlung der elektrischen Leistung in einer RL-Schaltung
7. Option: Untersuchungen zur Blindleistungskompensation an einem induktiven Verbraucher

### Hinweise

Die Außenleiter (Schirmung) der BNC-Eingangsbuchsen eines Oszilloskops sind in der Regel intern miteinander und mit der Schutz Erde des Netzanschlusses verbunden. Dies gilt auch für BNC-Buchsen eines Funktionsgenerators. In den Schaltbildern ist dies durch strichpunktierte Linien und dem Erdungszeichen PE gekennzeichnet. Das Bezugspotential Ihrer Schaltungen – jenes mit dem Symbol 0V – ist mit einem Kabel mit PE zu verbinden.

Verwenden Sie für die Messungen mit dem Oszilloskop Laborkabel und BNC-4mm-Bananenbuchsen-Adapter. Die oben erwähnte Verbindung des Außenleiters der BNC-Eingangsbuchse mit dem Bezugspotential der Schaltung erfolgt über die **schwarze** Buchse **eines** Adapters. Bei Verwendung von Tastköpfen mit den aufgesteckten Prüf-Clips zur leichteren Umfassung der Bauteilanschlüsse kann diese Verbindung über **eine** Erdklammer **eines** Tastkopfes erfolgen.

Die mit dem Oszilloskop zu messenden Größen sollen als „single-shot“ gespeichert und über die USB-Schnittstelle als ASCII-Datenfile (.csv) in ein Speichermedium (USB-Stick) übertragen werden. Die Auswertung soll mit einem geeigneten Programm (z. Bsp. Excel oder QtiPlot) erfolgen.

Fall erforderlich oder auch nur für Dokumentationszwecke kann ein „screen-shot“ der gespeicherten Messung angefertigt und in gleicher Weise als Bild (.bmp oder .png) in ein Speichermedium übertragen werden.

Als Signalquelle dient bei den Aufgaben 2 bis 7 die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Diese liefert eine Nennspannung von ca.  $12V_{\text{eff}}$  und ist durch eine zusätzliche Leistungselektronik vor Überlastung und Kurzschluss geschützt. Der maximale Strom wird dadurch auf  $500\text{ mA}_{\text{Spitze}}$  begrenzt.

Zur Vermeidung von unbeabsichtigt induzierten hohen Spannungsspitzen ist der Spule ein Varistor ( $VDR = \text{voltage dependent resistor}$ ) mit entsprechender Leistung und einer Schwellenspannung von ca. 40V parallelgeschaltet.

Ein Kondensator verliert nach dem Abstecken bzw. Ausschalten der elektrischen Versorgung seine zuletzt gespeicherte Ladung mitunter nur langsam (Entladezeitkonstante  $\tau$ ). Zur Vermeidung einer lange vorhandenen Restspannung zwischen den Elektroden ist er in diesem Fall mit einem  $100\Omega$ -Widerstand manuell zu entladen.

Die Bezeichnung „trueRMS“ (Echt-Effektivwert), welche gerade im Zusammenhang mit Vielfachmessgeräten verwendet wird, ist werbetechnisch fundiert und irreführend, denn es gibt keinen „echten“ oder „unechten“, sondern nur **den** Effektivwert. Diese Bezeichnung soll auf die Art der Messung des Effektivwertes hinweisen, bei der dieser „direkt“ gemessen und nicht über den Umweg der Messung einer anderen Größe wie z. Bsp. den Gleichrichtwert bestimmt wird. Da sich diese Bezeichnung im technischen Sprachgebrauch durchgesetzt zu haben scheint, wird diesem Umstand in diesem Skript Rechnung getragen.

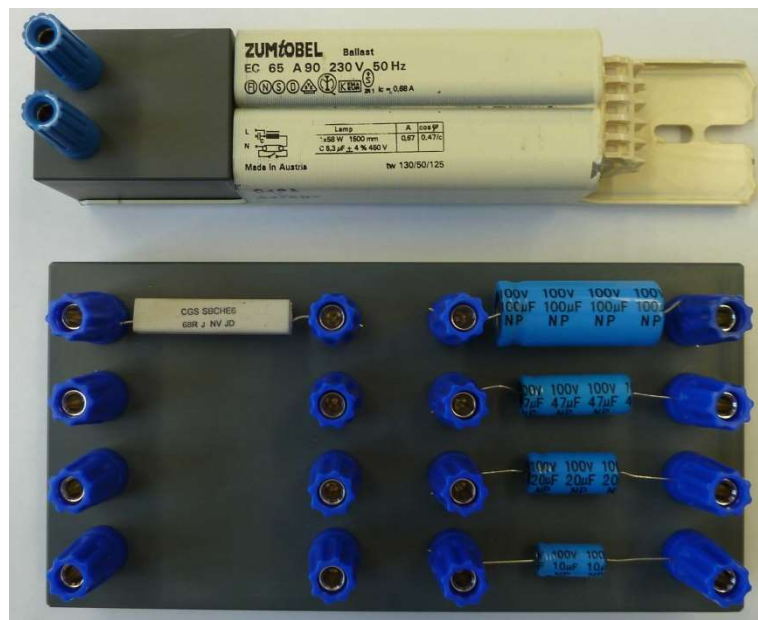
Widerstandswert:  $68R = 68\Omega$

Kapazitätswerte:  $100\mu F = 100 \cdot 10^{-6} F = 0,0001 \text{ Farad}$   
 $47\mu F, 20\mu F, 10\mu F$ , Tonfrequenzkondensatoren - nicht gepolt,  
 $\tan \delta = 0,05$

Induktivität: Drossel mit zu bestimmender Induktivität  $L$  [H] und Wicklungswiderstand  $R_L$  [ $\Omega$ ]

Induktivität

Widerstand  
 $68\Omega \pm 5\%$



Kondensatoren

$100\mu F \pm 20\%$

$47\mu F \pm 20\%$

$20\mu F \pm 20\%$

$10\mu F \pm 20\%$

Abbildung 1: Steckbrett mit Bauteilen und 4mm-Buchsen

## Protokollführung

Es gelten die Richtlinien der Protokollführung aus der Lehrveranstaltung „Einführung in die physikalischen Messmethoden“, LV-Nr.: PHY.D10\_2, UNT.032\_2 und PHA.04204UB

## Danksagung

Ich danke Herrn Robert Seebacher für die „Testung“ und kritische Diskussion dieses Übungsbeispiels.

## Versuchsanleitung

### zu 1.

Wechselspannungsmessgeräte geben im Allgemeinen vor, den Effektivwert der elektrischen Spannung anzuzeigen. Aufgrund komplexer Verhältnisse im elektrischen Netz kann der zeitliche Verlauf der zu messenden Größe stark vom ursprünglich sinusförmigen abweichen. Führt diese Abweichung zu Fehlern in der Anzeige oder sind die Messgeräte dagegen immun?

In diesem Versuch überprüfen Sie die Anzeige von verschiedenen Spannungsmessgeräten, welche von Wechselsignalen unterschiedlicher Kurvenform gespeist werden.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 2.

Als Signalquelle dienen die  $50\Omega$  - Ausgänge der Funktionsgeneratoren Hameg *HM8030-3* oder des im Oszilloskop *DSO-X2002A* integrierten *WAVEGEN*. Wählen Sie für die Messung einen symmetrischen Verlauf der Generatorspannung (ohne Gleichspannungsanteil = dc-Offset) im Bereich zwischen  $4V_{SS}$  und  $8V_{SS}$  („Spitze-Spitze-Wert“, nach aktueller Normung in DIN 5483-1:1983 als „Spitze-Tal-Wert“ bezeichnet) und einer Frequenz von 50Hz.

Kontrollieren Sie den Spitze-Spitze-Wert einer sinusförmigen Spannung anhand einer Messung mit einem Kanal des Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops und messen Sie den Effektivwert dieser Spannungsform sowohl mit dem Oszilloskop als auch mit weiteren unterschiedlichen Vielfachmessinstrumenten (Abbildung 2).

Wiederholen Sie die Messung mit einer dreieck- und einer rechteckförmigen Spannung gleicher Amplitude und Frequenz.

**Gesucht:** Vergleich der gemessenen mit den berechneten Effektivwerten der unterschiedlichen Spannungsformen.

**Hinweis:** Arbeiten Sie am Oszilloskop mit einem BNC-4mm-Bananenbuchsen-Adapter! Stellen Sie das **Abschwächungsverhältnis** für beide Kanäle auf **1:1**! Der Scheitelwert der verwendeten Signale entspricht dem halben „Spitze-Spitze-Wert“. Verwenden Sie die „measure“-Funktionen des Oszilloskops.

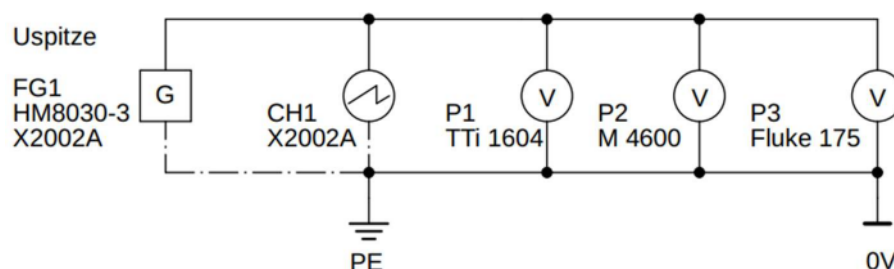


Abbildung 2: Untersuchung der Anzeige von Spannungsmessern

## zu 2.

Wechselspannungsmessgeräte werden für verschiedene Einsatzbereiche angeboten. Neben unterschiedlichen Spannungsbereichen ist auch die Frequenz der zu messenden Wechselspannung ein Auswahlkriterium. Beschränkt sich der Frequenzbereich des Gerätes auf die in unserem Energieversorgungsnetz vorhandenen 50Hz oder können damit auch höherfrequente Spannungssignale im Bereich einiger hundert kHz gemessen werden?

In diesem Versuch bestimmen Sie die Amplitudengänge von verschiedenen Spannungsmessgeräten unter Verwendung eines sinusförmigen Signals. Der Amplitudengang ist die grafische Darstellung der Verstärkung - dem Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangssignal - (Ordinate) in Abhängigkeit von der Frequenz, wobei die Frequenzachse (Abszisse) im logarithmischen Maßstab skaliert ist. Es ist manchmal üblich, die Ordinate des Amplitudengangs ebenfalls logarithmisch zu skalieren. Folgende Darstellungsform unter Verwendung des Leistungsmaßes  $Q_{(F)}$  in *deziBel* [dB] hat sich hier durchgesetzt:

$$Q_{(F)} = 20 \cdot \log \left( \frac{U_A}{U_E} \right) \quad \begin{array}{l} U_A \dots \text{Ausgangssignal (DVM)} \\ U_E \dots \text{Eingangssignal (Oszilloskop)} \end{array}$$

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 3.

Als Signalquelle dienen die 50Ω - Ausgänge der Funktionsgeneratoren Hameg *HM8030-3* oder des im Oszilloskop *DSO-X2002A* integrierten *WAVEGEN*. Wählen Sie für die erste Messung einen symmetrischen, sinusförmigen Verlauf der Generatorspannung (ohne Gleichspannungsanteil = dc-Offset) im Bereich zwischen 4V<sub>SS</sub> und 8V<sub>SS</sub> und einer Frequenz von 10Hz.

Kontrollieren Sie diesen Spitze-Spitze-Wert anhand einer Messung mit einem Kanal des Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops und messen Sie den Effektivwert dieser Spannung sowohl mit dem Oszilloskop ( $U_E$ ) als auch mit drei weiteren unterschiedlichen Vielfachmessinstrumenten ( $U_{A1}$  bis  $U_{A3}$ ). Bestimmen Sie die Frequenz des Signals mit dem Oszilloskop.

Führen Sie die Messungen im Frequenzbereich zwischen 10Hz und 100kHz durch. Setzen Sie die Messpunkte (Frequenzen) in den Bereichen der Änderungen der Anzeigen etwas dichter, sodass Sie mit ca. 25 Messpunkten (5-7 Messpunkte/Dekade) das interessierende Spektrum abdecken können. Messen Sie zusätzlich bei einer Frequenz des Spannungssignals von 50Hz.

**Gesucht:** Darstellung und Vergleich der Amplitudengänge von verschiedenen Spannungsmessern

**Hinweis:** Verwenden Sie die „measure“-Funktionen des Oszilloskops.

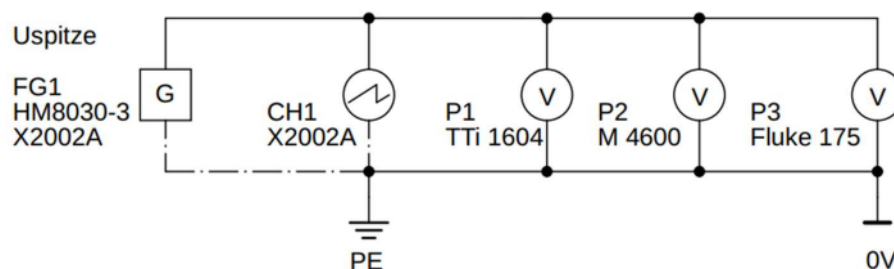


Abbildung 3: Bestimmung des Amplitudenganges von Spannungsmessern

**zu 3.**

Ein Kondensator stellt im Wechselstromkreis einen kapazitiven Blindwiderstand dar. Bei sinusförmigem Verlauf der Spannung an seinen Elektroden ist durch den fortwährenden Auf- und Entladevorgang ein sinusförmiger Strom durch den Kondensator feststellbar. Der Momentanwert dieses Stromes ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Spannung, womit sich beim idealen Kondensator ( $R_i = \infty$ ) eine Phasenverschiebung von  $+90^\circ$  ergibt: der Strom  $I$  eilt der Spannung  $U_{C1}$  vor.

In diesem Versuch bestimmen Sie die Phasenlage von Strom und Spannung bei einem realen Kondensator.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 4.

Als Signalquelle dient die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Da ein Oszilloskop gewöhnlich nur Spannungseingänge besitzt, wird der Strom  $I$  durch Messung des Spannungsabfalls  $U_{R1}$  am ohmschen Widerstand  $R1$  und nachfolgender Anwendung des Ohm'schen Gesetzes ermittelt. Bestimmen Sie mit Hilfe der „measure“-Funktionen des Oszilloskops die Spitzen- oder Effektivwerte von  $U_{R1}$  und  $U_{C1}$  sowie die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Signalen.

Dokumentieren Sie den zeitlichen Verlauf der Spannungen  $U_{R1}$  an  $R1$  und  $U_{C1}$  an  $C1$  mit zwei Kanälen eines Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messung als Bild ab.

**Gesucht:** Phasenverschiebung zwischen Kondensatorspannung und -strom im Zeigerdiagramm.

**Hinweis:** Beachten Sie die **Vorzeichen Ihrer Messungen (-UC1)**! Achten Sie auf Signalverzerrungen und interpretieren Sie deren Auswirkungen auf Ihre Messungen.

**Option:** Berücksichtigen Sie den Isolationswiderstand  $R_I$  von  $C_1$  im Zeigerdiagramm! Für den verwendeten Tonfrequenz-Elektrolytkondensator gilt:  $\tan \delta = 0,05$ . Berechnen Sie daraus den Widerstand  $R_I$ . Der Gesamtstrom  $I$  teilt sich durch die Parallelschaltung von  $C_1$  und  $R_I$  auf:  $I_R$  ist in Phase mit  $U_{C_1}$ ,  $I_C$  läuft  $U_{C_1}$  um  $90^\circ$  vor (siehe Abbildung 10).

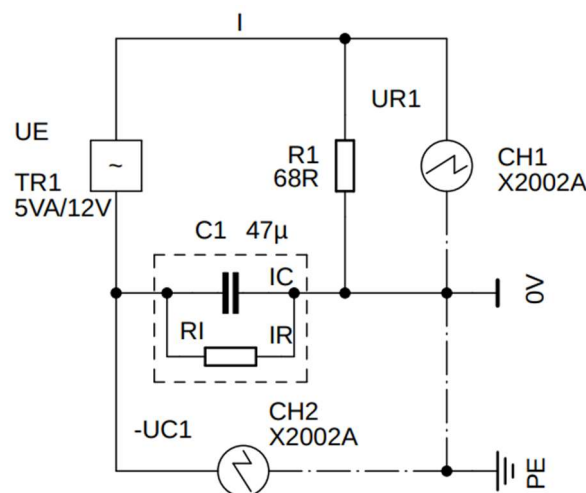


Abbildung 4: Aufnahme der Phasenlage von Kondensatorstrom und -spannung

**zu 4.**

Eine Spule stellt im Wechselstromkreis einen induktiven Blindwiderstand dar. Bei sinusförmigem Verlauf der Spannung an ihren Anschlüssen ist ein sinusförmiger Strom durch die Spule feststellbar. Dieser sorgt für einen fortwährenden Auf- und Abbau eines Magnetfeldes, welches eine Spannung induziert, die an den Anschlüssen der Spule abgegriffen werden kann. Der Momentanwert dieser Spannung ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des Stromes, womit sich bei der idealen Spule ( $R_L = 0$ ) eine Phasenverschiebung von  $-90^\circ$  ergibt: der Strom  $I$  eilt der Spannung  $U_{L1}$  nach.

In diesem Versuch bestimmen Sie die Phasenlage von Strom und Spannung bei einer realen Spule.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 5.

Als Signalquelle dient die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Da ein Oszilloskop gewöhnlich nur Spannungseingänge besitzt, wird der Spulenstrom  $I$  durch Messung des Spannungsabfalls  $U_{R1}$  am ohmschen Widerstand  $R1$  und nachfolgender Anwendung des Ohm'schen Gesetzes ermittelt. Bestimmen Sie mit Hilfe der „measure“-Funktionen des Oszilloskops die Spitzen- oder Effektivwerte von  $U_{R1}$  und  $U_{L1}$  sowie die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Signalen.

Dokumentieren Sie den zeitlichen Verlauf der Spannungen  $U_{R1}$  an  $R1$  und  $U_{L1}$  an  $L1$  mit zwei Kanälen eines Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messung als Bild ab.

**Gesucht:** Phasenverschiebung zwischen Spulenspannung –strom im Zeigerdiagramm.

**Hinweis:** Beachten Sie die **Vorzeichen Ihrer Messungen (- $U_{L1}$ )**! Achten Sie auf Signalverzerrungen und interpretieren Sie deren Auswirkungen auf Ihre Messungen.

**Option:** Berücksichtigen Sie den ohmschen Wicklungsanteil  $R_L$  von  $L1$  im Zeigerdiagramm! Messen Sie dazu  $R_L$  mit einem Vielfachmessinstrument. Die Spannung an  $R_L$  ist in Phase mit dem Strom  $I$ , die gemessene Spannung an der Spule  $U_{L1}$  ergibt sich durch die vektorielle Addition der Teilspannungen  $U_{R_L}$  und der noch unbekannten Spannung  $U_{X_L}$  an der *idealen* Induktivität  $L1$  (siehe Abbildung 9).

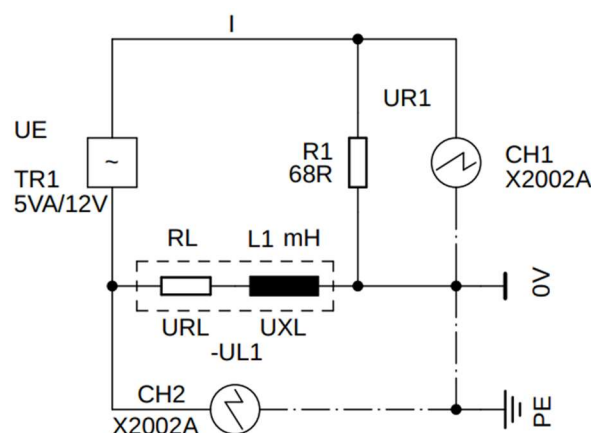


Abbildung 5: Aufnahme der Phasenlage von Spulenstrom und –spannung

## zu 5.

In diesem Versuch bestimmen Sie neben dem Wirk- und Blindleistungsanteil auch den Phasenwinkel zwischen Gesamtspannung und -strom einer RC-Kombination im Wechselstromkreis. Neben der einfachen Messung mit einem Leistungsmessgerät sollen diese Größen auch über die Ermittlung der Effektivwerte von Spannung und Strom an den Bauteilen und anschließender Anwendung der mathematischen Zusammenhänge bestimmt werden.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 6.

Als Signalquelle dient die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Messen Sie die Spannungen  $U_{R1}$  an R1 und  $U_{C1}$  an C1 sowie den in der Schaltung fließenden Strom I mit „trueRMS“ - Vielfachmessgeräten. Verwenden Sie das HM8115-2 bzw. RSPM8213 zur Leistungsmessung (Wirk-, Blind- und Scheinleistung), zur Messung des Leistungsfaktors PF ( $\cos \varphi$ ), der Spannung  $U_E$  und des Stromes I. Dokumentieren Sie den zeitlichen Verlauf der Eingangsspannung  $U_E$  und der Spannung  $U_{R1}$  als Maß für den fließenden Strom I mit zwei Kanälen eines Agilent DSO-X 2002A Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messung als Bild ab.

**Gesucht:** Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom I im Zeigerdiagramm, das Leistungsdreieck im RC-Kreis sowie Vergleich der unterschiedlich eruierten Größen.

**Hinweis:** Schalten Sie die Invertierung von Kanal CH2 am Oszilloskop wieder aus! Beachten Sie die unterschiedlichen Beschaltungen der beiden Leistungsmesser (siehe Abbildung 6).

**Option:** Berücksichtigen Sie den Isolationswiderstand von C1 im Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 10).

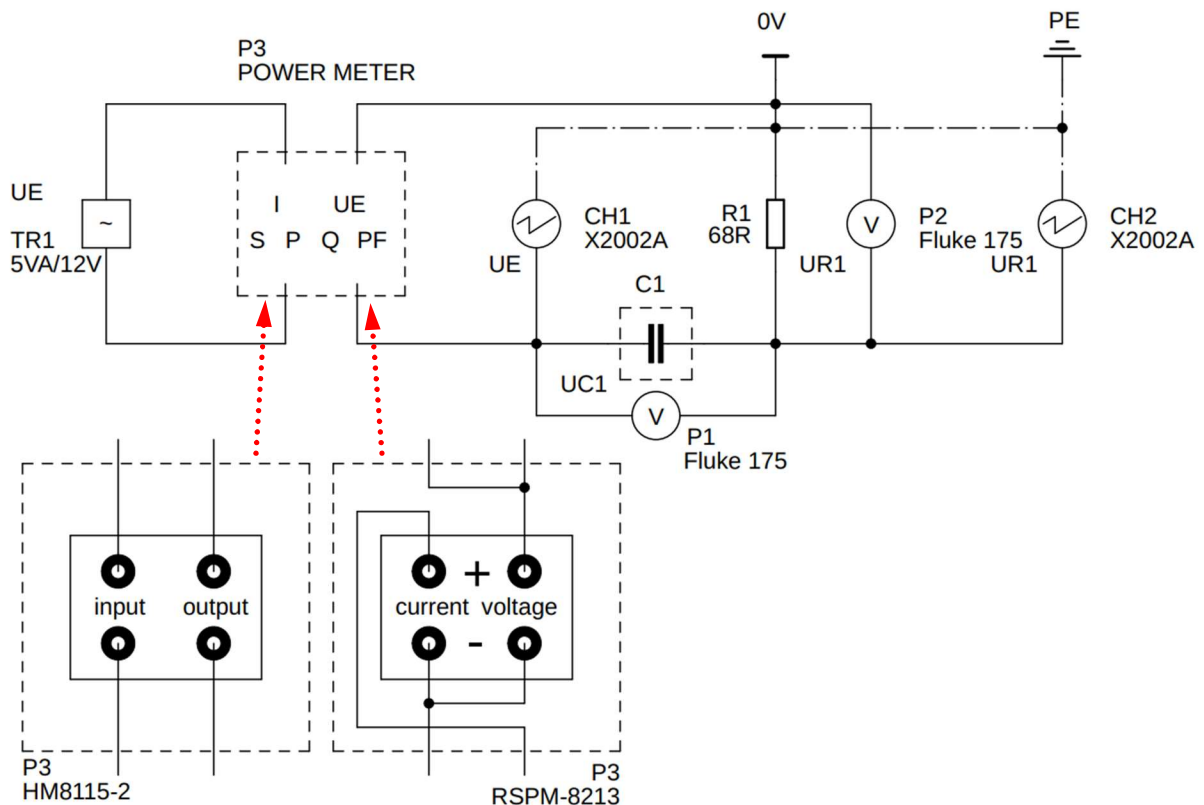


Abbildung 6: Bestimmung von Phasenlage und elektrischer Leistung im RC-Kreis



## zu 6.

In diesem Versuch bestimmen Sie neben dem Wirk- und Blindleistungsanteil auch den Phasenwinkel zwischen Gesamtspannung und -strom einer RL-Kombination im Wechselstromkreis. Neben der einfachen Messung mit einem Leistungsmessgerät sollen diese Größen auch über die Ermittlung der Effektivwerte von Spannung und Strom an den Bauteilen und anschließender Anwendung der mathematischen Zusammenhänge bestimmt werden.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 7.

Als Signalquelle dient die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Messen Sie die Spannungen  $U_{R1}$  an R1 und  $U_{L1}$  an L1 sowie den in der Schaltung fließenden Strom I mit „trueRMS“-Vielfachmessgeräten. Verwenden Sie das *HM8115-2* bzw. *RSPM8213* zur Leistungsmessung (Wirk-, Blind- und Scheinleistung), zur Messung des Leistungsfaktors PF ( $\cos \varphi$ ), der Spannung  $U_E$  und des Stromes I. Dokumentieren Sie den zeitlichen Verlauf der Eingangsspannung  $U_E$  und der Spannung  $U_{R1}$  als Maß für den fließenden Strom I mit zwei Kanälen eines Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messung als Bild ab.

**Gesucht:** Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom I im Zeigerdiagramm, das Leistungsdreieck im RL-Kreis sowie Vergleich der unterschiedlich eruierten Größen.

**Hinweis:** Beachten Sie die unterschiedlichen Beschaltungen der beiden Leistungsmesser (siehe Abbildung 7).

**Option:** Berücksichtigen Sie den ohmschen Wicklungsanteil von L1 im Zeigerdiagramm!

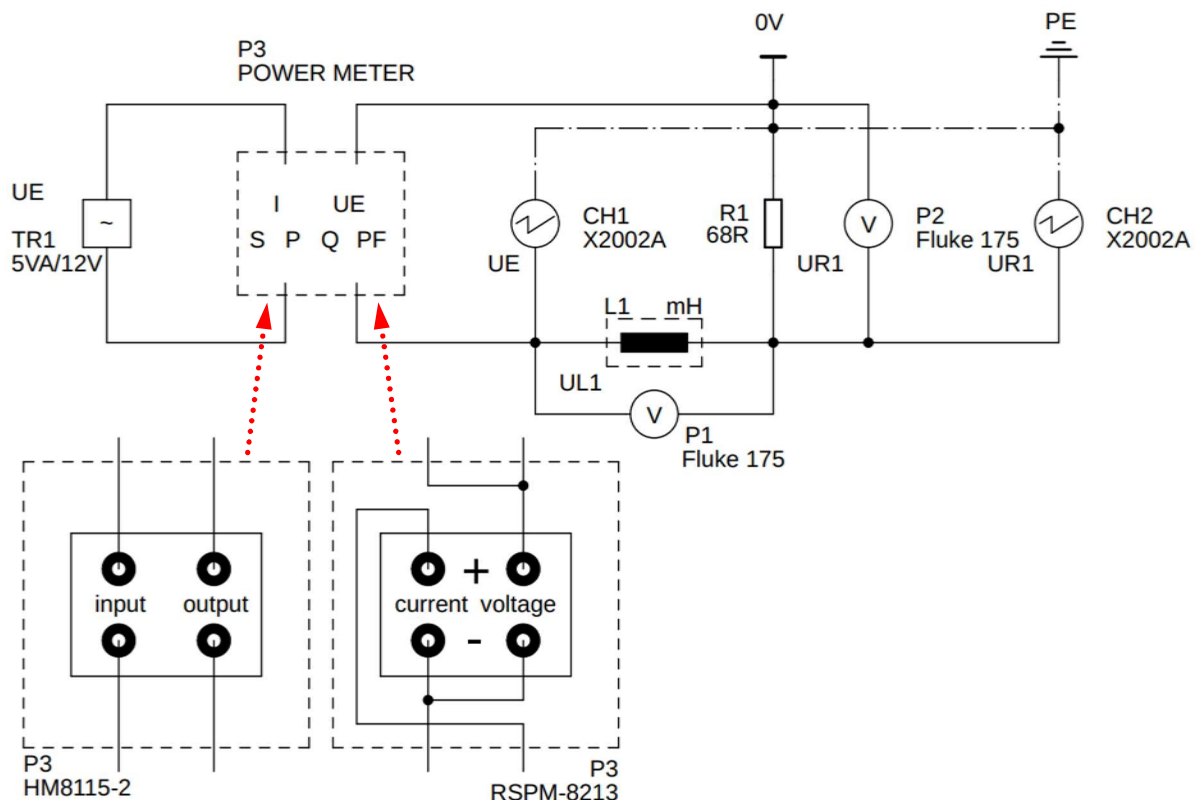


Abbildung 7: Bestimmung von Phasenlage und elektrischer Leistung im RL-Kreis



**zu 7.**

In einem Wechselstromnetz kann mit Hilfe der Blindstrom- oder Blindleistungskompensation versucht werden, den Anteil der zwischen Generator und Verbraucher übertragenen Blindleistung zu verringern. Dies erfolgt durch Parallelschalten von Spulen oder Kondensatoren geeigneter Größe zum Verbraucher, abhängig von dessen Ausbildung kapazitiver oder induktiver Natur. Der Generator liefert die Blindleistung für eine Periode ins Netz, danach pendelt sie hauptsächlich zwischen Verbraucher und Kompensationsbauteil. Je nach Kompensationsgrad verringert sich der zwischen Generator und Verbraucher pendelnde Anteil der Blindleistung. Dies führt zu einem geringeren Gesamtstrom zwischen Generator und Verbraucher, wodurch auch die Verluste in den Zuleitungen kleiner werden.

In diesem Versuch bauen Sie ein einfaches Wechselstromnetz bestehend aus Generator, ohmsch-induktivem Verbraucher sowie Zuleitungswiderstand auf. Sie betreiben dieses Netz zunächst unkompensiert und ermitteln die relevanten elektrischen Größen. Aus diesen berechnen Sie die für zwei Kompensationsfälle benötigten Kapazitäten und nehmen mit diesen das Netz wieder in Betrieb. Messen Sie für beide Kompensationsfälle erneut die elektrischen Größen und dokumentieren Sie die auftretenden Unterschiede.

**Durchführung:** Aufbau gemäß Abbildung 8.

Als Signalquelle dient die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Versuchen Sie, durch Blindstromkompensation einen *power-factor* ( $PF = \cos\varphi$ ) von 0,80 und 0,90 einzustellen. Messen Sie sowohl für die unkompensierte Variante als auch für jeden Kompensationsversuch den zeitlichen Verlauf der Spannungen  $U_{R1}$  an R1 und  $U_{L1}=U_{C1}$  an L1 bzw. C1 mit zwei Kanälen eines Agilent *DSO-X 2002A* Oszilloskops. Speichern Sie jede Messung als Bild ab. Messen und dokumentieren Sie für jeden Kompensationsversuch ebenso die Spannungen an R1 und L1 bzw. C1 sowie die Ströme durch R1 und C1 mit „trueRMS“-Vielfachmessgeräten und dem Leistungsmesser.

**Gesucht:** Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  sowie Spannungs- und Stromverhältnisse im RLC-Kreis für jeden Kompensationsversuch.

**Hinweis:** Versuchen Sie zuerst, die zur Blindleistungskompensation notwendigen Kapazitäten unter Verwendung des ermittelten Wertes der Induktivität und nachfolgender Formeln abzuschätzen:

$$X_L = \omega L \quad (1) \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2) \quad \omega = 2\pi f \quad (3) \quad \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (5) \quad Q_L = \frac{U_L^2}{X_L} = I_L^2 X_L \quad (6) \quad Q_C = \frac{U_C^2}{X_C} = I_C^2 X_C \quad (7)$$

**Realisieren Sie die berechneten Kapazitäten durch Serien- und/oder Parallelschaltung der vorhandenen Kondensatoren.**

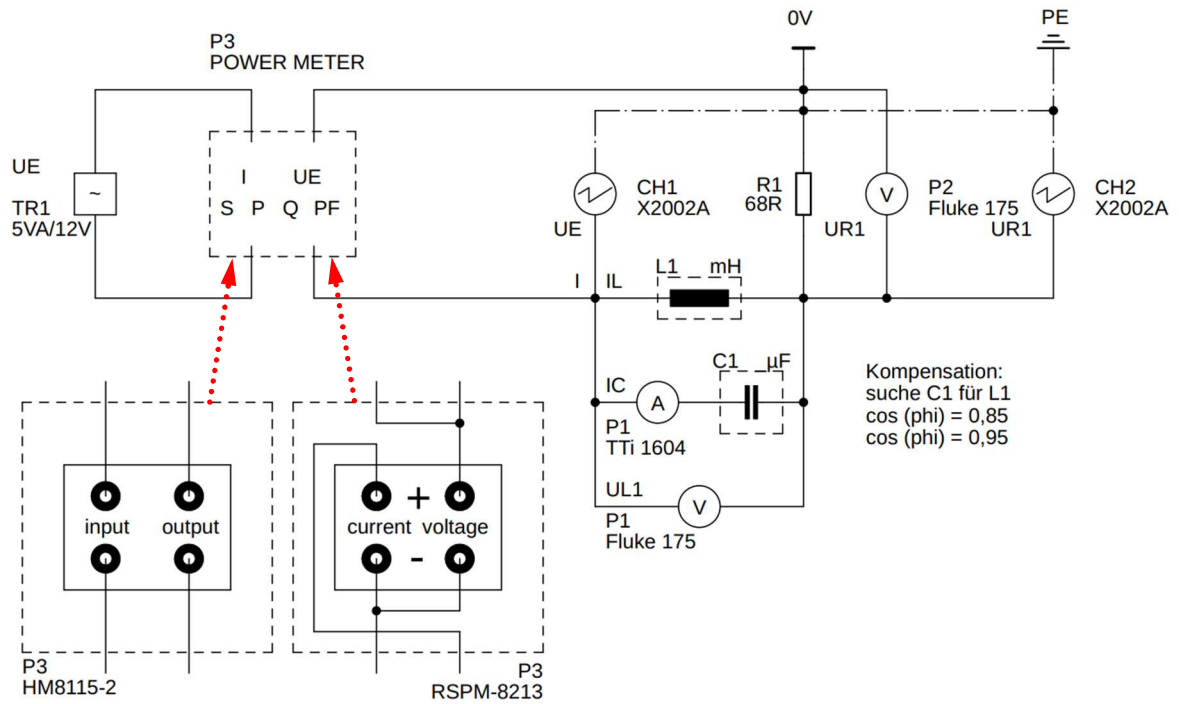


Abbildung 8: Blindstromkompensation

## Grundlagen

### Scheitelwert, Effektivwert, Gleichrichtwert, Form- und Scheitelfaktor

**Scheitelwert (*peak value*):** Der größte Betrag der Augenblickswerte eines Wechselsignals wird bei sinusförmigen Signalen als Amplitude bezeichnet.

z.Bsp. Scheitelwert der Spannung:  $U_s, U_p, U_0, \hat{U}$

**Effektivwert (*root mean square, RMS*):** Jener Wert einer Gleichspannung / eines Gleichstromes, die / der an einem ohmschen Widerstand im zeitlichen Mittel die gleiche Leistung wie die entsprechende Wechselspannung / der entsprechende Wechselstrom abgibt:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (5)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (6)$$

**Gleichrichtwert (*average rectified value, ARV*):** Mittelwert des Betrages der Spannung / des Stromes:

$$U_{gl} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (7)$$

$$I_{gl} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (8)$$

**Formfaktor (*form-factor*):** Verhältnis von Effektivwert zu Gleichrichtwert

$$f_f = \frac{U_{eff}}{U_{gl}} \quad (9)$$

$$f_f = \frac{I_{eff}}{I_{gl}} \quad (10)$$

Einige Messinstrumente stellen aufgrund ihres inneren Aufbaus nur den Gleichrichtwert dar. Zur Anzeige des Effektivwertes wird der Messwert / die Anzeige mit dem Formfaktor multipliziert (siehe „Messung des Effektivwertes über den Mittelwert“).

**Scheitelfaktor (*crest-factor*):** Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert

$$f_s = \frac{U_s}{U_{eff}} \quad (11)$$

$$f_s = \frac{I_s}{I_{eff}} \quad (12)$$

Ein hoher Scheitelfaktor bedeutet einen größeren Anteil an Oberwellen höherer Ordnung. Dies tritt bei nichtlinearen Lasten im Wechselstromnetz auf, führt zu vermehrter Blindleistungsaufnahme und ist daher unerwünscht.

### Messung des Effektivwertes über den Mittelwert

Beschränkt sich der Einsatz eines Messgerätes auf die Erfassung von rein **sinusförmigen** Spannungen und Strömen, kann die Messung des Effektivwertes vereinfacht werden. Mit Hilfe eines Gleichrichters bildet man den Betrag der elektrischen Größe und in weiterer Folge unter Einsatz eines Tiefpassfilters den zeitlichen Mittelwert dieses Betrages.

Rechnerisch ergibt sich der Mittelwert für eine Spannung durch die Integration über eine halbe Periode mit:

$$|\bar{U}| = |\overline{u(t)}| = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \hat{U} \cdot \sin(\omega t) dt = \dots = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{U} \quad (13)$$

Ein nach diesem Prinzip arbeitendes Messgerät zeigt nicht den gewünschten Spannungswert  $U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ , sondern tatsächlich  $|\bar{U}| = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{U}$ . Bei sinusförmigen Größen kann ein als „Formfaktor“ bezeichneter Korrekturwert eingeführt werden:

$$K_{sin} = \frac{U_{eff}}{|\bar{U}|} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \approx 1,11 \quad (14)$$

Diese Korrektur kann bei Messgeräten mit analogen Anzeigen (Drehspulinstrument) z. Bsp. durch Anpassung der Skalenbeschriftung, bei einfachen Messgeräten mit digitalen Anzeigen etwa durch Umrechnung oder auch vor der Digitalisierung durch Multiplikation (Analogverstärker mit Verstärkung  $K_{sin}$ ) durchgeführt werden (Messgerät P2 = M 4600 in Abbildung 2). Diese Variante der Messung des Effektivwertes führt hier **nur bei sinusförmigen Größen** zu einem richtigen Ergebnis. Im Rahmen einer möglichen Anpassung des Formfaktors kann diese Art der Messung auf andere Signalformen erweitert werden.

### „True“-RMS-Messung

Messgeräte, die den Effektivwert tatsächlich messen (und nicht den gleichgerichteten Mittelwert), arbeiten nach einem der folgend beschriebenen Prinzipien:

**Thermische Umformung:** Hier heizt die zu messende **Wechselgröße** einen Widerstand auf. Die dabei erreichte Temperatur wird als Sollwert für einen zweiten identischen thermischen Umformer verwendet, welcher aber mit **Gleichspannung bzw. -strom** betrieben wird. Bei Temperaturgleichstand wird in beiden Umformern die gleiche elektrische Leistung umgesetzt. Die im zweiten Umformer dafür benötigte Gleichgröße ist somit per Definition:

$$U_{eff} = U_{RMS} \quad \text{bzw.} \quad I_{eff} = I_{RMS}$$

**Analoge Berechnung:** Dazu verwendet man analoge Rechenglieder, um die Definitionsgleichung nachzubilden:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\overline{u^2(t)}} \quad (15)$$

Am Beispiel der Spannung sieht man, dass der Effektivwert durch einen Quadrierer (Bildung von  $u^2(t)$  aus  $u(t)$ ), der Bildung des zeitlichen Mittelwertes  $\overline{u^2(t)}$  mit einem Tiefpassfilter als Integrierer und der darauffolgenden Bildung der Wurzel aus dem Mittelwert  $\sqrt{\overline{u^2(t)}}$  mit einem Radizierer mit Hilfe von Analog-Rechenschaltungen bestimmt werden kann. Diese sind als integrierte Schaltungen in kompakter Form erhältlich. Das Ergebnis der Rechnung findet in der englischsprachigen Bezeichnung des Effektivwertes seine Berücksichtigung:

$$RMS = \text{„root mean square“} = \text{quadratisches Mittel}$$

**Numerische Berechnung:** In modernen digitalen Messgeräten wird die elektrische Messgröße sehr schnell abgetastet (digitalisiert) und steht in Form von numerischen Werten im Messgerätespeicher zur Verfügung. Aus dieser zeitdiskreten Signalfolge kann mit Rechenprogrammen der **Effektivwert entsprechend der Definitionsgleichung numerisch berechnet** werden. Daneben können weitere Signalkenngrößen wie Minimum, Maximum, AC-RMS, DC-RMS, Gleichrichtwert usw. berechnet werden, wie dies u.a. bei den Oszilloskopen der Serie *DSO-X20xx* angeboten wird.

Für die richtige Messung des Effektivwertes nach der „**True**“-RMS-Methode ist die **Form des Signals unerheblich** – die Einhaltung der Spannungsgrenzen vorausgesetzt. Jedoch sorgt die Signalfrequenz für Einschränkungen. Bedingt durch die Bandbreite der verwendeten Komponenten ergibt sich bei RMS-Convertern (Analog-Rechenschaltungen) eine obere Grenzfrequenz in der Größe von einigen MHz, bei den numerisch rechnenden Standard-Labormessgeräten liegt diese bei einigen hundert kHz.

Einzig die Methode der thermischen Umformung findet auch im Hochfrequenzbereich bei einer Signalfrequenz von mehreren GHz noch ihre Anwendung.

## Dreheisenmesswerk

Das Prinzip fußt auf der gleichsinnigen Magnetisierung zweier Eisenkerne, welche sich innerhalb einer stromdurchflossenen Spule befinden. Da ein Eisenkern mit einem Zeiger versehen und drehbar angeordnet ist, bewirkt die entstehende Reluktanzkraft (Maxwell'sche Kraft) eine Abstoßung zwischen den beiden Kernen mit einem daraus resultierenden Ausschlag. Dabei spannt sich eine Feder, welche für das Gleichgewicht zwischen Feder- und Reluktanzkraft sorgt.

Die Reluktanzkraft ist proportional zum Quadrat des Spulenstromes und schwankt mit der doppelten Frequenz. Durch entsprechende Maßnahmen im Aufbau des Messwerkes kann erreicht werden, dass der Ausschlag annähernd eine lineare Funktion des Stromes wird. Ist die Massenträgheit des Messwerkes groß genug, stellt sich der Zeiger auf den Mittelwert ein, sodass der Effektivwert dieses Stromes angezeigt wird. Dreheisenmesswerke sind zur Messung von Gleich- und Wechselstrom verwendbar. Mit steigender Signalfrequenz steigen auch die inneren Verluste durch Ummagnetisierung und Wirbelströme. Da dies zu einem geringeren Ausschlag führt, wird das Messwerk bei Bedarf auf höhere Arbeitsfrequenzen kalibriert.

Die Dreheisenmesswerke werden heute noch im Anlagen- und Schaltschrankbau eingesetzt.

Das in der Übung eventuell verwendete **Analoginstrument „Unigor“** besitzt ein **Drehspulmesswerk!**

## Wechselstromwiderstand

### Realer induktiver Wechselstromwiderstand - Spule:

Die gewünschte Haupteigenschaft einer Spule als passives Bauelement ist ihre definierte Induktivität. Daher präsentiert sich die Spule im Allgemeinen als Wicklung eines elektrischen Leiters, der bei Stromfluss ein Magnetfeld erzeugt. Die Induktivität wird dabei von sehr vielen Faktoren wie Signalfrequenz, Wicklungsart, -länge und -durchmesser, Eigenschaften des Wicklungs- und Kernmaterials usw. stark beeinflusst. Verschiedene Ersatzschaltbilder je nach Einsatzgebiet nehmen darauf Rücksicht und ermöglichen eine vereinfachte rechnerische Handhabung des Bauteils.

Für die Untersuchungen an einer Spule im Rahmen dieser Übung genügt es, das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Serienschaltung der Induktivität  $L$  mit einem ohmschen Widerstand  $R_L$  als Wicklungswiderstand zu verwenden. Auf diverse zusätzliche Wirkwiderstände als Ausdruck verschiedener weiterer Verluste oder eine Parallelkapazität, welche bei höheren Frequenzen wirksam wird, kann hier verzichtet werden.



Abbildung 9: vereinfachtes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer Spule

### Realer kapazitiver Wechselstromwiderstand - Kondensator:

Der Kondensator als passives Bauelement zeichnet sich durch seine Fähigkeit, elektrische Ladung zu speichern, aus. Er besteht meist aus zwei elektrisch leitfähigen Platten – den Elektroden – in unterschiedlichsten Ausführungen, zwischen denen sich das Dielektrikum befindet. Die Kapazität wird dabei von sehr vielen Faktoren wie Signalfrequenz, Betriebsspannung, Eigenschaften des verwendeten Dielektrikums, klimatische Bedingungen wie Temperatur und Feuchte, Bauart, Betriebsstunden usw. stark beeinflusst. Verschiedene Ersatzschaltbilder je nach Einsatzgebiet nehmen darauf Rücksicht und ermöglichen eine vereinfachte rechnerische Handhabung des Bauteils.

Für die Untersuchungen an einem Kondensator im Rahmen dieser Übung genügt es, das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Parallelschaltung der Kapazität  $C$  mit einem ohmschen Widerstand  $R_I$  als Isolationswiderstand zu verwenden. Auf die Serienschaltung eines zusätzlichen Wirkwiderstandes als Ausdruck der Leitungs-, Übergangs- und dielektrischen Umpolverluste mit einer Serieninduktivität, welche bei höheren Frequenzen wirksam wird, kann hier verzichtet werden.

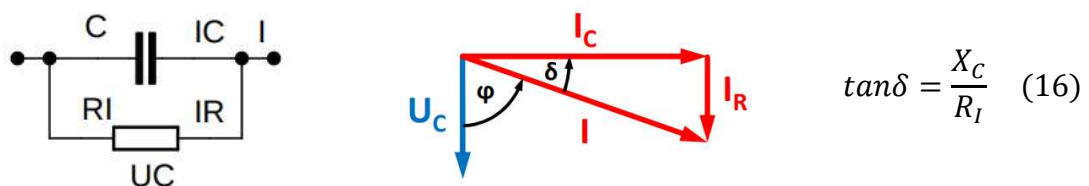


Abbildung 10: vereinfachtes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm eines Kondensators

## Leistung an Widerständen im Wechselstromkreis

*Hinweis: Im SI ist die Einheit der Leistung als Watt definiert. In Anlehnung an DIN 1301-1 werden für elektrische Blind- und Scheinleistung eigene Einheiten verwendet, sodass nur mehr die Wirkleistung mit der Einheit „Watt“ bezeichnet wird.*

**Wirkleistung:** An einem ohmschen Widerstand  $R$  sind sinusförmige Wechselspannung und –strom in Phase. Die im Widerstand umgesetzte zeitabhängige Leistung  $p(t)$  ist:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{U} \sin(\omega t) \cdot \hat{I} \sin(\omega t) = \hat{U} \cdot \hat{I} \sin^2(\omega t) = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} (1 - \cos(2\omega t)) \quad (17)$$

Die Augenblicksleistung pulsiert mit der doppelten Netzfrequenz. Der arithmetische Mittelwert dieser Augenblicksleistung ist

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (18)$$

und wird als Wirkleistung  $P$  mit der Einheit „Watt“ [W] bezeichnet. Es erfolgt am Widerstand eine Umwandlung von elektrischer in thermische Energie.

**Blindleistung:** An einem induktiven Widerstand  $X_L$  oder kapazitiven Widerstand  $X_C$  sind sinusförmige Wechselspannung und –strom um  $\varphi_L = +90^\circ$  oder  $\varphi_C = -90^\circ$  phasenverschoben.

Die im **induktiven Widerstand** umgesetzte zeitabhängige Leistung  $q(t)$  ist

$$\begin{aligned} q(t) &= u(t) \cdot i(t) = \hat{U} \sin(\omega t) \cdot (-\hat{I}) \cos(\omega t) = -\hat{U} \cdot \hat{I} \sin(\omega t) \cos(\omega t) \\ &= -\frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} \sin(2\omega t) \quad (19) \end{aligned}$$

und pulsiert mit der doppelten Netzfrequenz. Die aufgenommene und im selben Maß wieder an die Quelle abgegebene Leistung manifestiert sich im Auf- und Abbau des magnetischen Feldes und wird als induktive Blindleistung  $Q_L$  mit der Einheit „Var“ [var] (*frz. voltampère réactif*) bezeichnet. Der zeitliche Mittelwert der induktiven Augenblicksleistung ist Null.

Die im **kapazitiven Widerstand** umgesetzte zeitabhängige Leistung  $q(t)$  ist

$$q(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{U} \sin(\omega t) \cdot \hat{I} \cos(\omega t) = \hat{U} \cdot \hat{I} \sin(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} \sin(2\omega t) \quad (20)$$

und pulsiert mit der doppelten Netzfrequenz. Die aufgenommene und im selben Maß wieder an die Quelle abgegebene Leistung manifestiert sich im Auf- und Abbau des elektrischen Feldes und wird als kapazitive Blindleistung  $Q_C$  mit der Einheit „Var“ [var] (*frz. voltampère réactif*) bezeichnet. Der zeitliche Mittelwert der kapazitiven Augenblicksleistung ist Null.

**Scheinleistung:** An einer allgemeinen Impedanz  $Z$  sind sinusförmige Wechselspannung und –strom um den Winkel  $\varphi$  phasenverschoben.

Die in der Impedanz umgesetzte zeitabhängige Leistung  $s(t)$  ist

$$s(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{U} \sin(\omega t) \cdot \hat{I} \sin(\omega t + \varphi) = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2} \cdot (\cos(-\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)) \quad (21)$$



und pulsiert mit der doppelten Netzfrequenz. Das Produkt der Effektivwerte  $U \cdot I$  ist die Scheinleistung  $S$  mit der Einheit „Voltampere“ [VA]. Der zeitliche Mittelwert der Augenblicks-scheinleistung ist abhängig von  $\varphi$  und schwankt zwischen Null ( $Z$  rein induktiv oder kapazitiv) und dem Maximum ( $Z$  rein ohmsch).

Man denkt sich den Strom in zwei Komponenten zerlegt: den Teil  $I \cos \varphi$  in Phase mit  $U$  und den Teil  $I \sin \varphi$  um  $90^\circ$  phasenverschoben zu  $U$ . Die beiden Stromkomponenten erzeugen in Verbindung mit der Spannung  $U$  die Wirk- und Blindleistungskomponente.

$$\text{Wirkleistung: } P = U \cdot I \cos \varphi \quad (22) \qquad \text{Blindleistung: } Q = U \cdot I \sin \varphi \quad (23)$$

$$\text{Scheinleistung: } S = U \cdot I \quad (24) \qquad \text{Leistungsfaktor: } \cos \varphi = P/S \quad (25)$$

$$S, P \text{ und } Q \text{ bilden das Leistungs-dreieck: } S^2 = P^2 + Q^2 \quad (26)$$

### Blindstromkompensation

In einem elektrischen Netz wird nur der Teil  $P = U \cdot I_{\text{wirk}} = U \cdot (I \cos \varphi)$  als Wirkleistung übertragen. Die Differenz zur gesamten vom Netzbetreiber bereitgestellten Scheinleistung  $S$  findet sich in der Blindleistung  $Q$  (siehe Leistungs-dreieck). In den Zuleitungen fließt somit der mitunter deutlich größere Strom  $I$ . Die Dimensionierung der Zuleitungen erfolgt für diesen Strom  $I$ , der an ihnen zusätzliche Leitungsverluste (Wirkleistung) hervorruft.

Großabnehmer elektrischer Leistung wie Industriebetriebe bezahlen daher für die bezogene Scheinleistung, welche durch die Installation eigener Blindleistungszähler neben den herkömmlichen Wirkleistungszählern bestimmt wird. Diese erhöhten Abgaben können vermieden werden, wenn mit Hilfe einer sogenannten Blindstromkompensation der Zuleitungsstrom vermindert wird.

*Hinweis: Nachfolgende Ausführungen gelten mit entsprechender Anpassung auch für die Kompensation ohmsch-kapazitiver Lasten mittels Induktivität.*

Dazu schaltet man der in industriellen Netzen meist vorhandenen ohmsch-induktiven Last mit dem Phasenwinkel  $\varphi$  einen Kondensator parallel. Der nun zusätzlich fließende kapazitive Strom  $I_C$  ist zum induktiven Anteil  $I_L$  des Stromes  $I$  um  $180^\circ$  phasenverschoben. Für eine vollständige Blindstromkompensation müssen diese beiden Stromkomponenten gleich groß sein:

$$I_L = I_C \Rightarrow I \sin \varphi = \frac{U}{1/\omega C} \Rightarrow C = \frac{I \sin \varphi}{U \cdot \omega} \quad (27)$$

Dieser Vorgang kann auch als Blindleistungskompensation betrachtet werden. Dazu wird die induktive mit einer kapazitiven Blindleistung kompensiert:

$$Q_L = Q_C \Rightarrow U \cdot I \sin \varphi = \frac{U^2}{1/\omega C} \Rightarrow C = \frac{I \sin \varphi}{U \cdot \omega} \quad (28)$$

Üblicherweise wird keine vollständige Kompensation durchgeführt, je nach Netzanbieter liegt der erstrebenswerte Leistungsfaktor in der Größenordnung von:

$$0,85 \leq \cos \varphi \leq 0,95 \quad (29)$$

Diese Form der Blindstrom- oder Blindleistungskompensation findet nach diesem Prinzip ihre technisch-industrielle Anwendung. Allerdings stellen die schwankenden Belastungen durch den

Verbraucher erhöhte Anforderungen, da die zur Verfügung zu stellende Blindleistung ständig angepasst werden muss.

Obige Überlegungen gelten nur für Netze mit **linearen** Lasten.

**Nichtlineare Verbraucher** wie magnetisch sättigende Induktivitäten, getaktete Netzteile, Gleichrichter, USV's (unterbrechungsfreie Stromversorgungen), Frequenzumrichter und ähnliches entnehmen dem Netz nicht-sinusförmigen Strom, der neben der Grundwelle mehr oder weniger stark ausgeprägte Oberwellen enthält. Da die Kompensation solcher Lastfälle mit der Parallelschaltung eines entsprechenden Blindwiderstandes nur für **eine** Frequenz – üblicherweise die Netzfrequenz – erfolgen kann, werden die Oberwellenanteile über- oder unterkompensiert. Dies birgt unter anderem die Gefahr des Auftretens von Resonanzerscheinungen im Netz mit hohen Strömen und Spannungen.

**Abhilfe** schafft man hier durch den Einsatz von sogenannten Saugkreisen, das sind parallel geschaltete Spule-Kondensator-Kombinationen als Serienschwingkreise mit angepassten Frequenzen, welche Oberwellenströme durch das Impedanzminimum bei ihrer Resonanzfrequenz „absaugen“.

**Stand der Technik** ist die aktive Oberwellenkompensation, welche den zu kompensierenden Strom zeitlich aufgelöst misst und einen daraus berechneten Kompensationsstrom mittels komplexer Leistungselektronik in das Netz einspeist. Durch Verwendung von sogenannten „Digitalen Signalprozessoren“ mit entsprechender Rechenleistung können Reaktionszeiten im Bereich von einigen Mikrosekunden erreicht werden, sodass sich diese Art der Kompensation für Oberwellen bis in den oberen Kilohertzbereich auszeichnet. Somit kann die Blindleistungskompensation für nahezu jede Form des Stromes bewerkstelligt werden.

**Abbildungsverzeichnis:**

Abbildung 1: Steckbrett mit Bauteilen und 4mm-Buchsen .....	2
Abbildung 2: Untersuchung der Anzeige von Spannungsmessern .....	3
Abbildung 3: Bestimmung des Amplitudenganges von Spannungsmessern .....	4
Abbildung 4: Aufnahme der Phasenlage von Kondensatorstrom und –spannung.....	5
Abbildung 5: Aufnahme der Phasenlage von Spulenstrom und –spannung .....	6
Abbildung 6: Bestimmung von Phasenlage und elektrischer Leistung im RC-Kreis.....	7
Abbildung 7: Bestimmung von Phasenlage und elektrischer Leistung im RL-Kreis .....	8
Abbildung 8: Blindstromkompensation .....	10
Abbildung 9: vereinfachtes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer Spule.....	14
Abbildung 10: vereinfachtes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm eines Kondensators.....	14

**Vorbereitung****Effektivwert:**

Leiten Sie die Effektivwerte für folgende Kurvenverläufe her und berechnen Sie die dazugehörigen Form- und Scheitelfaktoren:

Sinus:

$$u(t) = \hat{U} \sin(\omega t) \quad (30)$$

Dreieck:

$$u(t) = \hat{U} \cdot \frac{4}{T_0} \cdot t, \quad t \in \left[0, \frac{T_0}{4}\right] \quad (31)$$

Rechteck:

$$u(t) = \hat{U}, \quad t \in \left[0, \frac{T_0}{2}\right] \quad (32)$$

*Hinweis:*

$$\int \sin^n(ax) dx = -\frac{\sin^{n-1}(ax) \cdot \cos(ax)}{na} + \frac{n-1}{n} \int \sin^{n-2}(ax) dx \quad n \text{ ganzzahlig, } > 0 \quad (33)$$

**Leistung im Wechselstromkreis:**

Zeichnen und interpretieren Sie die sinusförmigen Spannungs-, Strom- und Scheinleistungskurven für folgende Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung:

$\varphi_a = 0^\circ$ ,  $\varphi_b = 90^\circ$  und  $\varphi_c = -45^\circ$ .

(Arbeiten Sie computerunterstützt und verwenden Sie z. Bsp. "QtiPlot")

**Kontrollfragen**

- Was ist der Effektivwert / Gleichrichtwert / Spitzenwert einer Spannung / eines Stromes?
- Wozu dienen die Angaben von Form- und Scheitelfaktor?
- Welche Kenngrößen weist unser einphasiges Wechselstromnetz an der Steckdose auf?
- Wie berechnet man den „Widerstand“ eines Kondensators / einer Induktivität?
- Beschreiben Sie den zeitlichen Verlauf von Spannung, Strom und Leistung an einem ohmschen Widerstand / einer Induktivität / einem Kondensator im Wechselstromnetz.
- Beschreiben Sie den zeitlichen Verlauf von Spannung, Strom und Leistung in einem RC / RL-Kreis im Wechselstromnetz.
- Was versteht man unter Wirk-, Blind- und Scheinleistung?
- An welchen Bauelementen können Wirk-, Blind- und Scheinleistung umgesetzt werden?
- Nennen Sie Auswirkungen dieser Leistungsumsetzungen.
- Was versteht man unter Wirk-, Blind- und Scheinwiderstand?
- Wie und unter welchen Voraussetzungen kann man die oben genannten Größen eines Wechselstromnetzes in einem Zeigerdiagramm darstellen?
- Unterschiede zwischen idealen und realen induktiven bzw. kapazitiven Wechselstromwiderständen?
- Welches Funktionsprinzip / welches Schaltungsprinzip liegt der Blindleistungskompensation zugrunde?
- Welche Vorteile bietet die Blindleistungskompensation?
- Erklären Sie das Prinzip der Blindleistungskompensation aus Abbildung 8.
- Wie kann man die Phasenlage zwischen Strom und Spannung mit dem Oszilloskop messen?
- Warum werden „trueRMS“ – Messgeräte als solche bezeichnet?
- Welche prinzipiellen Möglichkeiten der messtechnischen Bestimmung der Effektivwerte von Strom und Spannung kennen Sie?
- Gibt es einen Effektivwert der Leistung? Warum – warum nicht?

## ***Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes***

- Aufgabenstellung
- Voraussetzungen und Grundlagen: *Kurze Beschreibung der in der Elektrotechnik üblichen Werte zur Charakterisierung einer Wechselgröße und deren prinzipiellen messtechnischen Ermittlung. Erklären Sie das Verhalten von Widerständen im Wechselstromkreis. Fassen Sie sich kurz (insgesamt maximal 2 Seiten) und zitieren Sie (Bücher aber keine Skripten)!*
- Geräteliste
- Für jedes der durchgeführten Experimente:
  - Beschreibung der Versuchsanordnung: *Skizze der Schaltpläne (die Schaltpläne aus diesem Skriptum können verwendet werden) und Beschreibung der Funktion: Was wollen Sie herausfinden, was messen Sie und wie kann man die Messungen auswerten.*
  - Versuchsdurchführung/Messergebnisse/screenshots
- Auswertung: ***Unsicherheitsanalyse und Diskussion allfälliger Abweichungen*** von zu erwartenden Ergebnissen bei allen Punkten.
  - zu 1.: *Berechnen Sie die Effektivwerte der drei Spannungsformen anhand Ihrer vorbereiteten Ableitungen, ausgehend vom mit dem Oszilloskop gemessenen Spitzenwert. Vergleichen Sie die Messergebnisse untereinander und mit den berechneten Effektivwerten und erklären Sie allfällige Abweichungen (Messprinzipien der verwendeten Spannungsmessgeräte).*
  - zu 2.: *Berechnen und zeichnen Sie den Verlauf des Amplitudenganges der Anzeigen der Spannungsmesser ( $U_{A1} - U_{A3}$ ) in Relation zur Anzeige am Oszilloskop ( $U_E$ ) über die Frequenz des Spannungssignals. Verwenden Sie für die Darstellung der Frequenz einen logarithmischen Maßstab. Diskutieren Sie die auftretenden „Grenzfrequenzen“ – ab welcher Signalfrequenz wird ein Messgerät unbrauchbar? Vergleichen Sie Ihre Messungen mit den Angaben in den Datenblättern.*
  - zu 3.: *Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen Kondensatorspannung und –strom und zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Zeigerdiagramm aller auftretenden Spannungen und des Stromes.*
  - zu 4.: *Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen Spulenspannung und –strom und zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Zeigerdiagramm aller auftretenden Spannungen und des Stromes.*
  - zu 5.: *Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  im RC-Kreis und zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Zeigerdiagramm aller auftretenden Spannungen und des Stromes. Berechnen Sie anhand der Ergebnisse der Messungen mit den Multimetern die Kapazität des Kondensators  $C_1$  bei gegebenem  $R_1$ , die Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  und die im RC-Kreis auftretenden Leistungen. Zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Leistungsdreieck. Vergleichen Sie Ihre Leistungsberechnungen mit den Messergebnissen des*

*Leistungsmessers.*

- zu 6.: Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  im RL-Kreis und zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Zeigerdiagramm aller auftretenden Spannungen und des Stromes. Berechnen Sie anhand der Ergebnisse der Messungen mit den Multimetern die Induktivität der Spule  $L_1$  bei gegebenem  $R_1$ , die Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  und die im RL-Kreis auftretenden Leistungen. Zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Leistungsdreieck. Vergleichen Sie Ihre Leistungsberechnungen mit den Messergebnissen des Leistungsmessers.
- zu 7.: Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen Spannung  $U_E$  und Strom  $I$  im RLC-Kreis für jeden Kompensationsversuch. Stellen Sie die Phasenverschiebung, den Gesamtstrom  $I=I_R$ , den Strom durch die Spule  $I_L$  bzw. durch den Kondensator  $I_C$  als Funktion des Verhältnisses  $X_L$  zu  $X_C$  dar. Zeichnen Sie ein **maßstabsgetreues** Zeigerdiagramm aller auftretenden Spannungen und Ströme für die beiden Kompensationsversuche mit  $\cos\varphi$ , berechnen Sie die Induktivität  $L_1$  bei bekannter Kapazität  $C_1$  und vergleichen Sie das Ergebnis mit jenem aus Aufgabe 6.
- Diskussion: Kurze Reflexion über die durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse.
- Zusammenfassung: Angabe aller wesentlichen Messergebnisse mit Unsicherheiten; Verweise auf wesentliche Diagramme (Abbildung Nr., Seite).
- Ev. Literaturverzeichnis und Quellenangabe

## **Literatur**

- *Experimentalphysik 2*, W. Demtröder, Springer Verlag, 4. Auflage, Kap. 5.2 „Wechselstrom“, Seite 146 ff.
- *Experimentalphysik 2*, W. Demtröder, Springer Verlag, 4. Auflage, Kap. 5.4 „Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme“, Seite 151 ff.
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkleistung>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Blindleistung>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Scheinleistung>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert>