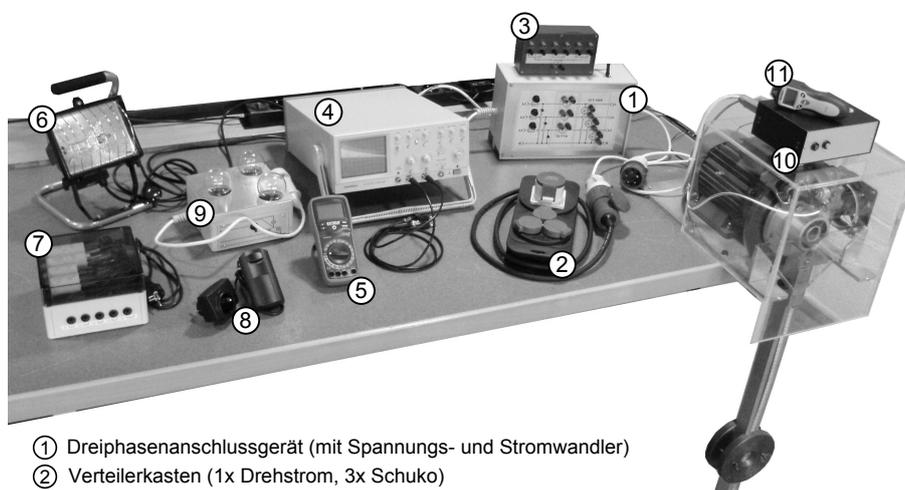


## 5 Elektrik

Die zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie, sowohl für Kleingeräte im Haushalt wie auch für Großmaschinen in der Industrie, stellt eine selbstverständliche Erfahrung unseres Alltags dar. Die elektrische Energie wird dabei fast ausschließlich in Form von Wechselstrom bereitgestellt. Dieser Versuch soll sich mit den Grundlagen zu diesem wichtigen Thema beschäftigen. Neben den grundlegenden Begriffen und Größen des Ein- und Dreiphasenwechselstroms lernen Sie insbesondere auch die unterschiedlichen Arten von elektrischen Verbrauchern und deren Leistungscharakteristik kennen. Dieser Versuch bietet die Möglichkeit, dass Sie Messungen zu diesem Thema am "echten" Stromnetz durchführen können.



- ① Dreiphasenanschlussgerät (mit Spannungs- und Stromwandler)
- ② Verteilerkasten (1x Drehstrom, 3x Schuko)
- ③ Analog-Multiplizierer und -Addierer
- ④ Oszilloskop
- ⑤ Digitalmultimeter (true-rms)
- ⑥ Halogenstrahler
- ⑦ Kondensator-Box
- ⑧ Phasenanschnittsteuerung
- ⑨ Glühlampen in Sternschaltung
- ⑩ Drehstromasynchronmotor mit Steuergerät
- ⑪ Drehzahlmesser

### 5.1 Einphasenwechselstrom und Dreiphasenwechselstrom

Der aus dem Haushalt bekannte Einphasenwechselstrom kann den sogenannten Schuko (= Schutzkontakt-) Steckdosen entnommen werden. Dabei wird die elektrische Leistung über zwei Leitungen transportiert, wobei auf der einen Leitung die "Spannung" oder "Phase" anliegt, während die andere Leitung den sogenannten "Nullleiter" (auch neutraler Leiter oder Nullpunktleiter genannt) darstellt. Hinzu kommt noch der sogenannte Schutzleiter (Schutzerde), der stets auf Erdpotential liegt. Im Gegensatz zum Nullleiter, der ebenfalls auf Erdpotential liegt<sup>1</sup>, trägt der Schutzleiter (zumindest bei intakten Geräten) aber keinen Stromfluss.

<sup>1</sup>Dies gilt nur näherungsweise. Wenn Geräte mit hohem Strombedarf (hohe Stromstärke) angeschlossen sind, so führt der Zuleitungswiderstand im Nullleiter zu einem gewissen Spannungsabfall, sodass der Nullleiterkontakt eine kleine Spannung gegenüber dem Erdpotential aufweisen kann.

Ein Dreiphasenwechselstromanschluss (= Drehstromanschluss) hat drei spannungsführende Leiter bzw. Phasen, einen Nullleiter und einen Schutzleiter. Insgesamt hat ein Drehstromstecker daher 5 Kontakte. Alle drei Phasen führen jeweils eine sinusförmige Spannung gegenüber dem Nullleiter, wobei die Spannungsverläufe jedoch um  $120^\circ$  zueinander verschoben sind. Daher besteht auch jeweils zwischen zwei der Phasen eine elektrische Spannung.

Den Einphasenwechselstrom erhält man einfach dadurch, dass man nur eine der drei Phasen und den Nullleiter des Dreiphasenwechselstroms verwendet. In der Praxis werden in einem Haushalt die angelieferten drei Phasen des Dreiphasenwechselstroms auf verschiedene Einphasenwechselstromsteckdosen verteilt. Da in diesem Versuch sowohl Messungen mit Einphasen- wie auch mit Dreiphasenwechselstrom gemacht werden, verwenden wir ein Dreiphasenanschlussgerät, an dessen Ausgang (über einen Verteilerkasten mit Schuko- und Drehstromsteckdose(n)) entweder nur eine oder auch alle drei Phasen verwendet werden können.

## 5.2 Elektrotechnische Grundlagen

### 5.2.1 Effektivwerte

Bei Wechselspannungen und -strömen hat man es (im Gegensatz zu Gleichspannungen und -strömen) mit sich zeitlich ändernden Größen  $U(t)$  und  $I(t)$  zu tun. In der Regel ändern sich diese periodisch (aber nicht immer sinusförmig). Eine wichtige Größe zur Charakterisierung einer Wechselspannung ist der sogenannte Effektivwert  $U_{\text{eff}}$ :

*Unter dem Effektivwert  $U_{\text{eff}}$  einer Spannung versteht man denjenigen Spannungswert, den eine Gleichspannung haben muss, um an einem ohmschen Widerstand die gleiche über die Zeit gemittelte Leistung zu bewirken, wie die angelegte Wechselspannung.*

Da für die an einem ohmschen Widerstand  $R$  umgesetzte Leistung zu jedem Zeitpunkt gilt  $P(t) = U(t)^2/R$  und gelten soll  $\overline{P(t)} = U_{\text{eff}}^2/R$  folgt für den Effektivwert der Spannung:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} \quad (5.1)$$

Aufgrund dieses Zusammenhangs bezeichnet man den Effektivwert auch als den rms (root mean square) Wert, also die Wurzel aus dem zeitlichen Mittel das Quadrats. Analog gilt für den Effektivwert der Stromstärke:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt} \quad (5.2)$$

Hat man es mit einem sinusförmigen Spannungsverlauf  $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$  bzw. Stromstärkeverlauf  $I(t) = I_0 \sin(\omega t)$  zu tun, so können die Integrale konkret ausgewertet werden und man erhält:

$$U_{\text{eff,sinus}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad \text{bzw.} \quad I_{\text{eff,sinus}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Elektrische Leistung

Anstelle der konstanten elektrischen Leistung bei Gleichstrom tritt bei Wechselstrom die zeitabhängige Momentanleistung  $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ . Diese kann je nach Art des Verbrauchers sehr unterschiedliche Verläufe annehmen. Die Leistung kann positiv, negativ oder im allgemeinen Fall zeitlich wechselnd positiv und negativ sein. Wenn die Momentanleistung positiv ist, entzieht der Verbraucher dem Netz Energie, wenn sie negativ ist, gibt der Verbraucher Energie an das Netz ab bzw. an das Netz zurück. Aufgrund dieses Sachverhalts macht es Sinn, unterschiedliche Leistungsbegriffe mit jeweils eigenem Einheitenzeichen einzuführen:

#### Wirkleistung $P_W$

Die Wirkleistung  $P_W$  ist die im zeitlichen Mittel am Verbraucher umgesetzte Leistung und ergibt sich aus dem Integral der Momentanleistung<sup>2</sup>:

$$P_W = \overline{P(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad (5.4)$$

Die Einheit der Wirkleistung ist W (Watt).

Im Falle sinusförmiger Spannungen und Ströme (lineare Verbraucher) kann dieses Integral wiederum ausgewertet werden und man erhält:  $P_W = U_{\text{eff,sinus}} \cdot I_{\text{eff,sinus}} \cdot \cos \phi$  mit dem sogenannten Leistungsfaktor  $\cos \phi$ . Die Größe  $\phi$  bezeichnet die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

#### Scheinleistung $P_S$

Die Scheinleistung  $P_S$  berechnet sich zu

$$P_S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \quad (5.5)$$

und hat die Einheit VA (Voltampere). Die Scheinleistung ist diejenige Leistung, die der Energieversorger bereitstellen (können) muss, auch wenn nur eine (deutlich) geringere Wirkleistung umgesetzt wird. Unnötig hohe Scheinleistungen sind in Energieversorgungsnetzen möglichst zu vermeiden, da hohe Scheinleistungen große Stromstärken mit sich bringen. Zum einen müssen dafür alle Netzkomponenten (Zuleitungen, Transformatoren, ...) unnötig überdimensioniert werden, zum anderen kommt es zu größeren Verlusten (in Form von Abwärme) in diesen Komponenten.

#### Blindleistung $P_B$

Die Blindleistung  $P_B$  schließlich ist die Leistung, die im zeitlichen Mittel keinerlei Wirkung am Verbraucher hervorruft.<sup>3</sup> Sie hat die Einheit var. Die Blindleistung hängt mit den beiden anderen Leistungsgrößen folgendermaßen zusammen:

$$P_S^2 = P_W^2 + P_B^2 \quad \text{bzw.} \quad P_B = \sqrt{P_S^2 - P_W^2} \quad (5.6)$$

<sup>2</sup>Die Wirkenergie (in kWh), also die über die Zeit aufakkumulierte Wirkleistung, ist diejenige Energiemenge, die der private Endverbraucher seinem Stromlieferanten bezahlen muss.

<sup>3</sup>Großverbraucher müssen (im Gegensatz zu Privatkunden) auch die Blindleistung bezahlen. Die Reduktion der Blindleistung ist hier also auch von wirtschaftlichem Interesse.

## 5.3 Arten von elektrischen Verbrauchern

Obwohl alle elektrischen Verbraucher an dieselbe (sinusförmige) Netzwechselfspannung angeschlossen werden, unterscheiden sich in der Regel die Stromstärken, die durch die Verbraucher fließen, erheblich in ihrem zeitlichen Verlauf. Zunächst lassen sich Verbraucher in zwei Großgruppen einteilen, nämlich in lineare und nicht-lineare Verbraucher:

### 5.3.1 Lineare Verbraucher

Lineare Verbraucher zeichnen sich dadurch aus, dass der sinusförmige Spannungsverlauf einen ebenfalls sinusförmigen Stromverlauf zur Folge hat. Allerdings tritt im Allgemeinen eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom auf. Die linearen Verbraucher lassen sich wiederum folgendermaßen unterteilen, wobei in der Praxis Mischungen aus unterschiedlichen Typen (z.B. ohmsch-induktiv) auftreten:

#### Ohmsche Verbraucher

Ein ohmscher Verbraucher stellt einen ohmschen Widerstand dar. Bei diesem ist zu jedem Zeitpunkt der Momentanwert der Stromstärke zum Momentanwert der Spannung direkt proportional. Dies führt dazu, dass Spannungs- und Stromstärkeverlauf in Phase sind. Zu den ohmschen Verbrauchern gehören z.B. Glühlampen aller Art und elektrische Heizungen.

#### Induktive Verbraucher

Induktive Verbraucher stellen eine induktive Last dar, die in der Regel eine Spule (mit Eisenkern<sup>4</sup>) enthält. Bei einer idealen induktiven Last eilt der Strom mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  der Spannung hinterher. Eine induktive Lastcharakteristik besitzen alle Geräte mit (klassischem) Netztransformator<sup>5</sup> sowie alle elektrisch betriebenen Motoren.

#### Kapazitive Verbraucher

Kapazitive Verbraucher besitzen die Lastcharakteristik eines Kondensators, die Stromstärke eilt der Spannung mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  voraus. Kapazitive Lasten werden zum Teil gezielt eingesetzt, um die Scheinleistung induktiver Lasten zu reduzieren (sogenannte Blindleistungskompensation).

### 5.3.2 Nicht-lineare Verbraucher

Nicht-lineare Verbraucher erzeugen Stromstärkeverläufe, die mehr oder weniger stark von der Sinusform abweichen. Diese Art von Verbraucher ist immer mehr auf dem Vormarsch (z.B. durch die Verwendung von Energiesparlampen anstelle von Glühlampen). Dabei entstehen durch den nicht-sinusförmigen Strom sogenannte Oberwellen im Stromnetz, was mathematisch durch die Fourier-Analyse beschrieben werden kann. Desweiteren kommt hier eine spezielle Art von Blindleistung ins Spiel, die als Verzerrungsblindleistung bezeichnet wird.

---

<sup>4</sup>Bei genauer Betrachtung stellt eine Spule mit Eisenkern keinen (guten) linearen Verbraucher mehr dar, weil Sättigungseffekte in der Magnetisierung des Eisenkerns zu Abweichungen vom linearen Verhalten führen.

<sup>5</sup>Durch die zunehmende Verbreitung elektronischer Transformatoren befinden sich klassische Netztransformatoren (d.h. Eisenkern mit Spulen) auf dem Rückzug.

## 5.4 Durchführung der Messungen

Die vorliegenden Versuche werden mit "echtem" Wechselstrom durchgeführt. Aufgrund der hohen Spannung können Messungen (von Spannung und Stromstärke) aus sicherheitstechnischen Gründen natürlich keinesfalls direkt an den Spannungsführenden Kontakten durchgeführt werden. Stattdessen wird ein Dreiphasenanschlussgerät verwendet, mit dem für jede Phase einzeln die Spannung (gegenüber dem Nullleiter) und die Stromstärke indirekt gemessen werden kann. Die Messung geschieht dabei über Strom- und Spannungswandler, die den jeweiligen Momentanwert in eine ungefährliche Niederspannung umsetzen und eine elektrische Trennung von der Netzspannung gewährleisten. Der Stromwandler liefert dabei für eine Stromstärke von 1 A eine Ausgangsspannung von 1 V, der Spannungswandler umsetzt eine Spannung von 100 V in eine Ausgangsspannung von 1 V. **Alle Messungen (auch diejenigen der Stromstärke) laufen also auf Messungen von Niederspannungen < 10 V hinaus, die an den Bananenbuchsen des Anschlussgeräts abgegriffen werden können.**

*Es ist bei diesem Versuch absolut verboten, Messungen direkt an den Steckdosen des Ein- bzw. Dreiphasenwechselstromnetzes durchzuführen!!!*

Um die elektrische Leistung bestimmen zu können, muss das Produkt aus Spannung und Stromstärke gebildet werden bzw. das Produkt aus den vom Anschlussgerät gelieferten Niederspannungen. Dazu befindet sich am Versuchsaufbau ein Gerät, welches Spannungen multiplizieren kann, ein sogenannter Analogmultiplizierer. Das konkrete Gerät besitzt insgesamt sechs Eingänge, von denen jeweils zwei miteinander multipliziert werden. Die drei Produkte werden dann vorzeichenrichtig addiert und durch 10 geteilt. Eingänge, an denen keine Spannung angelegt wird, werden intern auf 0 gesetzt und tragen nichts zur Summe bei. Falls also die Leistung eines Einphasenwechselstroms gemessen werden soll bleiben einfach vier der sechs Eingänge frei.

Wenn man die Umsetzungsfaktoren der Spannungswandler (100 V → 1 V) und der Stromwandler (1 A → 1 V) mitberücksichtigt, so bedeutet eine Ausgangsspannung von 0,1 V eine Leistung von 100 W. Vergessen Sie bitte nicht, den Multiplizierer an das 12 V- Steckernetzteil anzuschließen.

### 5.4.1 Messmethoden

Je nachdem, welche Größe gemessen werden soll, muss die entsprechende Messmethode angewandt werden:

#### Betrachtung des Spannungs- bzw. Stromstärkeverlaufes und Messung von Phasenverschiebungen

Da alle Experimente mit 50 Hz-Wechselstrom durchgeführt werden, benötigt man ein geeignetes Messgerät, wenn der tatsächliche Verlauf der Momentanwerte (also die Kurvenform) beobachtet werden soll. Zu diesem Zweck steht Ihnen ein einfaches, analoges Oszilloskop zur Verfügung, auf dem zwei unterschiedliche Signal gleichzeitig dargestellt werden können.

Die Messung der Phasenverschiebung zwischen zwei (sinusförmigen) Signalen ist ebenfalls mit dem Oszilloskop möglich. Der Phasenverschiebungswinkel  $\phi$  ergibt sich dabei folgendermaßen:

$$\phi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ \quad (5.7)$$

$\Delta t$  ist dabei die Zeitverschiebung zwischen beiden Signalen, während  $T$  die Periodendauer der Signale darstellt.

### Messung von Effektivwerten

Effektivwerte (für Spannung bzw. Strom) ergeben sich aus dem jeweiligen zeitlichen Verlauf von  $U(t)$  bzw.  $I(t)$  gemäß Gleichung 5.1 bzw. 5.2. Um Effektivwerte richtig zu ermitteln, benötigt man daher ein Messgerät, welches die den Gleichungen entsprechende Signalumformung korrekt durchführt. Dies ist jedoch nur bei sogenannten "True-rms"-Messgeräten der Fall. Im Praktikum steht Ihnen ein entsprechendes Multimeter zur Verfügung und soll für alle Effektivwertmessungen verwendet werden. Dabei muss das Gerät auf Wechselspannungsmessung ( $\sim$  bzw. AC) gestellt sein.<sup>6</sup>

### Messung von Wirkleistungen

Die Wirkleistung stellt das zeitliche Mittel der Momentanleistung dar (siehe Gleichung 5.4). Bei unseren Messungen wird diese Größe dadurch zugänglich, indem man das zeitliche Mittel (also den Gleichspannungsanteil) der Ausgangsspannung am Multiplizierer ermittelt. Dazu genügt es, mit dem Multimeter im Gleichspannungsbereich (= bzw. DC) diese Spannung zu bestimmen.

### Bestimmung von Schein- und Blindleistungen

Die in unseren Experimenten auftretenden Scheinleistungen können gemäß Formel 5.5 aus den gemessenen Effektivwerten für Spannung und Strom berechnet werden. Die Blindleistung kann dann aus Formel 5.6 erhalten werden.

## 5.5 Messaufgaben

### 5.5.1 Messungen am Einphasen-Wechselstromnetz

Der Verteilerkasten hat drei Schuko-Steckdosen, die alle an einer Phase des Drehstromanschlusses hängen (auf dem Anschlussgerät markiert). Für unsere Messungen zum Einphasen-Wechselstrom verwenden wir daher den Spannungs- und Stromwandler dieser Phase.

**Aufgabe 1 - Netzspannung** Schließen Sie den 1. Kanal des Oszilloskops an den Spannungswandler an. Auf dem Bildschirm sollten Sie nun den Spannungsverlauf sehen. Bestimmen Sie mit dem Oszilloskop nun die Spannungsamplitude  $U_0$  und berechnen Sie daraus den Effektivwert mit der Formel 5.3. Messen Sie nun direkt mit dem Multimeter den Effektivwert. Stimmen beide Werte überein?

Schließen Sie den 2. Kanal des Oszilloskops an den Stromwandler an. Wie groß ist die Stromstärke und weshalb ist dies so?

---

<sup>6</sup>Insbesondere preisgünstige Multimeter sind in der Regel keine "True-rms"-Messgeräte. Diese liefern nur dann korrekte Effektivwerte, wenn damit sinusförmige Spannungen gemessen werden, da dann der einfache Zusammenhang 5.3 gilt. Bei nicht-sinusförmigen Signalen entstehen dann hingegen (völlig) falsche Messwerte.

**Aufgabe 2 - Halogenstrahler** Stecken Sie nun den Halogenstrahler in eine der Schuko-Steckdosen des Verteilerkastens ein. Achten Sie bitte darauf, dass niemand von dem Licht geblendet wird. Welche Phasenbeziehung hat der am Oszilloskop angezeigte Strom relativ zur Spannung? Um welche Art von Verbraucher handelt es sich?

Schließen Sie nun den Multiplizierer an und betrachten Sie am Oszilloskop die Momentanleistung. Was können Sie über das Vorzeichen der Momentanleistung aussagen?

Messen Sie die Wirkleistung und bestimmen Sie die Scheinleistung (welche andere Größe brauchen Sie dazu noch?). Unterscheiden sich diese beiden Leistungen?

**Aufgabe 3 - Kondensator-Box** Stecken Sie nun anstelle der Halogenlampe die Kondensator-Box an der Schuko-Steckdose an. Sie können in Stufen den Kapazitätswert verändern.<sup>7</sup> Stellen Sie den Kapazitätswert auf  $5\ \mu\text{F}$  ein und betrachten Sie den Spannungs- und Stromverlauf am Oszilloskop. Ermitteln Sie die Phasenverschiebung  $\Delta\phi$ .

Bestimmen Sie in analoger Weise zum Halogenstrahler die Wirkleistung und die Scheinleistung. Wie groß ist die Blindleistung?

**Wichtiger Hinweis zur Durchführung:** Bevor Sie die Kondensator-Box ein- bzw. ausstecken, achten Sie bitte darauf, dass alle Kondensatoren ausgeschaltet sind (obere Schalterstellung). Das Zuschalten der Kondensatoren belastet die Schaltkontakte relativ stark. Schalten Sie daher bitte nicht unnötigerweise in schneller Folge ein und aus.

Eventuell können Sie beobachten, dass der Stromfluss hier bereits deutliche Abweichungen zu einem sauberen Sinussignal aufweist. Woher kommt dies? (Hinweis: Denken Sie daran, dass beim Kondensator für den Stromfluss gilt:  $I = \dot{Q} = C \cdot \dot{U}$ )

**Aufgabe 4 - Phasenanschnittsteuerung** Es ist nicht selten der Fall, dass die Leistung von elektrischen Verbrauchern geregelt werden soll. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Verwendung von sogenannten Phasenanschnitt- bzw. Phasenabschnittsteuerungen. Im Experiment soll nun der Halogenstrahler mit einer Phasenanschnittsteuerung ("Dimmer") betrieben werden. Betrachten Sie am Oszilloskop den Verlauf von Spannung und Strom während Sie mit der Steuerung die Leistung regeln (evtl. müssen Sie den Regler noch einschalten). Skizzieren Sie eine Periode von Spannung und Stromstärke bei einer mittleren Regel-Einstellung. Auf welchem Prinzip beruht die Leistungsregelung? Ist die Gesamtschaltung von Phasenanschnittsteuerung und Halogenstrahler ein linearer Verbraucher?

Bestimmen Sie die Wirkleistung und die Blindleistung bei der kleinsten einstellbaren Leistung. Betrachten Sie die Momentanleistung mit dem Oszilloskop.

Hinweis: Eventuell wird Ihnen auffallen, dass in diesem Experiment keine negative Momentanleistung auftritt, d.h. es pendelt hier keine klassische Blindleistung zwischen Energieversorger und Verbraucher hin- und her. Trotzdem führt der nicht-sinusförmige Stromstärkeverlauf zu einer Blindleistung, die in diesem Fall als "Verzerrungsblindleistung" bezeichnet wird. Sehr viele aktuelle Verbraucher (elektronische Geräte) erzeugen dies Art von Blindleistung, die dadurch verursachte zusätzliche Netzbelastung stellt ein zunehmendes Problem dar.

## 5.5.2 Messungen am Dreiphasen-(Drehstrom)-Netz

Im folgenden Abschnitt werden wir zu Messungen am Drehstromnetz übergehen.

<sup>7</sup>Es können unterschiedliche Kondensatoren parallel geschaltet werden. Die Kapazitätswerte addieren sich dabei. Die ohmschen Widerstände und die Spulen, die Ihnen in der Box evtl. auffallen, dienen nur dazu, die Stromspitzen beim Einschalten der Kondensatoren zu begrenzen bzw. die Kondensatoren nach dem Ausstecken definiert zu entladen.

**Aufgabe 5 - Phasen des Drehstroms** Schließen Sie die beiden Kanäle des Oszilloskops an die ersten beiden Spannungswandler des Anschlussgeräts an, sodass Sie die jeweilige Spannung gegenüber dem Nulleiter messen können. Bestimmen Sie die Phasenverschiebung zwischen den beiden Phasen.

Messen Sie nun den Verlauf der Spannung **zwischen** den beiden Phasen (also nicht die Spannung relativ zum neutralen Leiter). Verwenden Sie dazu die Möglichkeit des Oszilloskops zwei Signale zu addieren bzw. subtrahieren. Welche Kurvenform ergibt sich? Bestimmen Sie die Spannungsamplitude  $U_0$  des Differenzsignals und berechnen Sie daraus den zugehörigen Effektivwert (Gleichung 5.3).

**Aufgabe 6 - Glühlampen in Sternschaltung** Schließen Sie den Kasten mit den drei Glühlampen an die Drehstromsteckdose an, der Nullpunktleiter soll zunächst zugeschaltet sein. Achten Sie darauf, dass alle drei Lampen eingeschraubt sind. Trennen Sie nun den Nullpunktleiter mit dem Sternpunkt-Schalter ab. Leuchten die Lampen unverändert weiter? Was bedeutet dies?

Drehen Sie **mit dem Handschuh** (Achtung: Die Lampen werden sehr heiß!) nacheinander ein bzw. zwei Lampen locker. Was beobachten Sie jeweils? Können Sie dies erklären?

### 5.5.3 Drehstrommotor

Drehstrom-Asynchronmotoren sind die Arbeitspferde in einer Vielzahl von Anwendungen, bei denen elektrische Energie in mechanische Rotation oder Bewegung umgesetzt werden soll. Ein Drehstrommotor erzeugt in seinem Inneren ein magnetisches Drehfeld, in welchem ein sogenannter Kurzschlussläufer aufgrund von Wirbelströmen ein Drehmoment erfährt und (mit einem gewissen Schlupf) dem Drehfeld folgt. Da der Kurzschlussläufer nicht mit externen Strömen (z.B. über Kohlebürsten) versorgt werden muss, ist der Asynchronmotor sehr langlebig und quasi wartungsfrei.

**Aufgabe 7 - Wechselstromcharakteristik** Zunächst soll untersucht werden, welche Art von elektrischer Verbraucher der Asynchronmotor darstellt. Dazu genügt es, eine der drei Phasen zu untersuchen, da aufgrund der symmetrischen Bauweise des Motors in allen drei Phasen die gleichen Vorgänge ablaufen (wenn auch phasenverschoben zueinander). Schließen Sie die beiden Kanäle des Oszilloskops wie bei den Messungen zum Einphasen-Wechselstrom an den Spannungs- bzw. Stromwandler der markierten Phase an. Nehmen Sie nun den Asynchronmotor in Betrieb.<sup>8</sup> Achten Sie bitte darauf, dass beim Einschalten kein Druck an der Bremse anliegt. Betrachten Sie den Verlauf von Spannung und Stromstärke. Wie würden Sie den Motor gemäß der Einteilung unter 5.3 charakterisieren? Bestimmen Sie die im Leerlauf aufgenommene Wirkleistung und die Scheinleistung.

---

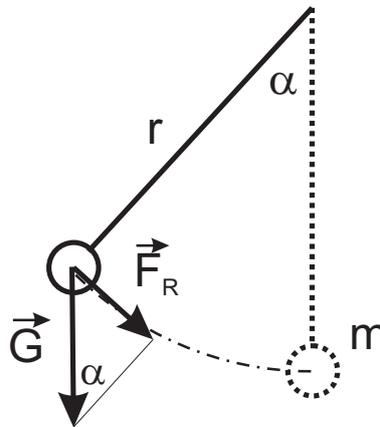
<sup>8</sup>**Hinweise zur Bedienung des Motors, der Bremse und des Pendels:** Das Steuergerät muss durch ein Steckernetzteil mit Strom versorgt werden. Sie starten/stoppen den Motor mit dem grünen/roten Knopf. Bei kurzfristiger Überlast spricht nach einigen Sekunden der Motorschutzschalter an, den Sie am Drehknopf zurücksetzen können. Wenn Sie den Motor längere Zeit überlasten, wirkt der Thermoschutz. Sie können den Motor dann so lange nicht mehr einschalten, bis die Wicklung wieder abgekühlt ist. Die Bremse (Audi-Scheibenbremse) wird mit Druckluft betätigt. Mit einem Druckminderer können Sie definiert die Bremskraft ändern. Der Druck steigt, wenn der Regelknopf hineingedreht wird. Das Bremsmoment messen Sie am Ausschlag des Pendels (die Masse des Pendelgewichts ist eingraviert; Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ; die Länge des Pendelarms sollten Sie selbst ermitteln). Die Drehzahl des Motors messen Sie mit einem Reflexionsdrehzahlmesser (richten Sie ihn auf die Marke auf der Flanschscheibe zwischen Motor und Bremsscheibe). Der Drehzahlmesser zeigt die Anzahl der Umdrehungen pro Minute an.

**Aufgabe 8 - Blindleistungskompensation** Die beim Drehstrommotor auftretende Blindleistung, die zu der hohen Scheinleistung führt, kann deutlich reduziert werden, indem Sie die Kondensatorbox in eine der Schuko-Steckdosen einstecken und eine geeignete Kapazität einstellen. Zeichnen Sie schematisch die gesamte Schaltung auf und erklären Sie, welcher Effekt dazu führt, dass die Blindleistung kompensiert werden kann.

Schalten Sie nun nacheinander verschiedene Kapazitätswerte ein und beobachten Sie am Oszilloskop den Verlauf von Spannung und Stromstärke. Versuchen Sie den Kapazitätswert zu ermitteln, bei dem Sie denken, dass die Blindleistung am besten kompensiert ist. Bestimmen Sie nun die Wirkleistung und die Scheinleistung, und zwar für Ihren optimierten Kapazitätswert sowie jeweils für zwei niedrigere und zwei höhere Kapazitätswerte. Tragen Sie alle Werte in ein Diagramm ein (Kapazität an x-Achse, Wirk- und Scheinleistungen an y-Achse). Um welchen Faktor kann die Scheinleistung bei optimaler Blindleistungskompensation gegenüber fehlender Kompensation reduziert werden (für diese eine Phase)?

**Aufgabe 9 - Elektrisch-Mechanisches Verhalten** Bei dieser abschließenden Aufgabe soll nun auch die vom Motor abgegebene mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}(n)$  bei verschiedenen Belastungszuständen betrachtet werden. Neben dem Drehmoment  $M(n)$  untersuchen wir dabei auch den Motorschlupf  $s(n)$ , die aufgenommene elektrische Wirkleistung  $P_W(n)$  und den Wirkungsgrad  $\eta(n)$  in Abhängigkeit der Motordrehzahl  $n$ .

Um den Motor mit einem bestimmten Drehmoment zu belasten, besitzt dieser eine pneumatisch betätigte Scheibenbremse, an welcher ein starres Pendel hängt. Der Pendelausschlag zeigt das wirkende Drehmoment an. Es gilt:



$$M = F_R \cdot r = G \cdot \sin(\alpha) \cdot r = m_{\text{Pendel}} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r \quad (5.8)$$

Die mechanische Leistung ergibt sich aus Drehmoment und Motordrehzahl über folgende Beziehung:

$$P_{\text{mech}}(n) = \omega \cdot M(n) = 2\pi \cdot n \cdot M(n) \quad (5.9)$$

Der Motorschlupf  $s(n)$  ist definiert als die relative Abweichung der Läuferdrehzahl  $n$  (d.h. der Motordrehzahl) von der Drehzahl des magnetischen Drehfeldes  $n_{\text{mag}}$ :

$$s(n) = \frac{n_{\text{mag}} - n}{n_{\text{mag}}} \quad (5.10)$$

Bei einem Drehstrommotor, der pro Phase ein (sich gegenüberliegendes) Spulenpaar besitzt, rotiert das magnetische Drehfeld mit der Netzfrequenz, also mit  $50 \text{ Hz} = 3000 \text{ min}^{-1}$ . Der hier verwendete Motor besitzt vier (entlang des Umfangs verteilte) Spulenpaare je Phase, dementsprechend gilt für das Drehfeld  $n_{\text{mag}} = 50/4 \text{ Hz} = 750 \text{ min}^{-1}$ .

Die vom Motor insgesamt (alle 3 Phasen) aufgenommene, elektrische Wirkleistung  $P_W$  soll folgendermaßen gemessen werden: für jede der drei Phasen wird Spannung- und Stromstärke (die Momentanwerte) multipliziert. Dann werden die Momentanleistungen aller drei Phasen zur Gesamtleistung addiert. Davon wird wieder der zeitliche Mittelwert bestimmt (DC-Messbereich).

Messen bzw. bestimmen Sie für mindestens 5 verschiedene Pendelausschläge die Größen  $n$ ,  $M(n)$ ,  $P_{\text{mech}}(n)$ ,  $s(n)$ ,  $P_W(n)$  und  $\eta(n) = P_{\text{mech}}(n)/P_W(n)$ . Beginnen Sie dabei mit dem Pendelausschlag  $\alpha = 0$ , also mit ungebremstem Motor (Der Motor ist nie ganz ungebremst, da die Bremsbeläge ständig an der Brems Scheibe anliegen.), und beschließen Sie die Messreihe mit dem Pendelausschlag  $\alpha_{\text{max}}$ , der sich bei abgewürgtem Motor einstellt. Tragen Sie Ihre Werte mit den richtigen Einheiten in folgende Tabelle ein:

$n$	$\alpha(n)$	$M(n)$	$P_{\text{mech}}(n)$	$s(n)$	$P_W(n)$	$\eta(n)$

Am Experimentierplatz hängt für jeden Motor (nummeriert) ein Diagrammblatt für das Drehmoment und den Wirkungsgrad. Tragen Sie Ihre Werte über der Drehzahl in das Diagramm ein.