

Graz University of Technology

Institut für Materialphysik der Technischen Universität Graz

LABORÜBUNGEN: Fortgeschrittenen Praktikum 1

Betreuer: Michael Stadlhofer

Übungstitel: Leistungsmessung
Gruppennummer: 1A

Name: Maximilian PHILIPP

Name: Matthias STARK

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 09.12.2022

WS 2022/23

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	4
2 Grundlagen	4
3 Versuchsanordnung	5
3.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis	5
3.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung	6
3.3 Symmetrische Last in Sternschaltung	8
3.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung	10
3.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch	11
3.6 Wirkleistungsmessung	11
3.7 Blindleistungsmessung	14
3.8 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors	15
4 Geräteliste	16
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	17
5.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis	17
5.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung	18
5.3 Symmetrische Last in Sternschaltung	19
5.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung	20
5.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch	21
5.6 Wirkleistungsmessung	21
5.7 Blindleistungsmessung	22
5.8 Bau eines rudimentärern Asynchron-Drehstrommotors	23
6 Auswertung	23
6.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis	24
6.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung	25
6.3 Sternschaltungen	27
6.4 Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz	31
6.5 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors	35
7 Diskussion	35
7.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis	35
7.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung vs in Sternschaltung	36
7.3 Sternschaltung sym. vs asym. vs asym. mit Bruch	36
7.4 Allgemeine Last in Sternschaltung	37
7.5 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors	38

8 Zusammenfassung	38
8.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis	38
8.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung	38
8.3 Sternschaltungen	38
8.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung	38
8.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch .	38
8.6 Wirkleistungsmessung	38
8.7 Blindleistungsmessung	38
8.8 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors	38

1 Aufgabenstellung

- Leistungsmessung einer ohmschen Last in einem Wechselstromkreis
- Wirkleistungsmessung im Drehstromnetz bei einer symmetrischen ohmschen Last in Stern- und Dreieckschaltung mit Aronschaltung
- Wirk- und Blindleistungsmessung bei einer allgemeinen Last im Dreiphasennetz
- Bauen eines rudimentärern Asynchron-Drehstrommotors

2 Grundlagen

Für die Wirkleistung P eines ohmschen Verbrauchers gilt unter Verwendung des Ohmschen Gesetzes, Gleichung 2, folgender Zusammenhang:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

$$U = R \cdot I \quad (2)$$

Dabei Beschreibt U die Spannung, I die Stromstärke und R den ohmschen Widerstand.

Werden im Wechselstromkreis nun Spulen oder Kondensatoren betrachtet, empfiehlt es sich komplexe Zahlen einzuführen, da hier die Impedanz Z betrachtet werden muss, die sich nach folgender Formel berechnet:

$$Z = R + iX \quad (3)$$

R bezeichnet dabei den Realteil des Widerstands der entsprechenden Last und X die entsprechende Reaktanz. Diese kann für Induktivitäten, X_L , und Kapazitäten, X_C , folgendermaßen berechnet werden:

$$X_L = i\omega L \quad (4)$$

$$X_C = -\frac{i}{\omega C} \quad (5)$$

L steht dabei für die Induktivität der Spule, C für die Kapazität des Kondensators und ω für die vorliegende Frequenz des Wechselstroms.

Mit der eingeführten Größe der Impedanz Z kann nun das ohmsche Gesetz folgendermaßen verallgemeinert werden:

$$U = Z \cdot I \quad (6)$$

Die komplexen Spannungen und Ströme werden am übersichtlichsten in einem Zeigerdiagramm dargestellt. Dazu empfiehlt sich folgende Schreibweise:

$$\underline{U} = U_{\text{eff}} \cdot e^{i(\omega t + \phi_U)} \quad (7)$$

$$\underline{I} = I_{\text{eff}} \cdot e^{i(\omega t + \phi_I)} \quad (8)$$

U_{eff} und I_{eff} entsprechen dabei der jeweiligen Größe, wenn sie ein rein ohmsche Verbraucher, ohne komplexe Anteile, wäre.

Dadurch kann die erhaltene Wirkleistung P folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$P = \text{Re}(\underline{U}\underline{I}^*) \quad (9)$$

Weiters können auch die vom System tatsächlich aufgewendete Scheinleistung, S , und die nicht nutzbare Blindleistung, Q , berechnet werden. [1]

$$S = \sqrt{\underline{U}\underline{U}^* \underline{I}\underline{I}^*} \quad (10)$$

$$Q = \text{Re}(\underline{U}\underline{I}^*) \quad (11)$$

3 Versuchsanordnung

3.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis

Um die ohmsche Last einer Glühlampe im Wechselstromkreis zu messen, wird folgender Versuchsaufbau aus Abbildung 1 realisiert.



Abbildung 1: Realer Versuchsaufbau für die Messung einer ohmschen Last

- 1 ... Transformator
- 2 ... seriell geschaltetes Strommessgerät
- 3 ... seriell geschaltetes Leistungsmessgerät mit parallelen Anschluss zum Verbraucher
- 4 ... ohmscher Verbraucher (Glühlampe)
- 5 ... parallel geschaltetes Spannungsmessgerät

3.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung

Um die Wirkleistung von symmetrischen Verbrauchern in einer Dreiecksschaltung zu messen, wird die Aronschaltung nach folgendem Schaltplan aus Abbildung 2 realisiert. Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 ersichtlich.

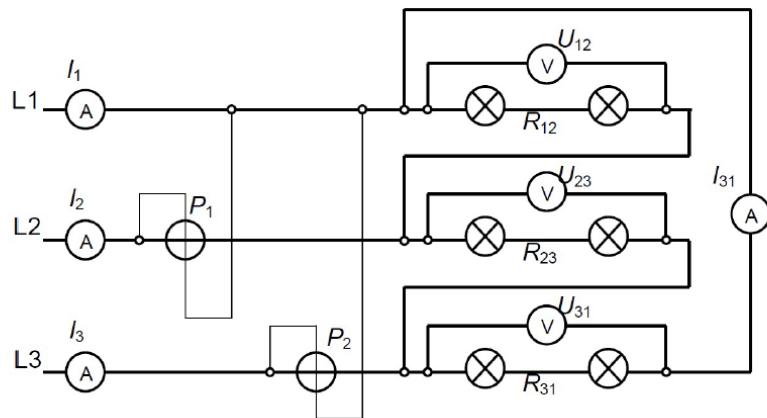


Abbildung 2: Schaltplan für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Dreiecksschaltung [1]

I_i ... entsprechende Ströme gemessen mit entsprechenden Amperemeter A

U_i ... entsprechende Spannungen gemessen mit entsprechenden Voltmeter V

R_i ... entsprechender Widerstand durch die jeweiligen Verbraucher

P_i ... Powermeter in Aronschaltung

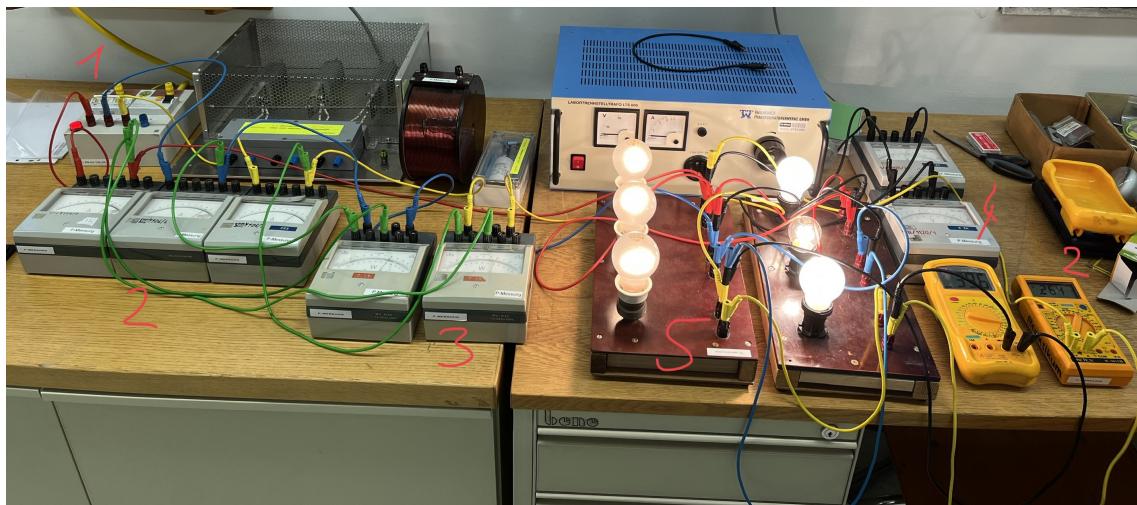


Abbildung 3: Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Dreiecksschaltung. (Bei den Kabeln wurde ein Farbschema eingehalten, um eine bessere Übersicht zu ermöglichen.)

- 1 ... Versorgungsspannung (L_1 rot, L_2 blau, L_3 gelb)
- 2 ... seriell geschaltete Strommessgeräte
- 3 ... seriell geschaltete Leistungsmessgeräte mit parallelen Anschlüssen nach der Aronschaltung (grün)
- 4 ... parallel geschaltete Spannungsmessgeräte über die entsprechenden Verbraucher (schwarz)
- 5 ... symmetrisch verteilte ohmsche Verbraucher (Glühlampen)

3.3 Symmetrische Last in Sternschaltung

Um die Wirkleistung von symmetrischen Verbrauchern in einer Sternschaltung zu messen, wird die Aronschaltung nach folgendem Schaltplan aus Abbildung 4 realisiert. Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 ersichtlich.

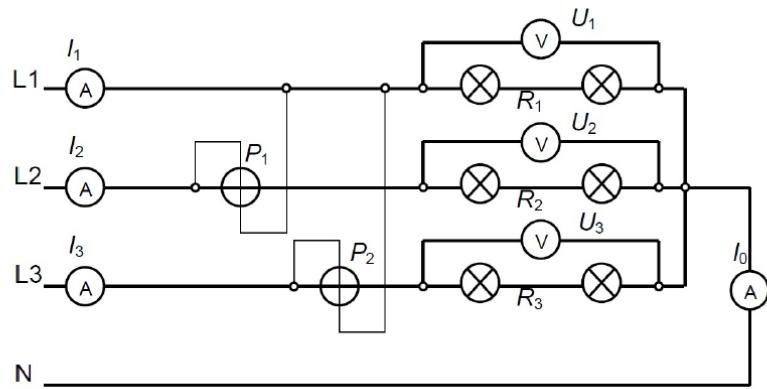


Abbildung 4: Schaltplan für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Sternschaltung [1]

I_i ... entsprechende Ströme gemessen mit entsprechenden Ampermeter A

U_i ... entsprechende Spannungen gemessen mit entsprechenden Voltmeter V

R_i ... entsprechender Widerstand durch die jeweiligen Verbraucher

P_i ... Powermeter in Aronschaltung

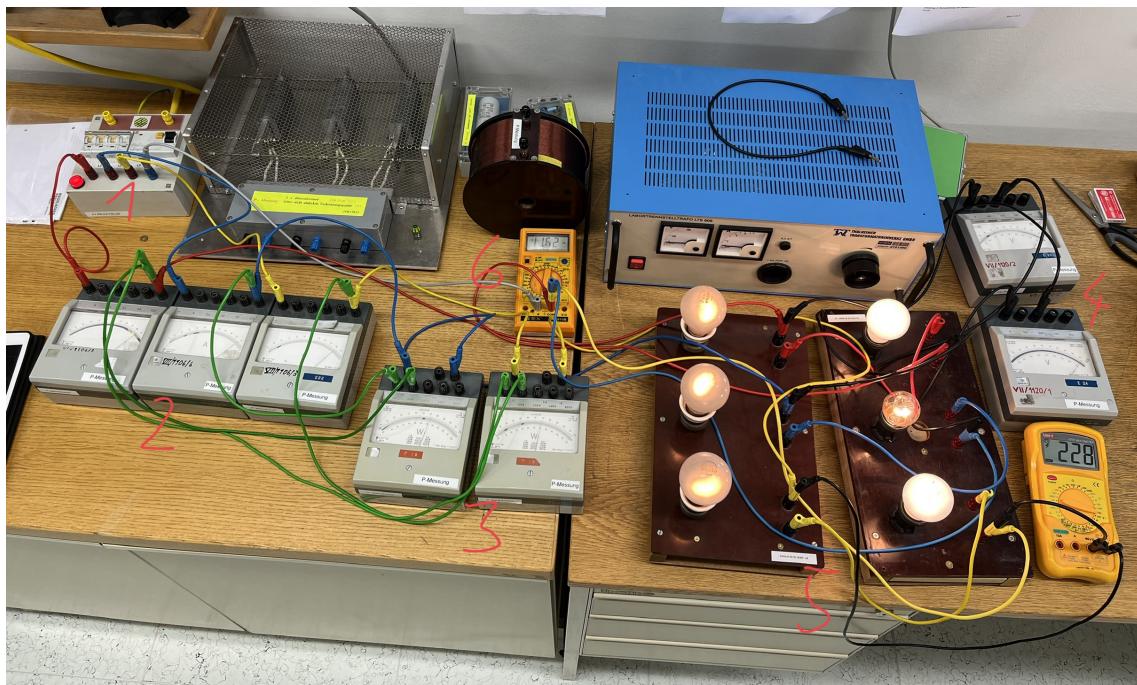


Abbildung 5: Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Sternschaltung. (Bei den Kabeln wurde ein Farbschema eingehalten, um eine bessere Übersicht zu ermöglichen.)

- 1 ... Versorgungsspannung (L_1 rot, L_2 blau, L_3 gelb)
- 2 ... seriell geschaltete Strommessgeräte
- 3 ... seriell geschaltete Leistungsmessgeräte mit parallelen Anschlüssen nach der Aronschaltung (grün)
- 4 ... parallel geschaltete Spannungsmessgeräte über die entsprechenden Verbraucher (schwarz)
- 5 ... symmetrisch verteilte ohmsche Verbraucher (Glühlampen)
- 6 ... Strommessgerät zwischen Sternpunkt und Neutralleiter (grau)

3.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung

Um eine asymmetrische Last zu erreichen, wird der Aufbau aus Abbildung 4 herangezogen, mit dem Unterschied, dass die Glühlampen nicht gleichmäßig auf die Leiter aufgeteilt werden. Die gewählte Konfiguration ist in Abbildung 6 ersichtlich.



Abbildung 6: Entsprechende Konfiguration für eine asymmetrische Verteilung der Last mit folgenden Verteilungen auf den Strängen:
 $L_1 \dots 1 \times 60 \text{ W}$
 $L_2 \dots 2 \times 75 \text{ W}$
 $L_3 \dots 1 \times 75 \text{ W und } 2 \times 60 \text{ W}$

3.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch

Um einen Kabelbruch zu simulieren, wird der Aufbau aus Abbildung 4 herangezogen. Nun wird der Kontakt des Neutralleiters unterbrochen, indem das graue Kabel, sichtbar in Abbildung 3, aus dem Strompfad des Multimeters entfernt und in den Spannungsbereich gesteckt wird, um eine Spannungsmessung zu ermöglichen.

3.6 Wirkleistungsmessung

Um die Wirkleistung von allgemeinen Verbrauchern in Sternschaltung zu bestimmen, wird die Schaltung nach folgendem Schaltplan aus Abbildung 7 aufgebaut. Der tatsächliche Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 ersichtlich.

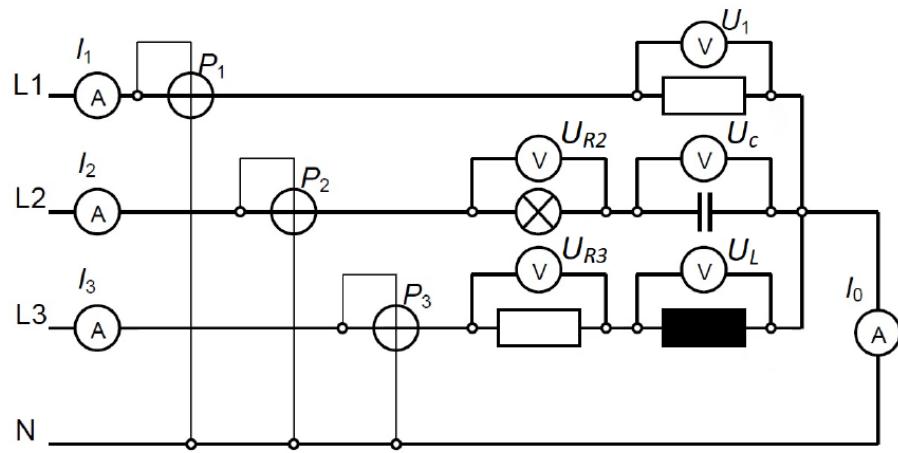


Abbildung 7: Schaltplan für die Messung der Wirkleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung [1]

I_i ... entsprechende Ströme gemessen mit entsprechenden Ampermeter A

U_i ... entsprechende Spannungen gemessen mit entsprechenden Voltmeter V

R_i ... entsprechender Widerstand durch die jeweiligen Verbraucher

P_i ... Powermeter

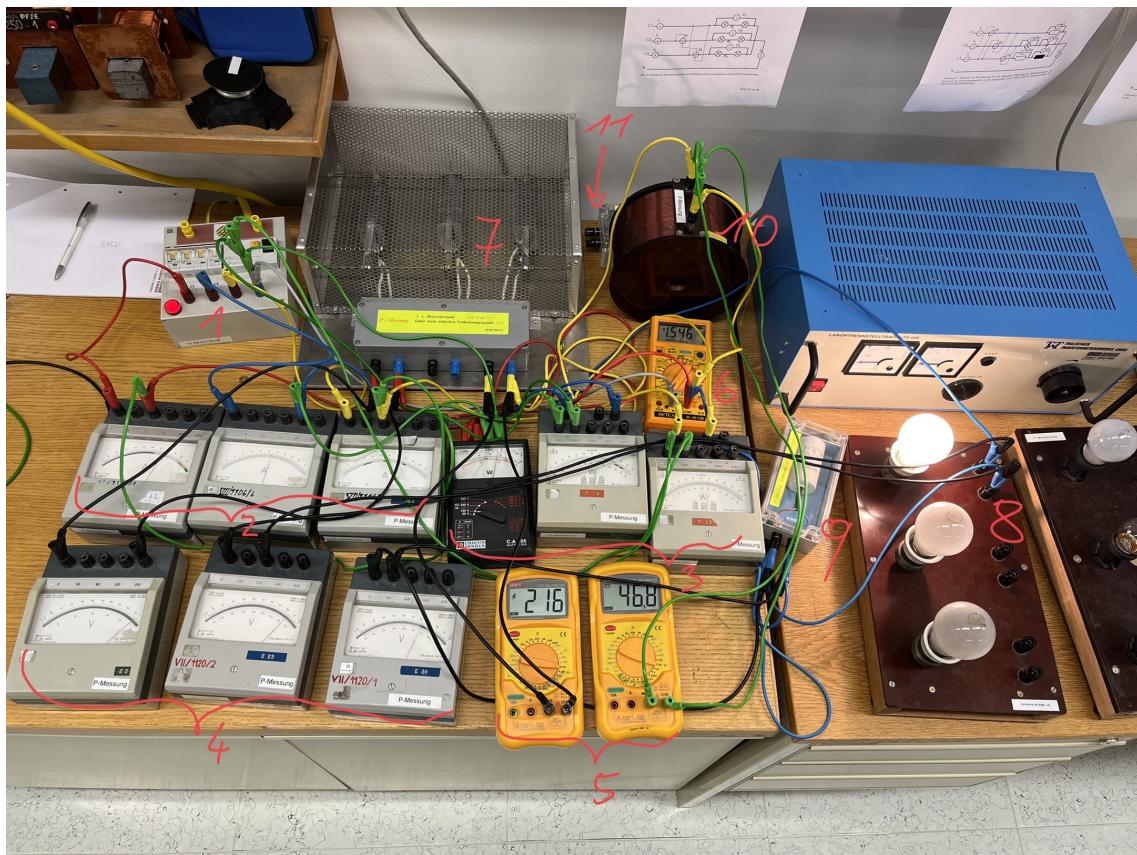


Abbildung 8: Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung. (Bei den Kabeln wurde ein Farbschema eingehalten, um eine bessere Übersicht zu ermöglichen.)

- 1 ... Versorgungsspannung (L_1 rot, L_2 blau, L_3 gelb)
- 2 ... seriell geschaltete Strommessgeräte
- 3 ... seriell geschaltete Leistungsmessgeräte mit parallelen Anschlüssen zum Neutralleiter (grün)
- 4 ... parallel geschaltete analoge Spannungsmessgeräte über die entsprechenden Verbraucher (schwarz)
- 5 ... parallel geschaltete digitale Spannungsmessgeräte über die entsprechenden Verbraucher (schwarz/grün)
- 6 ... Strommessgerät zwischen Sternpunkt und Neutralleiter (grau)
- 7 ... Heizwiderstände
- 8 ... ohmscher Verbraucher
- 9 ... Kapazität (Kondensator)
- 10 ... Induktivität (Spule)
- 11 ... 2. Kapazität für Bonusaufgabe

Für die Bonusaufgabe werden folgende Änderungen vorgenommen:

- L_1 bleibt unverändert (Heizwiderstand)
- L_2 Schaltung von einem Heizwiderstand und einem Kondensator mit parallel geschalteter Induktivität
- L_3 Schaltung von einem Heizwiderstand und einem Kondensator

3.7 Blindleistungsmessung

Um die Blindleistung eines allgemeinen Verbrauchers sichtbar zu machen, wird nun die Schaltung nach folgendem Schaltplan aus Abbildung 9 aufgebaut, indem die grünen Kabel der Powermeter aus Abbildung 8 entsprechend modifiziert werden.

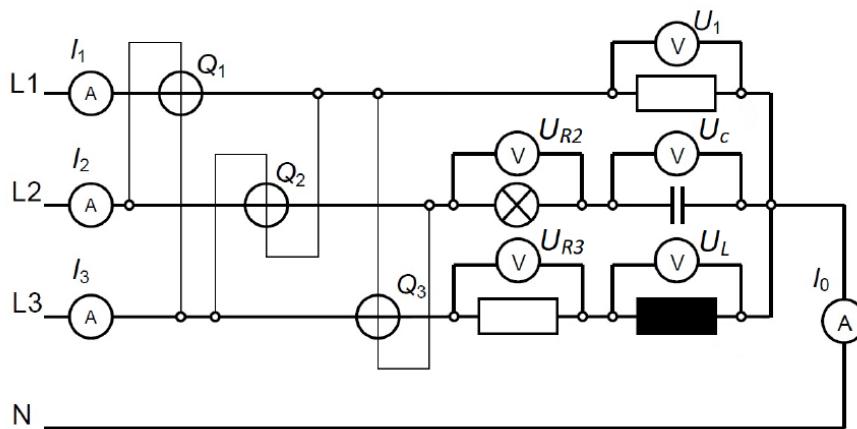


Abbildung 9: Schaltplan für die Messung der Blindleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung [1]

I_i ... entsprechende Ströme gemessen mit entsprechenden Ampermeter A

U_i ... entsprechende Spannungen gemessen mit entsprechenden Voltmeter V

R_i ... entsprechender Widerstand durch die jeweiligen Verbraucher
 P_i ... Powermeter

3.8 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors

Um den Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors zu realisieren, werden 3 Spulen mit Eisenkern wie in Abbildung 10 um eine drehbar gelagerte Metallscheibe aufgestellt. Die Spulen werden mit vorgeschalteten Heizwiderständen an die Versorgungsspannung geschlossen.

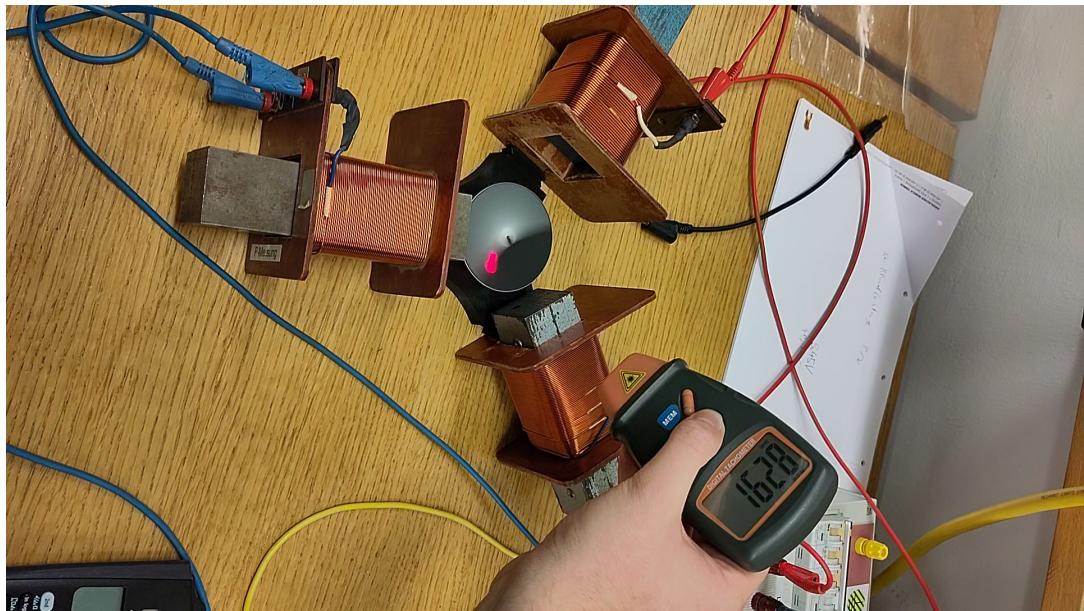


Abbildung 10: Drehzahlmessung des rudimentären Asynchron-Drehstrommotors.

4 Geräteliste

Für den Versuch werden die in Tabelle 1 aufgelisteten Geräte verwendet.

Tabelle 1: Verwendete Geräte

Gerätetyp	Hersteller	Typ	Inventar-Nr	Anmerkung
Transformator	Thalheimer	LTS 606	0161469	
Box mit Versorgungsspannung			F1	
Strommessgerät	Norma	analog	VII/1106/9 VII/1106/6 VII/1106/3	3 x
Spannungsmessgerät	Norma	analog	VII/1120/2 VII/1120/1 E3	3 x
Leistungsmessgerät	Norma	analog	F18 F19	2 x
Leistungsmessgerät	Chauvin Arnoux	analog	C.A.505	
Multimeter	UNI-T	UT51		2 x
Multimeter	METEX	M-3610B		
Glühbirnen		3x 60 W 3x 75 W		
Kondensator		12 µF	G5 V	2 x
Spule			P	
Heizwiderstand		3x 230 V	JFR/158/13	3 x
Bananenstecker				
Spule mit Eisenkern				3 x
Metallscheibe auf Sockel	Hancaner	DT2234C		

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis

Um die Leistung der ohmschen Last im Wechselstromkreis zu messen, wird der Verbraucher, der in diesem Fall einer 75 W Glühbirne entspricht, wie in Abbildung 1 ersichtlich, in den Stromkreis geschlossen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Geräte richtig in den Stromkreis geschlossen sind. Bei einem negativen Zeigerausschlag müssen also die Kabel vertauscht werden. Auch sollt bei den Geräten der richtige Messbereich ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass die Geräte nicht überlastet werden, aber dennoch ein genaues Ergebnis anzeigen.

Nun wird mithilfe des Schleifkontakte des Netzgeräts eine Ausgangsspannung von $(20,0 \pm 0,6)$ V erzeugt und diese kontinuierlich erhöht, bis schließlich ein Wert von $(240,0 \pm 1,2)$ V erreicht ist.

Die entsprechenden Werte der Messgeräte werden abgelesen und in folgender Tabelle 2 aufgelistet.

Bei dem vom Leistungsmessungsgerät abgelesenen Wert ist dabei besonders darauf zu achten, ob das Gerät über die Verbindung für 1 A oder 5 A verwendet wird.

Tabelle 2: Gemessene Werte bei der Variation der ohmschen Last

U ... gemessene Spannung in V

I ... gemessener Strom in A

P ... gemessene Leistung in W

U / V	I / A	P / W
$20,0 \pm 0,6$	$0,106 \pm 0,004$	$2,5 \pm 0,6$
$40,0 \pm 0,6$	$0,136 \pm 0,004$	$6,0 \pm 0,6$
$60,0 \pm 0,6$	$0,164 \pm 0,004$	$10,5 \pm 0,6$
$80,0 \pm 0,6$	$0,191 \pm 0,004$	$16,0 \pm 0,6$
$100,0 \pm 0,6$	$0,215 \pm 0,004$	$22,0 \pm 0,6$
$120,0 \pm 0,6$	$0,238 \pm 0,004$	$30,0 \pm 0,6$
$140,0 \pm 1,2$	$0,250 \pm 0,009$	$37,0 \pm 1,2$
$160,0 \pm 1,2$	$0,270 \pm 0,009$	$46,0 \pm 1,2$
$180,0 \pm 1,2$	$0,288 \pm 0,009$	$54,0 \pm 1,2$
$200,0 \pm 1,2$	$0,305 \pm 0,009$	$64,0 \pm 1,2$
$220,0 \pm 1,2$	$0,320 \pm 0,009$	$74,0 \pm 1,2$
$240,0 \pm 1,2$	$0,335 \pm 0,009$	$84,0 \pm 1,2$

5.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung

Um die Leistung eines symmetrischen Verbrauchs bei einer Dreiecksschaltung zu betrachten, wird ein Aufbau nach Abbildung 2 herangezogen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Glühlampen symmetrisch auf die Stränge verteilt sind, sich also auf jedem jeweils eine mit 75 W und eine mit 60 W befindet. Alle abgelesenen Messwerte der Messgeräte sind in folgender Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Abgelesene Werte bei symmetrischer Belastung in Dreiecksschaltung

$I_i \dots$ gemessener Strom am i-ten Strang in A

$I_{31} \dots$ gemessener Strom zwischen Sternpunkt und Neutralleiter in A

$U_{ij} \dots$ gemessene Spannung zwischen den Strängen i und j in V

$P_i^M \dots$ gemessene Wirkleistungen in W (für genaue Bezeichnung siehe Abbildung 2)

I_1 / A	I_2 / A	I_3 / A	I_{31} / A
$0,460 \pm 0,014$	$0,480 \pm 0,014$	$0,470 \pm 0,014$	$0,264 \pm 0,008$

U_{12} / V	U_{23} / V	U_{31} / V	P_1^M / W	P_2^M / W
390 ± 8	390 ± 8	395 ± 8	163 ± 4	168 ± 4

5.3 Symmetrische Last in Sternschaltung

Nun wird die Schaltung insofern modifiziert, dass nun eine Sternschaltung vorliegt, wie in Abbildung 4 sichtbar.

Der besseren Übersicht halber, sind alle abgelesenen Werte der Messgeräte für die Sternschaltung in folgender Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Abgelesene Werte bei Sternschaltung

1. Zeile ... symmetrische Belastung
 2. Zeile ... asymmetrische Belastung
 3. Zeile ... asymmetrische Belastung mit simulierten Kabelbruch
- I_i ... gemessener Strom am i-ten Strang in A
 I_{31} ... gemessener Strom zwischen Sternpunkt und Neutralleiter in A
 U_i ... gemessene Spannung am i-ten Strang in V
 P_i^M ... gemessene Wirkleistungen in W (für genaue Bezeichnung siehe Abbildung 4)

I_1 / A	I_2 / A	I_3 / A	I_{31} / A
$0,218 \pm 0,006$	$0,220 \pm 0,006$	$0,226 \pm 0,006$	$0,0111 \pm 0,0005$
$0,270 \pm 0,014$	$0,255 \pm 0,014$	$0,172 \pm 0,006$	$0,092 \pm 0,005$
$0,255 \pm 0,014$	$0,253 \pm 0,014$	$0,184 \pm 0,006$	-

U_1 / V	U_2 / V	U_3 / V	P_1^M / W	P_2^M / W	P_3^M / W
228 ± 4	228 ± 4	224 ± 6	$73,0 \pm 0,8$	$70,0 \pm 1,6$	-
230 ± 4	230 ± 4	224 ± 6	$19,5 \pm 0,2$	$82,0 \pm 1,6$	$55,0 \pm 1,6$
202 ± 4	225 ± 4	261 ± 7	$16,00 \pm 0,16$	$88,0 \pm 1,6$	$58,0 \pm 1,6$

5.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung

Nun werden die einzelnen Stränge verschieden stark beansprucht, indem die Glühlampen asymmetrisch auf die Stränge verteilt werden. Dabei wird, wie bereits in Abschnitt 3 angeführt, folgende Konfiguration verwirklicht:

- L_1 ... 1 x 60 W
- L_2 ... 2 x 75 W
- L_3 ... 1 x 75 W und 2 x 60 W

Alle abgelesenen Werte der Messgeräte sind, wie bereits erwähnt, in Tabelle 4 in der 2. Zeile angefügt.

5.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch

Um nun einen Kabelbruch zu simulieren, wird die Verbindung des Neutralleiters unterbrochen. Zusätzlich wird nun auch der Spannungsabfall an jener Stelle gemessen, indem das entsprechende Multimeter als Spannungsmessgerät umfunktioniert wird. Die so abgelesenen Werte der Messgeräte sind in Tabelle 4 in der 3. Zeile aufgelistet.

5.6 Wirkleistungsmessung

Um die Wirkleistung eines realen Verbrauchers zu bestimmen, werden auch Kapazitäten und Induktivitäten, wie in Abbildung 7 sichtbar, in die Schaltung integriert.

Es sind, der besseren Übersicht halber, wieder alle erhaltenen Werte für die nächsten Aufgaben in Tabelle 5 aufgelistet. Die gemessenen Werte der realen Verbraucher sind dabei in der 1. Zeile sichtbar.

Nun werden die Außenleiter L_2 und L_3 vertauscht, wodurch die Werte, aus der 2. Zeile der Tabelle 5 entstehen.

Im Rahmen der Bonusaufgabe wird die Schaltung leicht modifiziert, wie bereits in Abschnitt 3 angeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass am 2. Strang eine Parallelschaltung von Kapazität und Induktivität vorliegt.

Alle abgelesenen Werte der Messgeräte sind in der 3. Zeile in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Abgelesene Werte für die Bestimmung der Wirkleistung, bei den Bezeichnungen der Bauteile ist zu beachten, dass sich Zeile 3 und 6 auf die Bonusaufgabe beziehen und daher andere Bauteile verwendet werden.

1. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung eines realen Verbrauchers
2. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung Wirkleistung eines realen Verbrauchers mit vertauschten Außenleitern
3. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung Wirkleistung bei modifizierter Schaltung
4. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung Blindleistung eines realen Verbrauchers
5. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung Blindleistung eines realen Verbrauchers mit vertauschten Außenleitern
6. Zeile ... Aufbau für die Messung der Wirkleistung Blindleistung bei modifizierter Schaltung

I_i ... gemessener Strom am i-ten Strang in A

I_{31} ... gemessener Strom zwischen Sternpunkt und Neutralleiter in A

U_i ... gemessener Spannungsabfall am i-ten Bauteil in V nach Abbildung 7

P_i^M ... gemessene Wirkleistungen am i-ten Strang in W

I_1 / A	I_2 / A	I_3 / A	I_{31} / A	U_1 / V	U_{R2} / V
$1,54 \pm 0,06$	$0,328 \pm 0,014$	$1,50 \pm 0,06$	$1,53 \pm 0,04$	229 ± 4	212 ± 4
U_C / V	U_{R3} / V	U_L / V	P_1^M / W	P_2^M / W	P_3^M / W
$84,0 \pm 1,6$	215 ± 6	$46,3 \pm 0,7$	370 ± 4	$69,0 \pm 1,6$	345 ± 7
$84,5 \pm 1,6$	214 ± 6	$46,1 \pm 0,7$	375 ± 4	$70,0 \pm 1,6$	340 ± 7
$53,0 \pm 1,6$	201 ± 6	$109,1 \pm 1,2$	375 ± 4	345 ± 7	$86,0 \pm 1,6$
$84,5 \pm 1,6$	215 ± 6	$46,2 \pm 0,7$	$0,500 \pm 0,005$	$-48,0 \pm 1,6$	$116,0 \pm 1,6$
$84,5 \pm 1,6$	214 ± 6	$46,0 \pm 0,7$	$0,500 \pm 0,005$	$-49,0 \pm 1,6$	124 ± 4
$53,0 \pm 1,6$	201 ± 6	$108,8 \pm 1,2$	$1,000 \pm 0,010$	$-140,0 \pm 1,6$	270 ± 7

5.7 Blindleistungsmessung

Um die Blindleistung der Schaltung messbar zu machen, müssen die parallelen Verbindungen der Powermeter, nach Abbildung 9 umgebaut werden.

Alle abgelesenen Werte der Messgeräte sind in der 4. Zeile in Tabelle 5 aufgelistet.

Nun werden die Außenleiter L_2 und L_3 erneut vertauscht, wodurch die Werte aus Zeile 5, aus Tabelle 5 entstehen.

Im Rahmen der Bonusaufgabe wird auch die leicht modifizierte Schaltung mit der Parallelschaltung von Kapazität und Induktivität am 2. Strang aufgebaut.

Alle abgelesenen Werte der Messgeräte sind in der 6. Zeile von Tabelle 5 aufgelistet.

5.8 Bau eines rudimentärern Asynchron-Drehstrommotors

Beim Bau des Drehstrommotors ist darauf zu achten, dass die Spulen richtig in den Stromkreis geschlossen sind, sodass die maximale Drehzahl erreicht werden kann. Auch die Abstände der Eisenkerne sind durch Probieren so einzustellen, dass ein möglichst ruhiger Umlauf der Metallscheibe garantiert wird und sind nicht bei allen 3 Spulen gleich, da diese bezüglich der Anzahl an Wicklungen und Drahtdicke leicht verschieden sind.

Die Anzahl der Umdrehungen wird dabei mithilfe eines digitalen Zählers bestimmt, der anhand eines Laserstrahls die Markierung auf der Metallscheibe wahrnimmt. Die maximale Drehzahl, die mithilfe des Aufbaus realisiert werden konnte war $(1691 \pm 2) \text{ min}^{-1}$ Umdrehungen.

6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortpflanzt, ist erweiterte Gauss-Methode verwendet worden. Die Grundlagen dieser Methode stammen von den Powerpointfolien von GUM [2]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen die Pakete `labtool-ex2`, `pandas`, `sympy`, `lmfit` zur Hilfe genommen worden. `lmfit` wurde für das Fitten hergenommen, `sympy` wurde für symbolische Manipulation hergenommen und die restlichen Pakete für leichter handhaben der Daten. Dies wurde aber alles durch `labtool-ex2` abstrahiert.

Um höchstmögliche Genauigkeit zu garantieren wird erst bei der Darstellung der Wert in Tabellen gerundet.

6.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis

Die Daten der Spannungen, Ströme und Leistungen wurde aus Tabelle 2 entnommen, die Leistung P wurde einmal mit der Spannung U und einmal mit dem Strom I gefittet.

Folgende Gleichung 12 wurde verwendet um die stromabhängigkeit von P zu fitten:

$$P(I) = I^2b + Ia + P_0 \quad (12)$$

Zudem wurde, Gleichung 12, verwendet um die spannungsabhängigkeit von P zu fitten:

$$P(U) = \frac{U^2}{d} + Uc + P_0 \quad (13)$$

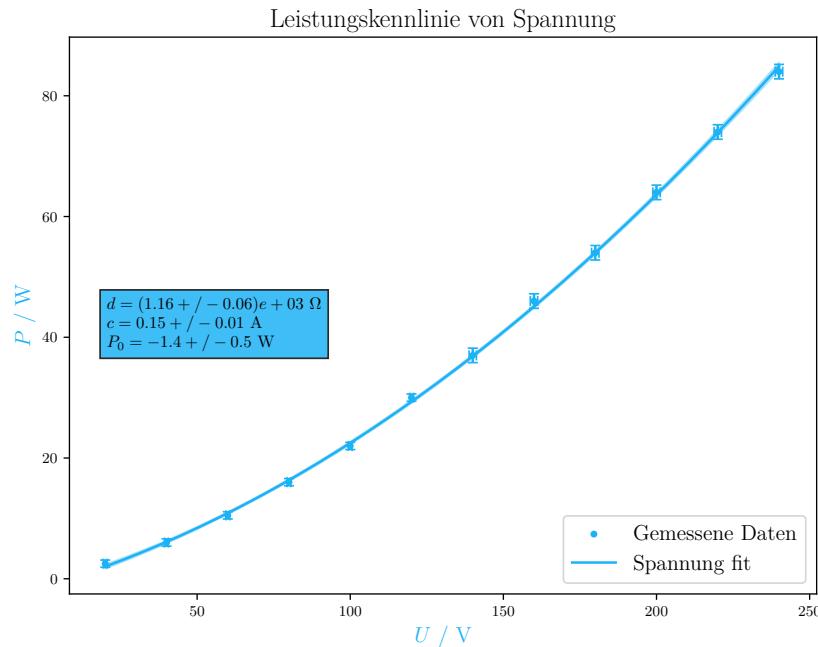


Abbildung 11: Diese Graphik beinhaltet den quadratischen Fit der gemessen Leistungswerte P über die Spannung U einer Glühbirne, die Werte sind aus Tabelle 2 entnommen worden. Hierbei ist d der gefittete Widerstandswert der Glühbirne, c der lineare Fitparameter und P_0 der Ordinatenschnittpunkt.

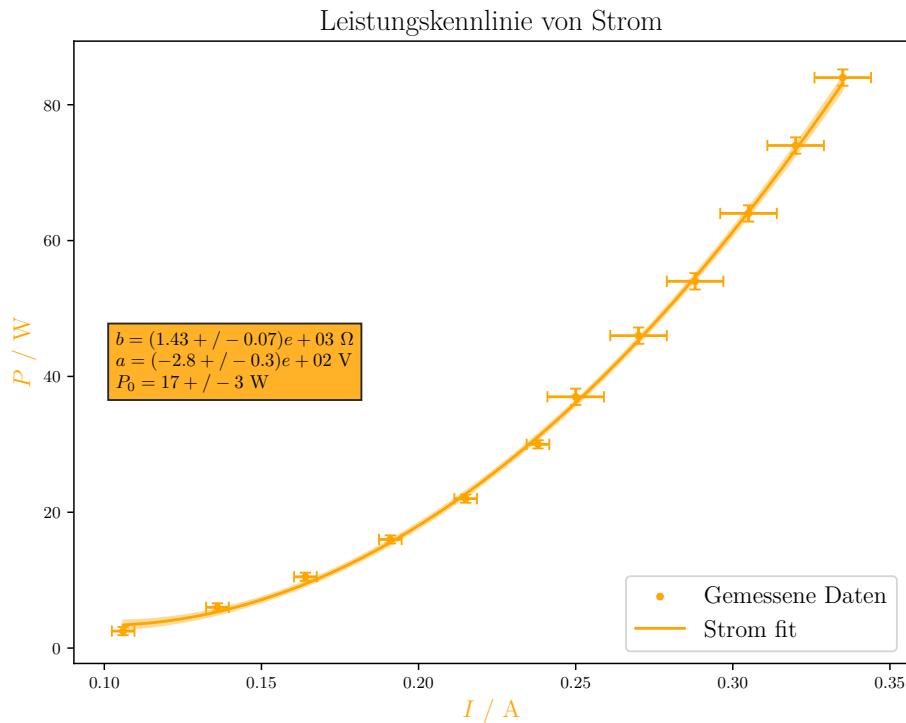


Abbildung 12: Diese Graphik beinhaltet den quadratischen Fit der gemessenen Leistungswerte P über den Strom I einer Glühbirne, die Werte sind aus Tabelle 2 entnommen worden. Hierbei ist b der gefittete Widerstandswert der Glühbirne, a der lineare Fitparameter und P_0 der Ordinatenschnittpunkt.

6.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung

Aufgrund der symmetrischen Last lassen sich die Beträge aller Strangströme I_{ij} mit dem Wissen über die Beträge der Leiterströmen I_i und einem der Strangströme hier I_{31} bestimmen. Dies lässt sich durch die Komplexe Vektoraddition der Strangströme berechnen. Die folgenden Umformungen können gemacht werden, da die Winkelverschiebung der Ohmschen Strangströme zu den Leiterströmen bekannt sind.

$$i_i = \sum_j i_{ij} (1 - \delta_{ij}) \quad (14)$$

$$I_i = \left| \sum_j i_{ij} (1 - \delta_{ij}) \right| \quad (15)$$

$$\Rightarrow I_{12} = \sqrt{I_1^2 - \frac{3I_{31}^2}{4}} - \frac{I_{31}^2}{2} \quad (16)$$

$$\Rightarrow I_{23} = \sqrt{I_3^2 - \frac{3I_{31}^2}{4}} - \frac{I_{31}^2}{2} \quad (17)$$

Mit diesen Gleichungen lassen sich nun die Beträge der Strangströme bestimmen.

Tabelle 6: Errechnete Strangströme einer symmetrisch ohmsch-belasteten Dreiecksschaltung, siehe Abbildung 2. Zur Berechnung wurde Gleichung 17 und die Daten aus Tabelle 3 entnommen.

I_{ij} ... errechnete Strangströme vom i-ten zum j-ten Leiter in A.

I_{12} / A	I_{23} / A	I_{31} / A
$0,27 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,03$	$0,264 \pm 0,008$

Mittels der Strangströme (Tabelle 6), der Strangspannungen U_{ij} (Tabelle 3) und Gleichung 1 lassen sich die Verbraucherleistungen der Stränge P_i finden.

Tabelle 7: Errechnete Leistungen bei der Dreiecksschaltung

P_i^C ... errechnete Leistung am i-ten Strang in W

P_{ges}^C ... errechnete Gesamtleistung in W

P_{ges}^M ... gemessene Gesamtleistung in W

P_1^C / W	P_2^C / W	P_3^C / W	P_{ges}^C / W	P_{ges}^M / W
104 ± 12	109 ± 12	104 ± 6	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$	331 ± 7

Damit die Rechnungen in Gleichung 17 besser nachvollziehbar sind, wurde von dieser Dreieckschaltung ein Zeigerdiagramm erstellt.

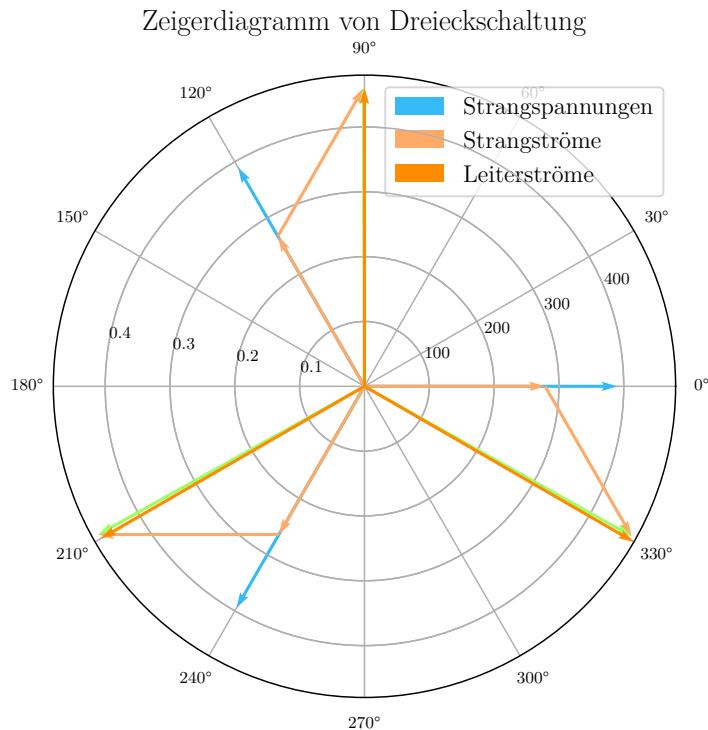


Abbildung 13: Dieses Diagramm spiegelt die Schaltung, aus Abbildung 2 wieder und wurde mit den Werten aus Tabelle 6, Tabelle 2 erstellt.

6.3 Sternschaltungen

Analog wie in Unterabschnitt 6.2 werden durch die Strangströme I_j und Strangspannungen U_j die Verbraucherleistungen der nächsten drei Sternschaltungen berechnet. Desweitern wird auch durch die gemessenen Leistungswerte P_i^M , Tabelle 4, die gesamte Verbraucherleistung bestimmt P_{ges}^M .

Tabelle 8: Errechnete Leistungen bei der Sternschaltung

1. Zeile ... symmetrische Belastung
 2. Zeile ... asymmetrische Belastung
 3. Zeile ... asymmetrische Belastung mit simulierten Kabelbruch
- P_i^C ... errechnete Leistung am i-ten Strang in W
 P_{ges}^C ... errechnete Gesamtleistung in W
 P_{ges}^M ... gemessene Gesamtleistung in W

P_1^C / W	P_2^C / W	P_3^C / W	P_{ges}^C / W	P_{ges}^M / W
50 ± 2	50 ± 2	51 ± 3	150 ± 7	143 ± 3
62 ± 5	59 ± 5	39 ± 3	159 ± 11	156 ± 4
52 ± 4	57 ± 4	48 ± 3	156 ± 11	162 ± 4

Nun wird auch die symmetrisch ohmsch-belastete Sternschaltungen als Zeigerdiagramm dargestellt. Die hierfür verwendeten Werte sind der Tabelle 4 entnommen worden, zudem wurde die Phasenverschiebung zwischen den Leitern als 120° vom Stromnetz angenommen.

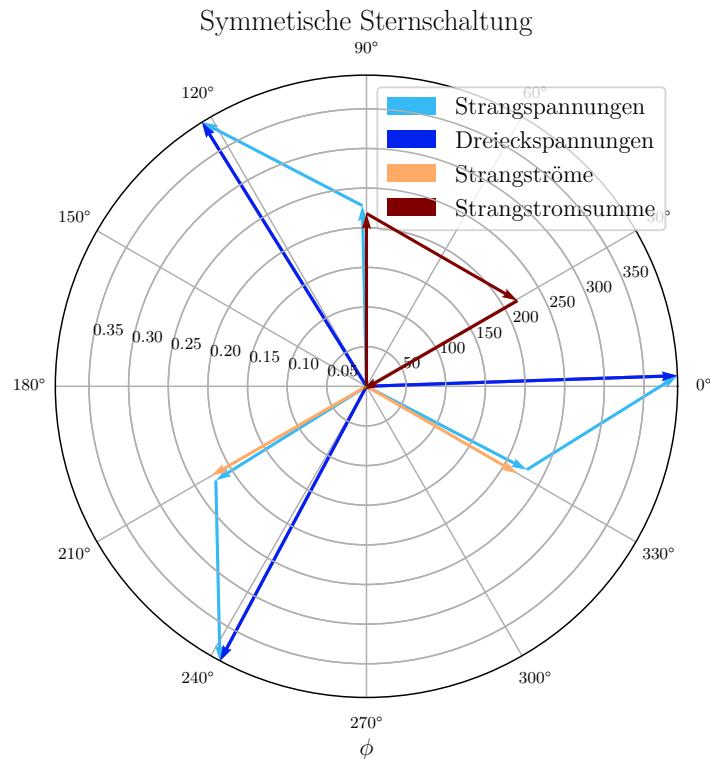


Abbildung 14: Dieses Diagramm spiegelt die Schaltung, aus Abbildung 4 wieder und wurde mit den Werten aus Tabelle 4 erstellt.

Nun galt es, mittels des Zeigerdiagramms der asymmetrischen ohmsch-belasteten Sternschaltungen ohne Neutralleiterbruch, den Neutralleiterstrom I_0 zu bestimmen. Dies wurde durch Addition der Strangströme bewerkstelligt.

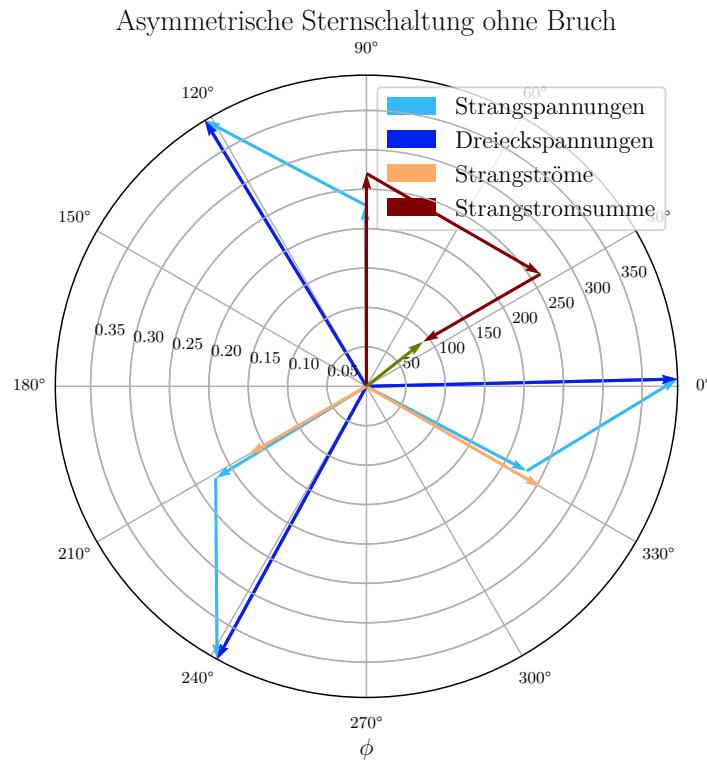


Abbildung 15: Dieses Diagramm spiegelt die asymmetrische Sternschaltung mit einem Aufbau, wie in Abbildung 4 ersichtlich, wieder. Diese wurde, wie in Unterabschnitt 5.4 erklärt, modifiziert. Hier ist durch die Vektoraddition der Strangströme der Neutralleiterstrom I_0 grünlich dargestellt worden. Die Werte stammen aus Tabelle 4.

Dazu ergänzend wurde auch der Leiterbruch des asymmetrischen ohmsch-belasteten Sternschaltungen als Zeigerdiagramm dargestellt, damit die Sternpunktsverschiebung visualisiert wird. Damit die Phasenverschiebung der Strangspannungen U_i bestimmt werden konnte ist der Kosinussatz, beim Dreieck der Vektoraddition der u_i zu den Dreieckspannungen $u_{ij} = u_i - u_j = 400 \exp\left(i \frac{2\pi \cdot (j)}{3} \pi\right)$, angewendet worden. Schlussendlich konnte durch die Addition der Strangspannungen u_i mit den Spannungen vom Leiter zu Neutralleiter $u_{jN} = \frac{400}{\sqrt{3}} \exp\left(i \frac{2\pi \cdot (j + \frac{3}{2})}{3} \pi\right)$ die Sternpunktsverschiebung U_0 mittels der Abbildung 16 bestimmt werden. Dies ist für alle Drei möglichen Spannungsadditionen durchgeführt worden, deshalb sind drei Neutralleiterspannungen U_0 in Abbildung 16 ersichtlich.

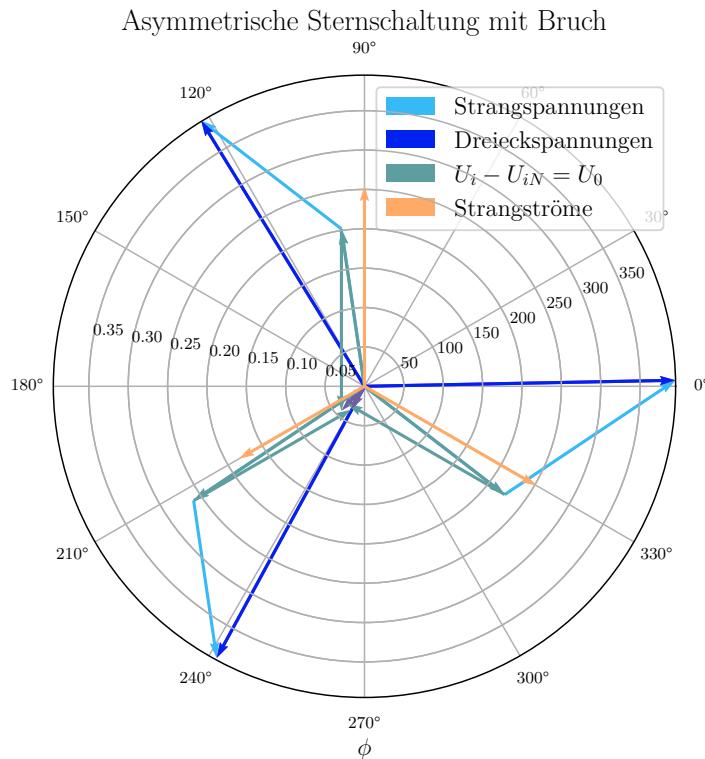


Abbildung 16: Dieses Diagramm spiegelt eine asymmetrische Sternschaltung mit Neutralleiterbruch mit einem Aufbau, wie in Abbildung 4 ersichtlich, wieder. Diese wurde, wie in Unterabschnitt 5.5 erklärt, modifiziert. Hier ist durch die Vektoraddition der Strangspannungen U_i und der Spannungen vom Leiter zum Neutralleiter U_{iN} die Neutralleiterspannungen U_0 in der Farbe Lavendel dargestellt worden. Die Werte stammen aus Tabelle 4.

6.4 Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz

Analog wie in Unterabschnitt 6.3 sind die Verbraucherleistung P_i^C , durch Multiplikation der Strangströme I_i und der Strangspannungen bestimmt worden. Zudem wurden auch die Verbraucherblindleistungen Q_i^C bestimmt indem auch die I_i und die U_i miteinander multipliziert worden sind. Jedoch ist der Unterschied in der Rechnung, dass bei den P_i^C nur die reellen Anteile der Strangspannungen U_i , also die Spannungen über die Widerstände und bei den Q_i^C nur die Imaginären Anteile der Strangspannungen U_i (Kondensator- & Induktionsspannungen der Stränge), zur

Berechnung genommen werden. Des Weiteren wurden auch die gesamte Verbraucherleistung P_{ges} und die gesamt Verbraucherblindleistung Q_{ges} bestimmt. Einmal durch die Summation der gemessenen Verbraucherleistung P_i^M und der gemessenen Verbraucherblindleistung Q_i^M (aus Tabelle 5) und einmal durch die Summation der errechneten Werte (P_i^C & Q_i^C).

Tabelle 9: Errechnete Werte für die Wirk- und Blindleistungen, sowie gegenüberstellung mit dem gemessenen Wert bei allgemeiner Last, jeweils pro Block:

1. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau nach Abbildung 7
2. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau mit vertauschten Außenleitern
3. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau bei modifizierter Schaltung
- P_i^C ... Errechnete Wirkleistung am i-ten Strang in W (im 1. Block aus den gemessenen Werten der Wirkleistung, im 4. Block aus den gemessenen Werten der Blindleistung)

P_i^M ... Gemessene Wirkleistung am i-ten Strang in W

P_{ges}^C ... Errechnete gesamte Wirkleistung in W

P_{ges}^M ... Gemessene gesamte Wirkleistung in W

Q_i^C ... Errechnete Blindleistung am i-ten Strang in W (im 2. Block aus den gemessenen Werten der Blindleistung, im 3. Block aus den gemessenen Werten der Wirkleistung)

Q_i^M ... Gemessene Blindleistung am i-ten Strang in W

Q_{ges}^C ... Errechnete gesamte Blindleistung in W

Q_{ges}^M ... Gemessene gesamte Blindleistung in W

P_1^C / W	P_1^M / W	P_2^C / W	P_2^M / W	P_3^C / W	P_3^M / W
353 ± 18	370 ± 4	69 ± 5	$69,0 \pm 1,6$	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$	345 ± 7
Q_1^C / var	Q_1^M / var	Q_2^C / var	Q_2^M / var	Q_3^C / var	Q_3^M / var
0,0	$0,289 \pm 0,003$	$-28,5 \pm 1,8$	-28 ± 1	69 ± 4	67 ± 1
0,0	$0,289 \pm 0,003$	$-28,3 \pm 1,8$	-28 ± 1	69 ± 4	$71,6 \pm 1,9$
0,0	$0,577 \pm 0,006$	-81 ± 6	-81 ± 1	84 ± 4	156 ± 4
Q_1^C / var	Q_2^C / var	Q_3^C / var	Q_{ges}^C / var	P_{ges}^C / W	P_{ges}^M / W
0,0	$-27,5 \pm 1,7$	114 ± 6	87 ± 8	$(7,4 \pm 0,5) \cdot 10^2$	784 ± 12
0,0	$-27,9 \pm 1,8$	69 ± 4	41 ± 6	$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	785 ± 12
0,0	-81 ± 6	85 ± 4	$(0 \pm 1) \cdot 10^1$	$(8,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	806 ± 12
P_1^C / W	P_2^C / W	P_3^C / W	P_{ges}^C / W	Q_{ges}^C / var	Q_{ges}^M / var
359 ± 18	72 ± 5	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	41 ± 6	$39,5 \pm 1,9$
359 ± 18	71 ± 5	$(3,2 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	41 ± 6	44 ± 3
359 ± 18	330 ± 18	$(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(8,4 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(0 \pm 1) \cdot 10^1$	76 ± 5

Schlussendlich kann mit den P_{ges} und Q_{ges} die gesamte Scheinleistung mit Pythagoras berechnet werden.

Tabelle 10: Errechnete Werte für die Scheinleistungen, sowie gegenüberstellung mit dem gemessenen Wert bei allgemeiner Last

1. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau nach Abbildung 7

2. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau mit vertauschten Außenleitern

3. Zeile ... entsprechende Parameter bei Versuchsaufbau bei modifizierter Schaltung

S_{ges}^C ... Errechnete gesamte Scheinleistung in VA

S_{ges}^M ... Gemessene gesamte Scheinleistung in VA

S_{ges}^C / VA	S_{ges}^M / VA
$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	785 ± 12
$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^2$	786 ± 12
$(8,4 \pm 0,5) \cdot 10^2$	810 ± 13

Nun wird werden die Messungen von der Standardschaltung, siehe Abbildung 7, und der Messungen mit den Außenleitern L2 und L3 vertauscht in einem Zeigerdiagramm dargestellt. Um die Phasenverschiebung der Spannungen zu finden wurde der Satz von Pythagoras verwendet, dies ist auch in Abbildung 17 ersichtlich.

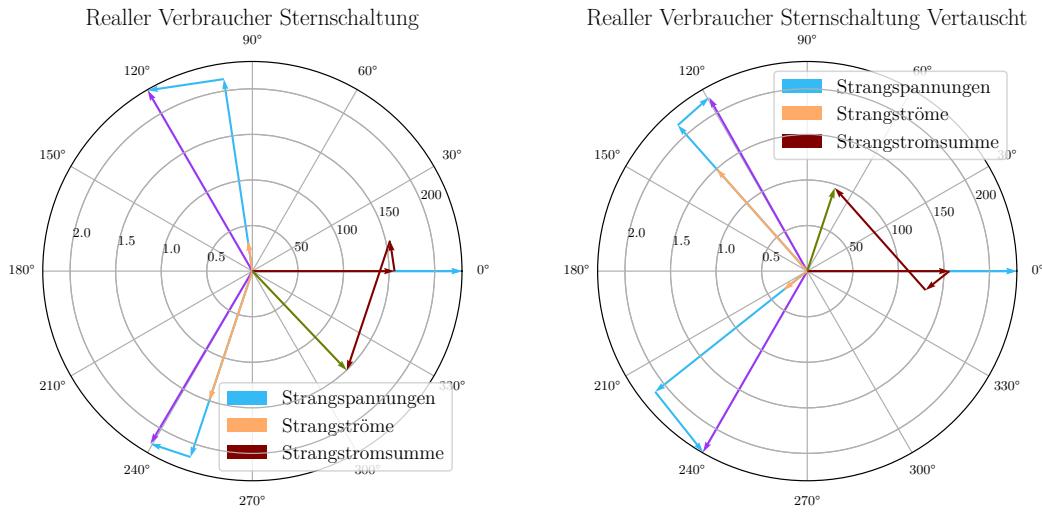


Abbildung 17: Diese Diagramme spiegeln die real-belastete Sternschaltung mit einem Aufbau, wie in Abbildung 7 ersichtlich, wieder, wobei beim Zeigerdiagramm mit der Überschrift Vertauscht die Leiter 2 und 3 vertauscht wurden. Hier ist durch die Vektoraddition der Strangströme der Neutralleiterstrom I_0 grünlich dargestellt worden. Die Werte stammen aus Tabelle 5.

6.5 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors

Hier ist keine Auswertung von Nöten.

7 Diskussion

7.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis

Wie in Abbildung 12 und Abbildung 11 ersichtlich lässt sich das Verhalten der Leistung gut durch beide quadratischen Funktionen $P(I)$ (Gleichung 12) und $P(U)$ (Gleichung 13) beschreiben. Bei der Betrachtung der Fitparameter des Fits ist klar ersichtlich, dass $P(U)$ das Verhalten physikalisch akkurate darstellt, da der Basis P_0 hier kleiner ist. Zudem ist ein leichter Trend in den Bildern zu erkennen, dass bei höherer Temperatur der Widerstandswert steigt. Da die Lampe vorgewärmt wurde ist dies jedoch kaum ersichtlich. Durch Höhere Leistung wird mit einer Verzögerung

auch der Metalldraht in der Glühbirne erhitzt, welcher sich wie ein PTC verhält und bei höherer Temperatur an Widerstand zunimmt.

Weil der Fit der Spannung insgesamt besser passt wird der entsprechende Fitparameter hier nochmals angeführt:

$$d = (1,16 \pm 0,06) \cdot 10^3 \Omega \quad (18)$$

7.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung vs in Sternschaltung

Wie zu erwarten ist der Leistungswert der Dreieckschaltung höher als bei der Sternschaltung. Das Verhältnis der Leistungen sollte bei einer idealen ohmschen symmetrischen Belastung zwischen Dreieckschaltung und Sternschaltung 3 betragen.

$$\frac{P_{ges\Delta}^M}{P_{ges*}^M} = 2,31 \pm 0,07 \quad (19)$$

Die Berechnung zeigt, dass dieser Wert kleiner als 3 ist, was mit dem gemessenen und gefitteten Leistungsverhalten einer Glühbirne erklärbar ist. Die Glühbirnen verhalten sich nicht wie eine ideale ohmsche Last sondern werden weniger Leitfähig mit zunehmender Leistung.

7.3 Sternschaltung sym. vs asym. vs asym. mit Bruch

Auch der Vergleich der Helligkeit der unterschiedlichen Glühlampen, zeigt die gleichmäßige Verteilung der Leistungen. Unter echten Bedingungen im Labor war dies bei allen Lampen klar ersichtlich, am aufgezeichneten Foto aus Abbildung 18 kommt dies jedoch nicht klar zur Geltung und lässt sich am ehesten noch bei der rechten unteren Lampe erkennen. Besser ersichtlich ist diese Verteilung bei den Messwerten aus Tabelle 8.

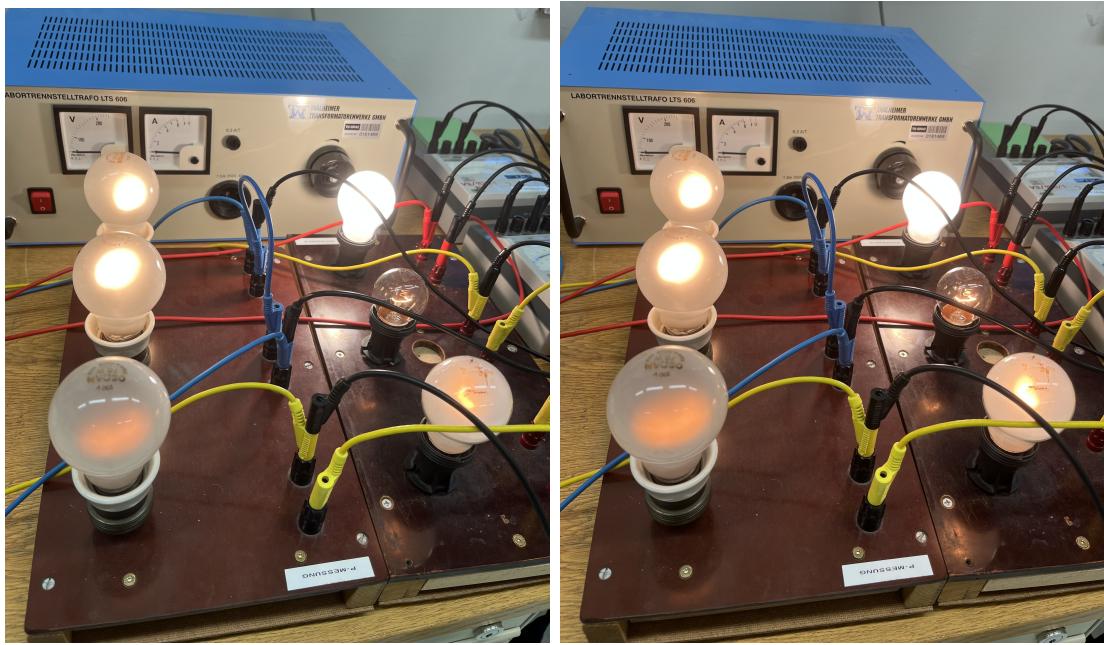


Abbildung 18: Leistungsverteilung bei Leiterbruch, Links ohne-, rechts mit Leiterbruch

Die errechneten Werte für den Strom und die Spannung sind beide im Fehlerintervall der gemessenen Größen enthalten, was auch in folgender Auflistung ersichtlich ist.

$$\begin{aligned} U_{0_{Zeiger}} &= (36 \pm 7) \text{ V} \\ U_0^M &= (40,8 \pm 0,7) \text{ V} \\ I_{0_{Zeiger}} &= (0,09 \pm 0,04) \text{ A} \\ I_0^M &= (0,092 \pm 0,005) \text{ A} \end{aligned}$$

7.4 Allgemeine Last in Sternschaltung

Durch die Vertauschung der Leiter L2 & L3 ist der Nullleiterstrom I_0 gesunken. Alle anderen Größen bleiben dabei unverändert. Da die Phasenverschiebung zwischen den Leitern bei den Blindwiderständen vom Kondensator und Spule auch einen Unterschied in der Phasenverschiebung der Ströme verursacht, ändert sich demzufolge auch die Summe der Strangströme. Das beschriebene Verhalten ist in Abbildung 17 zu sehen.

Die errechneten Leistungen stimmen mit den gemessenen Werten immer überein, außer beim der Bonusaufgabe. Hier wird ersichtlich, dass sich der gemessene Wert der Blindleistung Q_3 um den Faktor 2 von dem rechnerisch ermittelten unterscheidet. Dies kann zum Beispiel auf einen Skalenfehler beim entsprechenden analogen Messgerät zurückzuführen sein.

7.5 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors

Nach Absprache mit dem Betreuer war der bisherige Rekord für die maximale Drehzahl bisher 680 Umdrehungen pro Minute, was mit unserem Ergebnis von $(1691 \pm 2) \text{ min}^{-1}$ beachtlich gesteigert werden konnte. Dies wurde vor allem durch feine Anpassungen der Eisenkerne und auch eine Schmierung der Metallscheibe durch Seife erreicht.

8 Zusammenfassung

8.1 ohmsche Last in Wechselstromkreis

8.2 Symmetrische Last in Dreieckschaltung

8.3 Sternschaltungen

8.4 Asymmetrische Last in Sternschaltung

8.5 Asymmetrische Last in Sternschaltung und simulierten Kabelbruch

8.6 Wirkleistungsmessung

8.7 Blindleistungsmessung

8.8 Bau eines rudimentären Asynchron-Drehstrommotors

Literaturverzeichnis

- [1] R. Herbert und M. Nachtnebel. Leistungsmessung im Wechsel- und Drehstromnetz. Place: Petersgasse 16, A-8010 Graz.
- [2] B. Wolfgang Kessel. Die ISO/BIPM-GUM Sicht:Schätzwert & Messunsicherheit. 2004.

Abbildungsverzeichnis

1	Realer Versuchsaufbau für die Messung einer ohmschen Last	6
2	Schaltplan für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Dreiecksschaltung	7
3	Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Dreiecksschaltung	8
4	Schaltplan für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Sternschaltung	9
5	Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung mit Aronschaltung für symmetrische Verbraucher in Sternschaltung	10
6	Entsprechende Konfiguration für eine asymmetrische Verteilung der Last	11
7	Schaltplan für die Messung der Wirkleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung	12
8	Realer Versuchsaufbau für die Messung der Wirkleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung	13
9	Schaltplan für die Messung der Blindleistung für allgemeine Verbraucher in Sternschaltung	14
10	Drehzahlmessung des rudimentären Asynchron-Drehstrommotors . .	15
11	Spannungsabhängige Leistungskurve einer Glühbirne	24
12	Stromabhängige Leistungskurve einer Glühbirne	25
13	Zeigerdiagramm einer sysmetrisch ohmsch-belastete Dreieckschaltung	27
14	Zeigerdiagramm einer symmetrisch ohmsch-belastete Sternschaltung .	29
15	Zeigerdiagramm einer asymmetrisch ohmsch-belastete Sternschaltung ohne Neutralleiterbruch	30
16	Zeigerdiagramm einer asymmetrisch ohmsch-belastete Sternschaltung mit Neutralleiterbruch	31
17	Zeigerdiagramme einer real-belastete Sternschaltung und dessen vertauschten Leiter	35
18	Leistungsverteilung bei Leiterbruch	37

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Geräte	16
2	Gemessene Werte bei der Variation der ohmschen Last	18
3	Abgelesene Werte bei symmetrischer Belastung in Dreiecksschaltung .	19
4	Abgelesene Werte bei Sternschaltung	20
5	Abgelesene Werte für die Bestimmung der Wirkleistung	22
6	Errechnete Strangströme bei der Dreiecksschaltung	26
7	Errechnete Leistungen bei der Dreiecksschaltung	26
8	Errechnete Leistungen bei der Sternschaltung	28
9	Errechnete Werte für die Wirk- und Blindleistungen bei allgemeiner Last	33
10	Errechnete Werte für die Scheinleistungen bei allgemeiner Last	34