

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM TECHNISCHE PHYSIK 1 & 2

PHY.M40 & PHY.M50

Übungstitel: Leistungsmessung im Wechsel- und Drehstromnetz

Betreuer: Stadlhofer Michael

Name: Wachmann Elias, Zach Andreas

Kennzahl: GR A2 Matrikelnummer: 12004232, 12004790

Datum: 13.10.2022 WS x SS

Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgabenstellung	3
2.	Grundlagen	3
3.	Geräteliste	4
4.	Versuchsdurchführung	6
4.1.	Leistungsmessung an einer Ohm'schen Last	6
4.2.	Leistungsmessung bei symmetrischer und asymmetrischer Ohm'scher Last	7
4.2.1.	Dreiecksschaltung (symmetrisch)	7
4.2.2.	Sternschaltung (symmetrisch)	8
4.2.3.	Sternschaltung (asymmetrisch)	8
4.3.	Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz	10
4.3.1.	Wirkleistungsmessung bei allgemeiner Last	10
4.3.2.	Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last	11
4.4.	Asynchron-Drehstrommotor	12
5.	Auswertung	13
5.1.	Leistungsmessung an einer Ohm'schen Last	13
5.2.	Leistungsmessung bei symmetrischer und asymmetrischer Ohm'scher Last	15
5.2.1.	Symmetrische Dreieckschaltung	15
5.2.2.	Symmetrische Sternschaltung	17
5.2.3.	Asymmetrisch belastete Sternschaltung	18
5.2.4.	Asymmetrisch belastete Sternschaltung mit Neutralleiterbruch	20
5.3.	Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz	21
5.4.	Asynchron-Drehstrommotor	23
6.	Diskussion	23
7.	Zusammenfassung	25
A.	Schaltpläne	29

1. Aufgabenstellung

1. Leistungsmessung an einer ohmschen Last im Wechselstromkreis
2. Wirkleistungsmessung im Drehstromnetz bei symmetrischer ohmscher Last in Stern- und Dreieckschaltung mittels Aronschaltung
3. Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz
4. Rudimentärer Asynchron-Drehstrommotor

2. Grundlagen

Die hier angeführten theoretischen Grundlagen zum Verständnis der Schaltungen basieren auf den Vorlesungsunterlagen der Experimentalphysik II-VO sowie den mittels TeachCenter zur Verfügung gestellten Vorbereitungsunterlagen (2022).

In Wechsel- sowie Gleichstromkreisen gilt an einer Ohm'schen Last das Ohm'sche Gesetz:

$$U = R \cdot I \quad (1)$$

Die Wirkleistung an so einem Verbraucher unterliegt (unter Verwendung von Gleichung 1) folgenden Zusammenhängen:

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

Im Gegensatz zu Gleichstromkreisen fungieren Kondensatoren und Spulen in Wechselstromkreisen als kapazitive bzw. induktive Verbraucher. In solchen kapazitiv und/oder induktiv belasteten Wechselstromkreisen ist es nun zweckmäßig, auftretende Größen über komplexe Zahlen zu beschreiben. Im Falle des komplexen Widerstands (Impedanz \underline{Z}) setzt sich dieser aus dem reellen Wirkwiderstand vorliegender Ohm'scher Verbraucher (Resistenz R) und dem imaginären Blindwiderstand vorliegender kapazitiver oder induktiver Lasten (Reaktanz X) zusammen.

$$\underline{Z} = R + iX \quad (3)$$

Komplexe Größen werden unterstrichen geschrieben, die dazugehörigen Beträge nicht. Das Ohm'sche Gesetz lässt sich nun bequem auf den skalaren Körper der komplexen Zahlen erweitern:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (4)$$

Die Resistenz Ohm'scher Verbraucher ist gleich deren Widerstand R , die Reaktanzen kapazitiver (\underline{X}_C) und induktiver (\underline{X}_L) Lasten berechnen sich wie folgt:

$$\underline{X}_C = -\frac{i}{\omega C} \quad (5a)$$

$$\underline{X}_L = +i\omega L \quad (5b)$$

ω beschreibt hierbei Netzfrequenz in rad s^{-1} , $i = \sqrt{-1}$ die imaginäre Einheit. Je nach Betrag der vorliegenden Reaktanz des Systems, erfahren Strom und Spannung eine unterschiedlich große Phasenverschiebung zueinander. Gibt es im System nur kapazitive Lasten, liegt der Strom um einen Winkel $-\pi/2$ zur Spannung versetzt ($\pi/2$ vor der Spannung), bei rein induktiven Lasten um einen Winkel $+\pi/2$ ($\pi/2$ hinter der Spannung).

Die komplexen Ströme und Spannungen können nun statisch in einem sogenannten Zeigerdiagramm übersichtlich aufgetragen werden. Hierbei zeichnet man Vektoren in Polarkoordinaten, die als Winkel den Phasenversatz zueinander und als Länge den Effektivwert der jeweiligen Größe aufzeigen. Bei der mathematischen Darstellung empfiehlt sich die komplexe Schreibweise nach Euler:

$$\underline{U} = U_{\text{eff}} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_U)} \quad (6a)$$

$$\underline{I} = I_{\text{eff}} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_I)} \quad (6b)$$

Da hier die Effektivwerte als Amplituden der komplexen Größen verwendet wurden, können diese ohne Weiteres addiert werden, um wieder einen Effektivwert als Amplitude zu erhalten, der so auch an einem Messgerät, das die Summe von Spannungen oder Strömen misst, abgelesen werden kann.

Auch die im Wechselstrom umgesetzte Leistung kann als komplexe Größe geschrieben und in einem Zeigerdiagramm aufgetragen werden. Hierbei beschreibt man die komplexe Scheinleistung \underline{S} als zusammengesetzte Größe aus der reellen Wirkleistung P und der imaginären Blindleistung Q , deren Betrag als Scheinleistung S . Diese berechnet sich in Anlehnung an die reelle Gleichung 2 im Komplexen folgendermaßen:

$$\underline{S} = P + iQ = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \quad (7a)$$

$$S = |\underline{S}| \quad (7b)$$

$$P = \text{Re}(S) \quad (7c)$$

$$Q = \text{Im}(S) \quad (7d)$$

$$(7e)$$

Hierbei bezeichnet \underline{I}^* den komplex-konjugierten Strom.

3. Geräteliste

Für den praktischen Aufbau und die Messungen der geforderten Größen wurden die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Geräte und Hilfsmittel verwendet.

Tabelle 3.1: Verwendete Geräte und wichtige Materialien

Gerät	Hersteller	Modell	Unsicherheit	Inventar-Nr.	Anmerkung
Joule- und Wattmeter	Leybold	531 831	$\pm 1\%$	0161471	digital
Labortrennstelltrafo	Thalheimer Transformatorenwerke GmbH	LTS 606/1	-	0161470	-
Multimeter	Mastech	MY68	V~ 400 V-Ränge: $\pm(0,8\% + 300 \text{ mV})$	-	2×
Voltmeter	Norma	-	± 1 Skalenstrich	VII/1120/1, VII/1120/2, U_2	3×
Amperemeter	Norma	-	± 1 Skalenstrich	VII/1106/2, VII/1106/3, VII/1106/6, VII/1106/8	4×
Wattmeter	Chauvin Arnoux	C.A 405	± 1 Skalenstrich	-	3×
Wattmeter	Norma	-	± 1 Skalenstrich	F19	-
Bananenstecker Kabel	-	-	-	-	-
Glühbirnen	-	-	-	-	$3 \times 60 \text{ W},$ $3 \times 75 \text{ W}$
Kondensator	-	12 μF	-	-	-
Spule	-	-	-	-	-
Heizwiderstand	-	-	-	-	3×
Sicherungsbox zum Anschluss	-	-	-	-	-
Spulen mit Eisenkern	-	-	-	-	3×
Metallscheibe auf 3D-gedrucktem Sockel	-	-	-	-	-
Digitaler Drehzahlmesser	Hancaner	DT2234C ⁺	$\pm(0,05\% + 0,1 \text{ min}^{-1})$	-	-

Anmerkung zu den Unsicherheiten:

Zur Unsicherheitsangabe werden die jeweiligen Unsicherheitsmaße der Geräte, welche aus den Datenblättern (sofern vorhanden) entnommen werden, verwendet. Für die analogen Messgeräte wird eine kombinierte Ablese- und Mess-Unsicherheit von ± 1 Skalenstrich verwendet.

4. Versuchsdurchführung

Das Labor zur Leistungsmessung teilt sich auf mehrere Teilversuche auf, welche im Folgenden gesondert behandelt werden. Referenzierte Schalpläne für die Teilversuche sind im Anhang angeführt.

4.1. Leistungsmessung an einer Ohm'schen Last

Für den ersten Teilversuch wird eine 60-Watt-Glühlampe (Wolfram) im Sinne einer Sternschaltung über eine Phase und den Neutralleiter an ein Netzteil angeschlossen. Dies geschieht jedoch nicht direkt, sondern mittels eines zwischengeschalteten digitalen Wattmeters. Das Netzteil ermöglicht schließlich das Variieren der Spannung im Bereich 10 V bis 230 V und damit eine Anpassung der verbrauchten Leistung. In Abbildung 4.1 ist der Aufbau zum ersten Versuch abgebildet. Der zugehörige Schaltplan in Abbildung A.1 findet sich im Anhang.

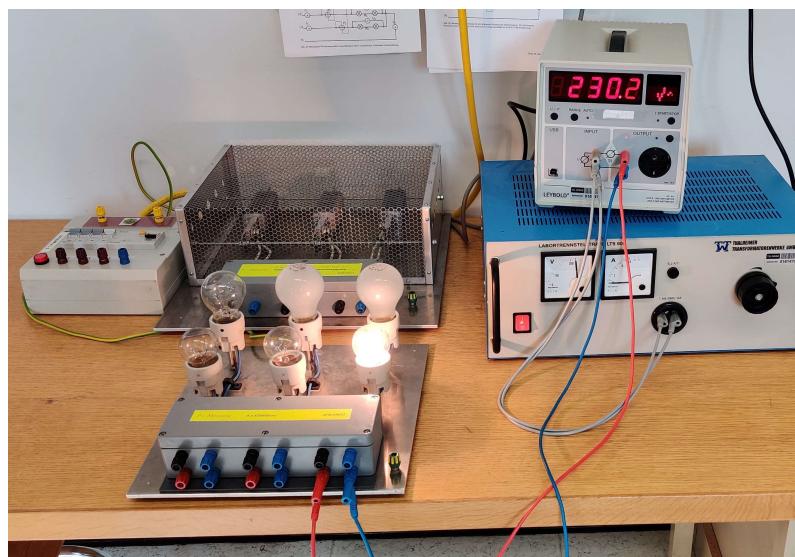


Abbildung 4.1: Aufbau Leistungsmessung an einer ohmschen Last

Die Spannung, welche über die Glühlampe abfällt, wird nun in 20 V-Schritten von 10 V bis auf einschließlich 250 V erhöht. Die gemessenen Werte dazu finden sich in Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Messwerte einzelne ohmsche Last. Vgl. Abbildung A.1

U / V	I / mA	P / W
$10,20 \pm 0,11$	$0,069 \pm 0,007$	$0,71 \pm 0,08$
$30,0 \pm 0,3$	$0,103 \pm 0,011$	$3,1 \pm 0,4$
$50,6 \pm 0,6$	$0,126 \pm 0,013$	$6,4 \pm 0,7$
$70,3 \pm 0,8$	$0,146 \pm 0,015$	$10,3 \pm 1,1$
$90,7 \pm 1,0$	$0,164 \pm 0,017$	$14,9 \pm 1,6$
$110,1 \pm 1,1$	$0,181 \pm 0,019$	20 ± 3
$130,2 \pm 1,3$	$0,20 \pm 0,02$	26 ± 3
$150,1 \pm 1,5$	$0,21 \pm 0,03$	32 ± 5
$170,3 \pm 1,7$	$0,23 \pm 0,03$	38 ± 6
190 ± 2	$0,24 \pm 0,03$	45 ± 6
210 ± 3	$0,25 \pm 0,03$	53 ± 7
230 ± 3	$0,26 \pm 0,03$	61 ± 7
250 ± 3	$0,28 \pm 0,03$	69 ± 8

Die Unsicherheiten in der Leistung ergeben sich aus der Unsicherheit der Spannungs- und Strommessung.

4.2. Leistungsmessung bei symmetrischer und asymmetrischer Ohm'scher Last

Im Folgenden werden Aufbau und Durchführung zur Wirkleistungsmessung im Drehstromnetz beschrieben. Die Leistungsmessung erfolgt mittels Aronschaltung. Beim Aufbau mit Dreiecksschaltung wird das Netz mit einem Ohm'schen Verbraucher symmetrisch belastet, anschließend wird das Netz zu einer Sternschaltung umgebaut, welche im ersten Teilversuch symmetrisch und im zweiten asymmetrisch belastet wird.

4.2.1. Dreiecksschaltung (symmetrisch)

Zuallererst wird die Schaltung nach Abbildung A.2 aufgebaut. Je zwei Glühlampen unterschiedlicher Leistungsaufnahme ($1 \times 60\text{ W} + 1 \times 75\text{ W} = 135\text{ W}$) fungieren pro Strang als Verbraucher und führen somit zu einer symmetrischen Belastung. Mit zwei Wattmetern, drei Voltmetern und vier Amperemetern werden alle Spannungen, Ströme und Leistungsaufnahmen im Netz gemessen, um für die Auswertung Zeigerdiagramme erstellen zu können. Die gemessenen Daten finden sich in Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Gemessene Spannungen, Ströme und Leistungen im Drehstromnetz mit Dreiecksschaltung mit symmetrischer Ohm'scher Last. I_4 bezeichnet dabei den Messwert über den Neutralleiter. Vgl. Abbildung A.2

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	155 ± 5	$0,455 \pm 0,003$	392 ± 3
2	155 ± 5	$0,470 \pm 0,003$	$397,0 \pm 1,0$
3	-	$0,465 \pm 0,003$	395 ± 3
4	-	$0,265 \pm 0,005$	-

4.2.2. Sternschaltung (symmetrisch)

Anschließend wird die Schaltung aus Unterunterabschnitt 4.2.1 zu einer Sternschaltung umgebaut (Abbildung A.3), die Last bleibt dieselbe und somit symmetrisch. Abermals werden die Verbraucherleistungen gemessen. Die gemessenen Daten finden sich in Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Gemessene Spannungen, Ströme und Leistungen im Drehstromnetz mit Sternschaltung mit symmetrischer Ohm'scher Last. I_4 bezeichnet dabei den Messwert im Neutralleiter. Vgl. Abbildung A.3

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	62 ± 3	$0,1970 \pm 0,0010$	227 ± 3
2	65 ± 3	$0,2040 \pm 0,0010$	$231,3 \pm 0,5$
3	-	$0,1990 \pm 0,0010$	230 ± 3
4	-	$0,006 \pm 0,002$	-

4.2.3. Sternschaltung (asymmetrisch)

Nun wird die Schaltung aus Unterunterabschnitt 4.2.2 neu belastet, indem die Glühbirnen anders kombiniert werden, sodass eine asymmetrische Belastung entsteht.

Strang 1: 1×60 W

Strang 2: 2×75 W

Strang 3: 2×60 W + 1×75 W

Es werden zwei unterschiedliche Messungen durchgeführt:

1. Normalbetrieb mit Strommessgerät im Neutralleiter
2. Spannungsmessgerät (anstatt Strommessgerät) im Neutralleiter (simulierter Bruch)

In Abbildung 4.2 wird der asymmetrische Aufbau im Normalbetrieb (Amperemeter im Neutralleiter) und in Abbildung 4.3 der simulierte Leiterbruch (Voltmeter im Neutralleiter) abgebildet.



Abbildung 4.2: Sternschaltung mit asymmetrischer Last im Normalbetrieb



Abbildung 4.3: Sternschaltung mit asymmetrischer Last im simulierten Leiterbruch

Tabelle 4.4: Gemessene Spannungen, Ströme und Leistungen im Drehstromnetz mit Sternschaltung mit asymmetrischer Ohm'scher Last und Amperemeter im Neutralleiter. I_4 bezeichnet dabei den Messwert im Neutralleiter. Vgl. Abbildung A.3 mit den oben beschriebenen Veränderungen der Lasten in den Strängen.

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	70 ± 3	$0,255 \pm 0,003$	$226,0 \pm 1,0$
2	52 ± 3	$0,230 \pm 0,003$	$230,4 \pm 0,5$
3	-	$0,1620 \pm 0,0010$	$228,0 \pm 1,0$
4	-	$0,082 \pm 0,002$	-

Tabelle 4.5: Gemessene Spannungen, Ströme und Leistungen im Drehstromnetz mit Sternschaltung mit asymmetrischer Ohm'scher Last und Voltmeter im Neutralleiter (simulierter Leiterbruch). U_4 bezeichnet dabei den Messwert im Neutralleiter. Vgl. Abbildung A.3 mit den oben beschriebenen Veränderungen der Lasten in den Strängen + simuliertem Leiterbruch.

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	75 ± 3	$0,235 \pm 0,003$	$196,0 \pm 1,0$
2	58 ± 3	$0,228 \pm 0,003$	$228,0 \pm 0,5$
3	-	$0,1710 \pm 0,0010$	264 ± 2
4	-	-	$39,1 \pm 1,0$

4.3. Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz

Die folgenden beiden Teilversuche beschäftigen sich mit der Wirk- bzw. Blindleistungsmessung bei allgemein belasteten Stromkreisen (ergo inkl. Induktivitäten und Kapazitäten) im Dreiphasennetz.

4.3.1. Wirkleistungsmessung bei allgemeiner Last

Das Schaltnetz wird laut Abbildung A.4 aufgebaut. Als Verbraucher wird der erste Vorschlag aus der Tabelle aus der Angabe (2022) genommen. Dieser Auszug sei in Tabelle 4.6 dargestellt.

Tabelle 4.6: Auszug aus der Tabelle aus dem Angabenblatt von Dipl. Ing. Reingruber Herbert, 2022, Strangbezeichnung von Z_i auf L_i umbenannt

Strang	Verbraucher
L1	Heizwiderstand
L2	Glühlampe + Kondensator
L3	Heizwiderstand + Induktivität

Abermals werden mittels drei Leistungsmessgeräten, vier Strommessgeräten und fünf Spannungsmessgeräten genügend Daten über den vorliegenden Stromkreis gesammelt, so dass zur Auswertung Zeigerdiagramme erstellt werden können. Die gemessenen Daten finden sich Tabelle 4.7.

Tabelle 4.7: Wirkleistungsmessung im Dreiphasennetz mit allgemeiner Last (Tabelle 4.6). Die Bezeichnung der Messgeräte folgt größtenteils aus Abbildung A.4. I_4 bezeichnet den Strom durch den Neutralleiter, U_3 den Spannungsabfall über den Kondensator und U_5 jenen über die Spule. Vgl. Abbildung A.4

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	355 ± 5	$1,520 \pm 0,010$	$227,0 \pm 1,0$
2	62 ± 3	$0,325 \pm 0,003$	$210,0 \pm 1,0$
3	330 ± 5	$1,500 \pm 0,010$	$84,0 \pm 0,5$
4	-	$1,500 \pm 0,010$	$222,5 \pm 0,5$
5	-	-	$47,4 \pm 0,3$

Im Anschluss an diese Messung werden die Phasenleiter L2 und L3 miteinander vertauscht. Es werden erneut alle Messgeräte abgelesen und die Werte in Tabelle 4.8 vermerkt.

Tabelle 4.8: Wirkleistungsmessung im Dreiphasennetz mit allgemeiner Last (Tabelle 4.6). Aufbau mit im Vergleich zu Abbildung A.4 vertauschten Phasenleitern L2 und L3. Die Bezeichnung der Messgeräte folgt größtenteils aus Abbildung A.4. I_4 bezeichnet den Strom durch den Neutralleiter, U_3 den Spannungsabfall über den Kondensator und U_5 jenen über die Spule. Vgl. Abbildung A.4

Messgerätindex i	P_i / W	I_i / A	U_i / V
1	360 ± 5	$1,520 \pm 0,010$	$228,0 \pm 1,0$
2	62 ± 3	$0,325 \pm 0,003$	$212,0 \pm 1,0$
3	330 ± 5	$1,500 \pm 0,010$	$84,5 \pm 0,5$
4	-	$0,980 \pm 0,005$	$222,4 \pm 0,5$
5	-	-	$47,2 \pm 1,0$

4.3.2. Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last

Zum Abschluss des Aufgabenteils der Leistungsmessung wird die im vorherigen Abschnitt bereits aufgebaute Schaltung laut Abbildung A.5 modifiziert, sodass anstelle der Wirkleistung die Blindleistung gemessen werden kann. Die von den Watt-, Volt- und Amperemetern abgelesenen Werte finden sich in Tabelle 4.9.

Tabelle 4.9: Blindleistungsmessung im Dreiphasennetz mit allgemeiner Last (Tabelle 4.6). Die Bezeichnung der Messgeräte folgt größtenteils aus Abbildung A.4. I_4 bezeichnet den Strom durch den Neutralleiter, U_3 den Spannungsabfall über den Kondensator und U_5 jenen über die Spule. Vgl. Abbildung A.5

Messgerätindex i	Q_i / W	I_i / A	U_i / V
1	5 ± 3	$1,540 \pm 0,010$	$228,0 \pm 1,0$
2	40 ± 3	$0,330 \pm 0,003$	$211,0 \pm 1,0$
3	115 ± 3	$1,520 \pm 0,010$	$84,0 \pm 0,5$
4	-	$1,500 \pm 0,010$	$222,5 \pm 0,5$
5	-	-	$47,0 \pm 0,3$

Abermals werden Phasenleiter L2 und L3 vertauscht und die Anzeigen der analogen und digitalen Messgeräte neu abgelesen. Diese Daten befinden sich in Tabelle 4.10.

Tabelle 4.10: Blindleistungsmessung im Dreiphasennetz mit allgemeiner Last (Tabelle 4.6). Aufbau mit im Vergleich zu Abbildung A.5 vertauschten Phasenleitern L2 und L3. Die Bezeichnung der Messgeräte folgt größtenteils aus Abbildung A.4. I_4 bezeichnet den Strom durch den Neutralleiter, U_3 den Spannungsabfall über den Kondensator und U_5 jenen über die Spule. Vgl. Abbildung A.5

Messgerätindex i	Q_i / W	I_i / A	U_i / V
1	2 ± 3	$1,520 \pm 0,010$	$227,0 \pm 1,0$
2	40 ± 3	$0,330 \pm 0,003$	$210,0 \pm 1,0$
3	124 ± 2	$1,500 \pm 0,010$	$84,5 \pm 0,5$
4	-	$0,960 \pm 0,005$	$221,4 \pm 0,5$
5	-	-	$46,7 \pm 0,5$

4.4. Asynchron-Drehstrommotor

Zuletzt wurde noch ein zusammengebastelter Asynchronmotor betrieben. Wie auf Abbildung 4.4 ersichtlich ist, sind die drei Spulen jeweils über einen Heizwiderstand an einen Phasenleiter angeschlossen. Die Bestimmung der Umdrehungsgeschwindigkeit erfolgt mittels digitalem Drehzahlmesser.

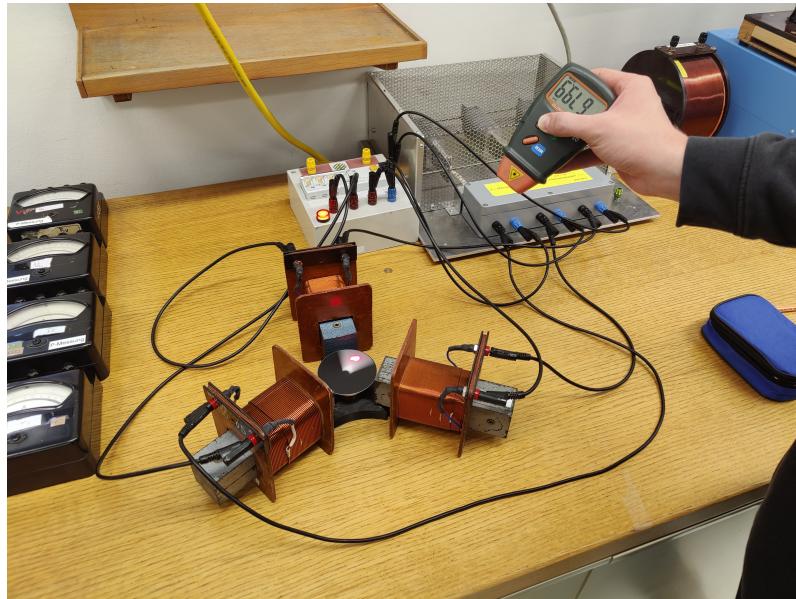


Abbildung 4.4: Aufbau rudimentärer Asynchronmotor

5. Auswertung

Im Folgenden werden die einzelnen Teilversuche ausgewertet. Die angegebenen Unsicherheiten wurden in python mittels dem package „*uncertainties*“, welches intern lineare Fehlerfortpflanzung benutzt, errechnet (Lebigot, 2022).

Anmerkung zu den Phasenwinkeln in den Zeigerdiagrammen: Da die exakten Werte der Phasenwinkel aufgrund des Messaufbaus nicht immer berechenbar sind, müssen gewisse Annahmen getroffen werden. Aus diesem Grund ist immer eine Größe (meist eine Spannung) auf die x - bzw. y -Achse gelegt. Der Phasenwinkel zwischen den Spannungen (Strangspannungen bei Dreieckschaltung) wurde dann als ideal mit 120° angenommen. Da für induktive und kapazitive Leistungen zudem auch keine tatsächlichen Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung gemessen wurden, werden diese ebenfalls idealisiert mit $\pm 90^\circ$ angegeben.

5.1. Leistungsmessung an einer Ohm'schen Last

Zur Auswertung des ersten Teilversuches wird die Leistung in Abhängigkeit von der Spannung aufgetragen und ein Least-Squares-Fit über die Messdaten gelegt, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

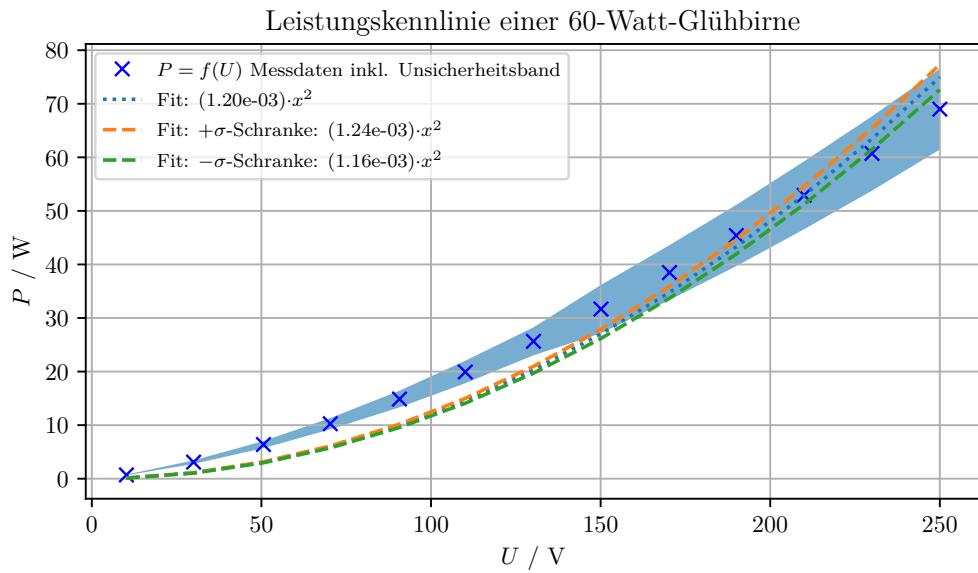


Abbildung 5.1: Quadratischer Fit durch die Messdaten. Messdaten inkl. Unsicherheitsband (blau) und zwei begrenzende Fits (orange und grün), welche die $\pm\sigma$ -Intervallgrenzen in jedem Koeffizienten der quadratischen Gleichung beschreiben.

Aus dem Fit-Koeffizienten lässt sich nun mittels $P = U^2/R$ der Widerstand ermitteln. Es ergibt sich somit:

$$R_{\text{fit}} = (830 \pm 30) \Omega$$

Wertet man analog die einzelnen Messungen aus Tabelle 4.1 aus erhält man für den Widerstand die Werte in Tabelle 5.1

Tabelle 5.1: Messwerte einzelne ohmsche Last und errechneter Widerstand. Vgl. Abbildung A.1

U / V	I / mA	R / Ω
$10,20 \pm 0,11$	$0,069 \pm 0,007$	148 ± 16
$30,0 \pm 0,3$	$0,103 \pm 0,011$	290 ± 40
$50,6 \pm 0,6$	$0,126 \pm 0,013$	400 ± 50
$70,3 \pm 0,8$	$0,146 \pm 0,015$	480 ± 50
$90,7 \pm 1,0$	$0,164 \pm 0,017$	550 ± 60
$110,1 \pm 1,1$	$0,181 \pm 0,019$	610 ± 70
$130,2 \pm 1,3$	$0,20 \pm 0,02$	660 ± 70
$150,1 \pm 1,5$	$0,21 \pm 0,03$	710 ± 110
$170,3 \pm 1,7$	$0,23 \pm 0,03$	750 ± 110
190 ± 2	$0,24 \pm 0,03$	790 ± 110
210 ± 3	$0,25 \pm 0,03$	800 ± 100
230 ± 3	$0,26 \pm 0,03$	900 ± 100
250 ± 3	$0,28 \pm 0,03$	900 ± 100

Es zeigt sich also, dass der durch den Fit ermittelte Wert sich mit jenen errechneten Widerstandswerten bei höherer Spannung und höheren Stromstärken besser deckt. Dies ist auch beim Blick auf Abbildung 5.1 leicht ersichtlich, da hier der Fit die Messwerte kreuzt.

5.2. Leistungsmessung bei symmetrischer und asymmetrischer Ohm'scher Last

Für die drei unterschiedlichen Stromnetzaufbauten aus Unterabschnitt 4.2 werden jeweils alle nicht gemessenen Spannungen, Ströme und Leistungsaufnahmen ausgerechnet, sodass schlussendlich Zeigerdiagramme angefertigt werden können, die das jeweils vorliegende Netz vollumfänglich beschreiben.

5.2.1. Symmetrische Dreieckschaltung

Zusätzlich zum direkt gemessenen Wert I_{31} , welcher $I_{n=4}$ aus der Tabelle 4.2 entspricht, werden noch die beiden weiteren Strangströme I_{12} und I_{23} errechnet (siehe Abschnitt 2). Es folgt aus

$$I_1 = \left| I_{12} \cdot e^{i30^\circ} + I_{31} \cdot e^{i150^\circ} \right|$$

Gleichung 8, welche auch analog für I_{23} verwendet werden kann.

$$I_{12} = \sqrt{I_1^2 - \frac{3I_{31}^2}{4}} - \frac{I_{31}}{2} \quad (8)$$

Die Verbraucherleistungen (Wirkleistungen) berechnen sich nach Gleichung 7c aus den Spannungen und Strömen aus Tabelle 4.2. Die Gesamtleistung ergibt sich folglich aus der Summe der gemessenen Leistungen der beiden Wattmeter. Somit ergeben sich die folgenden Werte aus Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Strangströme und Strangleistungen in einer symmetrischen Dreieckschaltung

Strang i	I_i / A	P_i / W
12	$0,260 \pm 0,006$	102 ± 3
23	$0,278 \pm 0,006$	110 ± 3
31	$0,265 \pm 0,005$	105 ± 3

Anmerkung gemessene und errechnete Leistung: Die gemessene Gesamtleistung wird jeweils mit einem hochgestellten M gekennzeichnet, die aus den Strömen und Spannungen errechnete mit einem hochgestellten R.

Die Gesamtleistung P_{ges}^M – also die Summe der beiden Wattmeter-Messwerte – ergibt sich zu:

$$P_{ges\Delta}^M = (310 \pm 8) W$$

Die Gesamtleistung P_{ges}^R – also die Summe der drei errechneten Leistungen in Tabelle 5.2 – ergibt sich zu:

$$P_{ges\Delta}^R = (310 \pm 8) W$$

Aus den errechneten Werten ergibt sich nun folgendes Zeigerdiagramm in Abbildung 5.2.

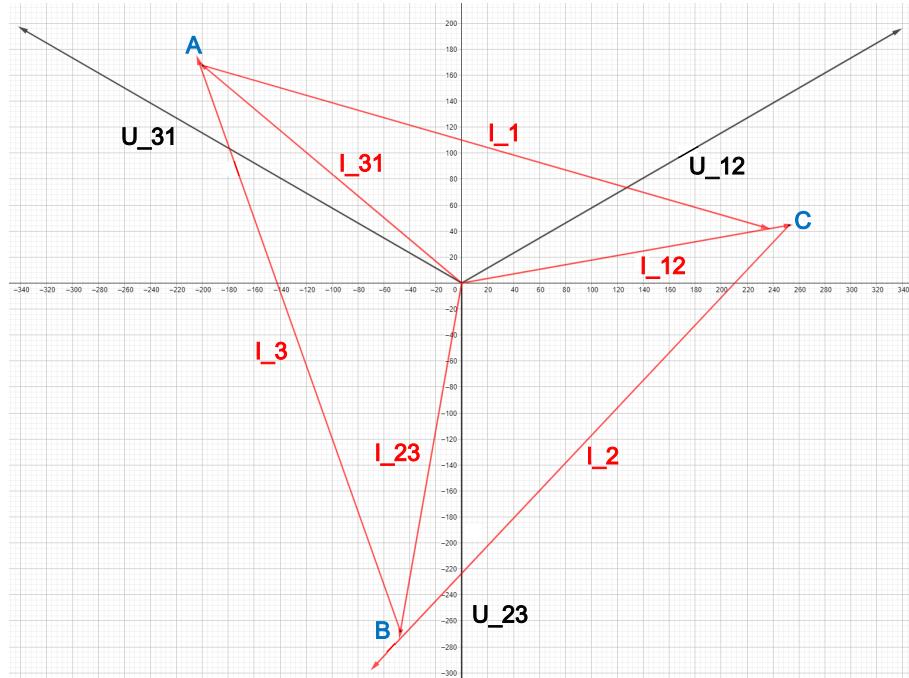


Abbildung 5.2: Zeigerdiagramm symmetrische Dreieckschaltung, Strom I_{xx} in mA und Spannung U_{xx} in V

5.2.2. Symmetrische Sternschaltung

Wie schon zuvor für die symmetrische Dreieckschaltung ergeben sich auch nun die Strangleistungen aus dem Produkt der Strangspannung und des Strangstroms. Mit den Werten aus Tabelle 4.3 ergeben sich die nachfolgenden Leistungen in Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Strangleistungen in einer symmetrischen Sternschaltung

Strang i	P_i / W
1	$44,7 \pm 0,7$
2	$47,2 \pm 0,3$
3	$45,8 \pm 0,7$

Die Gesamtleistung P_{ges}^M – also die Summe der beiden Wattmeter-Messwerte – ergibt sich zu:

$$P_{ges\star}^M = (127 \pm 5) \text{ W}$$

Errechnet man die Gesamtleistung alternativ über die Summe der einzelnen Strangleistungen, erhält man einen Wert von:

$$P_{ges_St\star}^R = (138 \pm 1) \text{ W}$$

Des Weiteren ergibt sich das folgende Zeigerdiagramm in Abbildung 5.3.

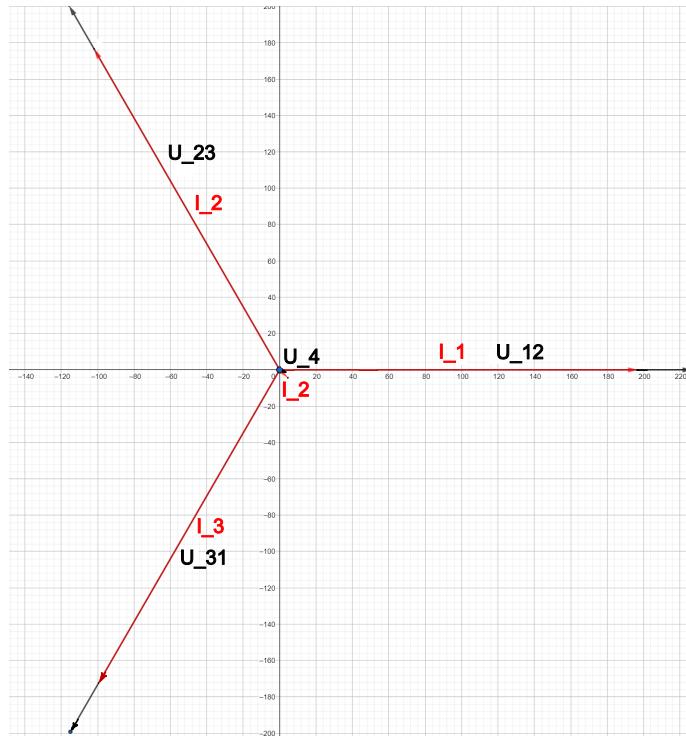


Abbildung 5.3: Zeigerdiagramm symmetrische Sternschaltung, Strom I_{xx} in mA und Spannung U_{xx} in V

Unterschiede Dreieckschaltung und Sternschaltung (symmetrisch): Der Unterschied zwischen Stern- und Dreieckschaltung ist die Leistungsaufnahme der Bauteile. Im sonst baugleichen Schaltbild nimmt hier schließlich die Dreieckschaltung mit $P_{ges\Delta} = (310 \pm 8)$ W wesentlich mehr Leistung auf als die Sternschaltung, dazu jedoch später in Abschnitt 6 mehr.

5.2.3. Asymmetrisch belastete Sternschaltung

Im Vergleich zum vorhergehenden Versuch liegt in dieser Sternschaltung nun nicht mehr in allen Strängen dieselbe Last an. Es ergeben nach der Methodik aus Tabelle 5.4 die nachfolgenden Werte für die jeweiligen Strangleistungen.

Tabelle 5.4: Strangleistungen in einer asymmetrischen Sternschaltung

Strang i	P_i / W
1	$57,6 \pm 0,7$
2	$53,0 \pm 0,6$
3	$36,9 \pm 0,3$

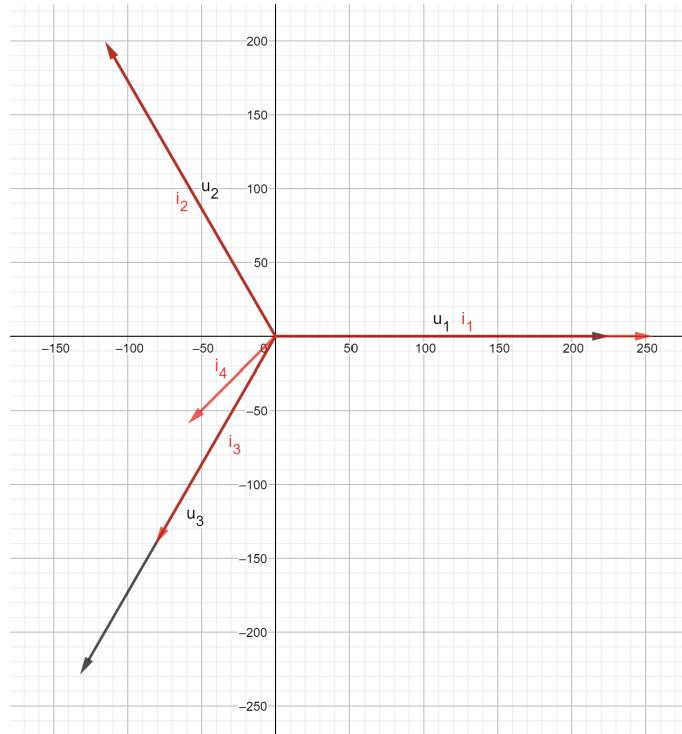
Die Gesamtleistung P_{ges}^M ergibt sich abermals über die Summe der Wattmeter-Ergebnisse:

$$P_{ges_asym\star}^M = (122 \pm 4) \text{ W}$$

Errechnet man die Gesamtleistung alternativ über die Summe der einzelnen Strangleistungen, erhält man einen Wert von:

$$P_{ges_asym_St\star}^R = (147,6 \pm 0,9) \text{ W}$$

Zudem ergibt sich das Zeigerdiagramm in Abbildung 5.4.

**Abbildung 5.4:** Zeigerdiagramm asymmetrische Sternschaltung, Strom I_{xx} in mA und Spannung U_{xx} in V

Hier kann man die Phasenwinkel mittels trigonometrischer Funktionen berechnen. Dazu werden die Strangspannungen auf 230V gesetzt und die Phasenwinkel für Induktivität und Kapazität werden idealisiert mit $\pm 90^\circ$ angenommen.

5.2.4. Asymmetrisch belastete Sternschaltung mit Neutralleiterbruch

Die Berechnung erfolgt komplett analog zum vorhergehenden Kapitel. Es ergeben sich wie schon zuvor die Werte in Tabelle 5.5 für die jeweiligen Strangleistungen.

Tabelle 5.5: Strangleistungen in einer asymmetrischen Sternschaltung

Strang i	P_i / W
1	$46,1 \pm 0,6$
2	$51,9 \pm 0,6$
3	$45,1 \pm 0,5$

Die Gesamtleistung P_{ges}^M ergibt sich abermals aus der Summe der Wattmeter-Ergebnisse:

$$P_{ges_asym\star}^M = (132 \pm 4) \text{ W}$$

Errechnet man die Gesamtleistung alternativ über die Summe der einzelnen Strangleistungen, erhält man einen Wert von:

$$P_{ges_asym_St\star}^R = (143 \pm 1) \text{ W}$$

Zudem ergibt sich das Zeigerdiagramm in Abbildung 5.5.

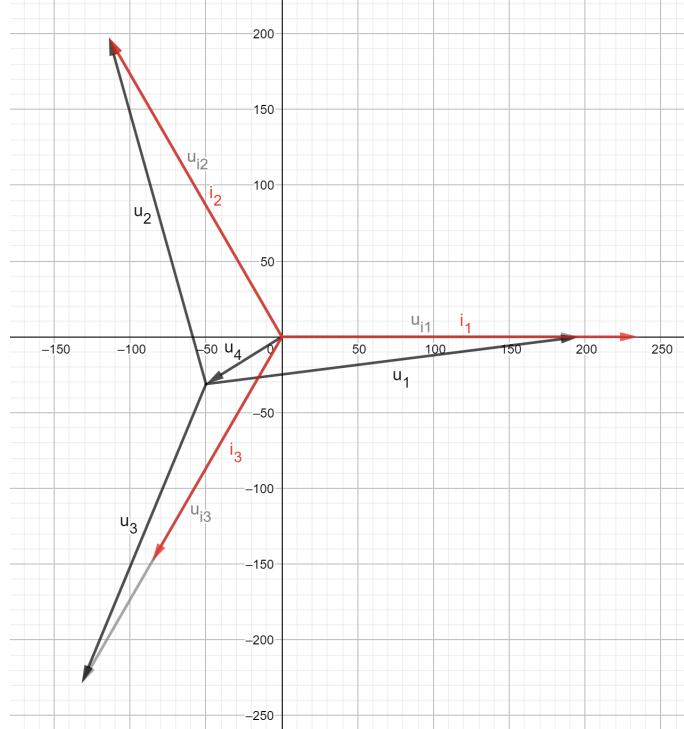


Abbildung 5.5: Zeigerdiagramm asymmetrische Sternschaltung mit Neutralleiterbruch, Strom I_{xx} in mA und Spannung U_{xx} in V

Wie bereits in Unterunterabschnitt 5.2.3 beschrieben, werden auch hier die Strangspannungen und Phasenverschiebungen auf dieselbe Art fixiert.

5.3. Wirk- und Blindleistungsmessung bei allgemeiner Last im Dreiphasennetz

Für die vorliegenden Lasten in einem allgemeinen Dreiphasennetz werden nun die Wirk- und Blindleistung nach den Gleichungen 7c und 7d berechnet. Es ergeben sich folgende Werte in Tabelle 5.6 unter Zuhilfenahme der Werte aus den Tabellen 4.7 bis 4.10. Dabei sei angemerkt, dass die Blindleistungen jeweils mit einem Faktor $1/\sqrt{3}$ multipliziert wurde, da die Spannung bei der Messung in der Aronschaltung wegen des Abgreifens über 2 Phasen um diesen Faktor größer ist. Der Vergleich mit den gemessenen Werten soll in Abschnitt 6 erfolgen.

Tabelle 5.6: Blind-, Wirk- und Scheinleistung in einer asymmetrischen Sternschaltung sowohl für den Standardaufbau als auch die Variante mit vertauschten Außenleitern (gekennzeichnet durch †). Per Konvention wird die Blindleistung des Kondensators mit negativem Vorzeichen angegeben. Leistungen direkter Messungen sind mit hochgestelltem M und errechnete mit R gekennzeichnet.

Messgerätindex i	P_i^M / W	$P_i^{\dagger M}$ / W	Q_i^M / Var	$Q_i^{\dagger M}$ / Var
1	355 ± 5	360 ± 5	±3 ± 2	±1 ± 2
2	62 ± 3	62 ± 3	-23,1 ± 1,7	-23,1 ± 1,7
3	330 ± 5	330 ± 5	89,5 ± 1,7	71,6 ± 1,2
	P_{ges}^M / W	$P_{ges}^{\dagger M}$ / W	Q_{ges}^M / Var	$Q_{ges}^{\dagger M}$ / Var
Gesamt Wirk-/Blindleistung	747 ± 8	752 ± 8	66 ± 5	48 ± 4
Strang i	P_i^R / W	$P_i^{\dagger R}$ / W	Q_i^R / Var	$Q_i^{\dagger R}$ / Var
1	345 ± 3	347 ± 3	0	0
2	68,2 ± 0,7	68,9 ± 0,7	-27,7 ± 0,3	-27,9 ± 0,3
3	334 ± 3	334 ± 3	71,4 ± 0,9	71,1 ± 0,9
	P_{ges}^R / W	$P_{ges}^{\dagger R}$ / W	Q_{ges}^R / Var	$Q_{ges}^{\dagger R}$ / Var
Gesamt Wirk-/Blindleistung	747 ± 4	750 ± 4	43,7 ± 0,9	43,2 ± 0,9

So ergibt sich die Scheinleistung für die normale Schaltung zu:

$$S^M = 756 \pm 8 \text{ VA}$$

für die direkte Messung und zu:

$$S^R = 748 \pm 4 \text{ VA}$$

für die Berechnung aus den Strömen und Spannungen der Tabellen 4.7 bis 4.10. Sowie für vertauschte Stränge zu:

$$S^{\dagger M} = 757 \pm 8 \text{ VA}$$

für die direkte Messung und zu:

$$S^{\dagger R} = 751 \pm 4 \text{ VA}$$

für die Berechnung aus den Strömen und Spannungen der Tabellen 4.7 bis 4.10.

Anmerkung Vorzeichen Q_1 und Q_1^\dagger :

Das Vorzeichen wurde in der praktischen Messung nicht ermittelt und ist somit nicht eindeutig, da es sich um rein ohmsche Komponenten im ersten Strang handelt. Aus diesem Grund werden die beiden Blindleistungen Q_1 und Q_1^\dagger als zusätzliche Unsicherheit in der Summe hinzugezählt.

Wie bereits zuvor erwähnt, werden die Phasenwinkel der Induktivität und Kapazität bzw. der Ohm'schen Widerstände als ideal ($\{0^\circ, -90^\circ, 90^\circ\}$) angenommen. Für den Versuch mit der „Standard“-Anordnung ergibt sich das Zeigerdiagramm in Abbildung 5.6, der Fall nach dem Vertauschen der Außenleiter ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Für Wirk- und Blindleistungsmessung ergeben sich bis auf im Unsicherheitsintervall liegende Differenzen dieselben Werte für Ströme und Spannungen und somit auch dieselben Zeigerdiagramme.

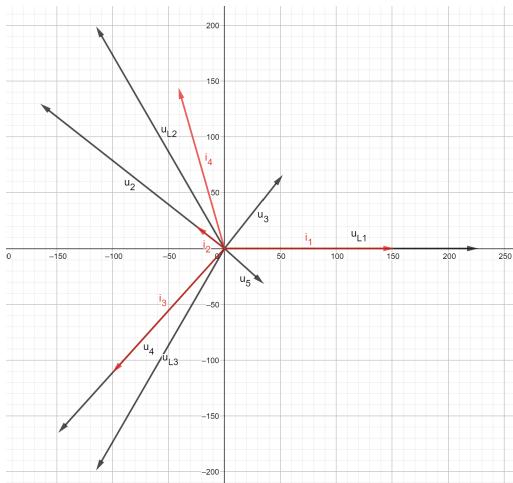


Abbildung 5.6: Zeigerdiagramm allgemeine Sternschaltung, Strom I_{xx} in cA und Spannung U_{xx} in V

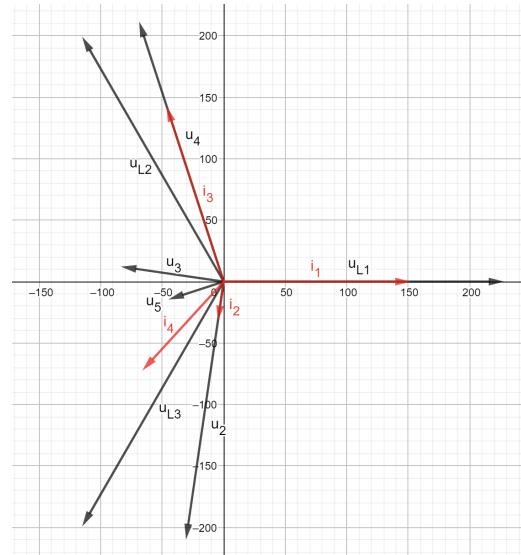


Abbildung 5.7: Zeigerdiagramm allgemeine Sternschaltung mit vertauschten Außenleitern ($L_2 \leftrightarrow L_3$), Strom I_{xx} in cA und Spannung U_{xx} in V

5.4. Asynchron-Drehstrommotor

Zuletzt wurde aus Freude zu Wissenschaft und Starkstrom noch ein rudimentärer Asynchronmotor betrieben. Mittels digitaler Drehzahlmessung konnte der Rotor auf eine Geschwindigkeit von

$$\omega \approx 680 \text{ min}^{-1} \approx 71 \text{ rad s}^{-1}$$

gebracht werden.

6. Diskussion

Leistungsverlauf Glühbirne

Wie erwartet ergibt sich für den gemessenen Leistungsverlauf in Abhängigkeit von der Spannung annähernd der analytische Zusammenhang $P(U) = U^2/R$, welcher für Ohm'sche Leiter charakteristisch ist. Aus Abbildung 5.1 wird ersichtlich, dass im Vergleich zur Lösung aus der quadratischen Regression mit $R = 830 \Omega$ die realen Gegebenheiten zu Beginn durch ein lineares Wachstum (Leistungsaufnahme höher als bei Fit) dominiert sind, ab circa 45 W jedoch einen langsameren Leistungsanstieg als quadratisch bedingen. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Material des Glühdrahts – Wolfram – ein Kaltleiter (PTC) ist und der Widerstand somit mit der Temperatur steigt und sich nicht linear wie ein Ohm'scher Widerstand verhält. Dadurch wird bei U^2/R mit steigender Temperatur durch einen höheren Widerstand R dividiert, wodurch P langsamer steigt. Im typischen Anwendungsbereich bei 230 V würde man jedoch, wie im Plot ersichtlich, eine ähnliche Leistungsaufnahme für einen idealen Ohm'schen Verbraucher mit 830Ω Widerstand erwarten.

Unterschied Dreieckschaltung und Sternschaltung (beides symmetrisch)

Wie schon oben erläutert, nimmt die Dreieckschaltung wesentlich mehr Leistung auf als die Sternschaltung bei gleichen Bauteilen. Erwarten würde man sich einen Faktor 3 zwischen den beiden Gesamtleistungen $P_{ges\Delta}$ und $P_{ges\star}$. Tatsächlich stellt sich ein Faktor von etwa

$$\frac{P_{ges\Delta}}{P_{ges\star}} = 2,42 \pm 0,10$$

ein. Eine gegebene Verbesserung der Messgenauigkeit würde diesen Faktor nun auch nicht maßgeblich verändert. Zu erklären ist die doch hohe Abweichung dadurch, dass Glühbirnen in der Regel für den Betrieb mit Lichtstrom – sprich über Sternschaltungen angeschlossen – ausgelegt sind. So ist die Charakteristik der Glühbirne bei hohen Leistungen und dementsprechend höheren Temperaturen im Glühdraht nicht mehr ausreichend genau mit dem Ohm'schen Gesetz beschreibbar.

Vergleich der Beträge I_0 und U_0 (Zeigerdiagramm und Messung)

Aus den beiden vorhergegangenen Zeigerdiagrammen ergibt sich zuerst $I_{4_Zg.} = 83,4 \text{ mA}$ und $U_{4_Zg.} = 58,9 \text{ V}$. Der grafisch ermittelte Wert $I_{4_Zg.}$ stimmt somit mit dem Messwert $I_4 = (82 \pm 2) \text{ mA}$ gut überein. Der Wert für $U_4 = (39,1 \pm 1,0) \text{ V}$ weist eine Diskrepanz auf. Diese Diskrepanz kann durch eventuelle parasitäre Einflüsse gerade in Abwesenheit

eines Neutralleiters zumindest bedingt begründet werden. Dennoch ist die Abweichung signifikant, weshalb ein Messfehler nicht ausgeschlossen werden kann.

Wirk- und Blindleistung in allgemeiner Sternschaltung

Entgegen der Erwartung aus der Theorie misst man wie aus Tabelle 4.9 und 4.10 ersichtlich eine Blindleistung im Strang 1, welcher grundsätzlich nur einen Ohm'schen Verbraucher aufweist. Im zweiten Fall (vertauschte Stränge L2 und L3) liegt 0 W innerhalb des 1σ -Unsicherheitsintervalls. Im ersten Fall jedoch liegt die Null nicht im Intervall, was auf parasitäre Einflüsse der Kabel und sonstiger Bauteile schließen lässt. Auch die Zeigerdiagramme ergeben nach Summierung der Spannungen bis auf kleine Abweichungen die erwarteten Strangspannungen. Nach Vertauschen der Außenleiter L2 und L3 kommt es zu geringerem Stromfluss durch den Neutralleiter, Wirk- und Scheinleistung über alle drei Stränge bleiben unverändert. Der reduzierte Stromfluss ist auf die durch die Induktivität und Kapazität hervorgerufenen Phasenverschiebungen zurückzuführen. Im ursprünglichen Fall (vor Vertauschung, vgl. Abbildung 5.6) „drücken“ Spule und Kondensator so die Ströme I_2 und I_3 näher zusammen. Tauscht man nun die beiden Komponenten durch umschließen der beiden Stränge (vgl. Abbildung 5.7) so wird der Phasenwinkel größer und die Vektorsumme für den Strom durch den Neutralleiter ergibt somit einen kleineren Vektor, was nun einen kleineren Neutralleiterstrom bedeutet.

Gesamtleistung über Aronschaltung vs. Summe der Strangleistungsaufnahmen

Vergleicht man die in Unterunterabschnitt 5.2.2 bis Unterunterabschnitt 5.2.4 angegebenen Gesamtleistungen, die sich einmal aus der Summe der Werte der Wattmeter in Aronschaltung und einmal aus der Summe der Leistungsaufnahmen der einzelnen Stränge ergeben, so fällt auf, dass diese Werte signifikant voneinander abweichen. Die Aronschaltung liefert dabei systematisch niedrigere Werte als die Summe der Strangleistungen. Hierbei ist anzunehmen, dass die Aronschaltung glaubwürdigere Werte liefert, da die verschalteten Wattmeter tatsächlich instantan Leistung messen und somit der real exakte Phasenwinkel berücksichtigt wird. Berechnet man die Leistungen der Einzelstränge wie im vorliegenden Protokoll, so werden idealisierte Annahmen bezüglich der relativen Phasen von Strom und Spannung zueinander angenommen, die in der Realität nicht haltbar sind. Die Resistanz einer kapazitiven oder induktiven Last ist nie gleich Null, da jeder Leiter, jedes Metall für sich bereits einen (meist) Ohm'schen Widerstand aufweist, somit weisen Spulen und Kondensatoren eine zusammengesetzte komplexe Impedanz auf und nicht nur eine rein imaginäre Reaktanz. Den Ergebnissen der Aronschaltung nach zu urteilen, weisen Strom und Spannung eine höhere Phasenverschiebung auf, als ideal angenommen, wodurch sich bei der komplexen Multiplikation ein niedrigerer Wert ergibt. Unter der Annahme, dass die Aronschaltung die exakten Werte liefert, ließe sich auch der Phasenversatz zwischen Strom und Spannung ausrechnen, indem jeweils derjenige Winkel berechnet wird, unter dem die komplexe Multiplikation dieselben Werte wie die Messung der Aronschaltung liefert.

Rudimentärer Asynchronmotor

Leider konnte die mittels Sternschaltung erreichte Maximalgeschwindigkeit von ca. 71 rad s^{-1} nicht mittels Umstecken auf Dreieckschaltung oder Reduzierung der Vorwiderstände erhöht werden. Nachdem zuerst einige Male die Sicherung den Stromkreis un-

terbrach oder der Motor sich durch die signifikant höheren Feldstärken spontan selbst zerlegte, resignierten die Experimentierenden.

7. Zusammenfassung

In der Laboreinheit zum vorliegenden Protokoll wurden Stromstärken, Spannungen, Wirk- und Blindleistungen in symmetrisch und asymmetrisch belasteten Drehstromnetzen gemessen. Dabei wurden die Netze sowohl in Stern- als auch in Dreieckschaltung verkabelt, als Verbraucher fungierten eine Kapazität in Form eines Kondensators, eine Induktivität in Form einer Spule und Ohm'sche Verbraucher in Form von diversen Glühbirnen unterschiedlicher Leistungsaufnahme, wobei die Lasten je nach Versuchsanordnung unterschiedlich geschaltet wurden.

Die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der Spannung einer Wolfram-Glühbirne wurde ausgemessen. Der Ohm'sche Widerstand der Glühbirne ergibt sich durch Regression der Messdaten zu

$$R_{\text{fit}} = (830 \pm 30) \Omega$$

Es wurden einerseits die Leistungsaufnahmen der Verbraucher einzelner Phasenleiter gemessen, andererseits die Gesamtleistungsaufnahme der Schaltung mittels zweier Wattmeter in Aronschaltung. Dabei fällt in der Gesamtleistung der Schaltung der Unterschied im Vergleich der Summe der beiden Wattmeter der Aronschaltung und der Summe der Leistungsaufnahmen der Einzelstränge auf. Die aufgenommenen Gesamtleistungen – einerseits durch Messung, andererseits durch Rechnung ermittelt – sind in Tabelle 7.1 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der Gesamtleistungsaufnahmen (Schein-/Wirk-/Blind-) der einzelnen Netzaufbauten in Messung und Berechnung. Gemessene Leistungen werden mit dem Exponenten M bezeichnet, berechnete mit R.

„ Δ “ bezeichnet die Dreiecksschaltung, „ $*$ “ die Sternschaltung mit symmetrischer („sym.“) und asymmetrischer („asym.“) Last, „allg.“ die Sternschaltung mit allgemeinen Lasten und „allg. †“ die Sternschaltung mit allgemeinen Lasten und vertauschten Phasenleitern L1 \leftrightarrow L2.

Netzaufbau	$P_{\text{ges}}^{\text{M}} / \text{W}$	$P_{\text{ges}}^{\text{R}} / \text{W}$	$Q_{\text{ges}}^{\text{M}} / \text{Var}$	$Q_{\text{ges}}^{\text{R}} / \text{Var}$	$S_{\text{ges}}^{\text{M}} / \text{VA}$	$S_{\text{ges}}^{\text{R}} / \text{VA}$
Δ	310 ± 8	310 ± 8	-	-	-	-
$*$ sym.	127 ± 5	138 ± 1	-	-	-	-
$*$ asym.	122 ± 4	$147,6 \pm 0,9$	-	-	-	-
$*$ asym. Leiterbruch	132 ± 4	143 ± 1	-	-	-	-
allg.	747 ± 8	747 ± 4	66 ± 5	$71,4 \pm 0,9$	756 ± 8	748 ± 4
allg. †	752 ± 8	750 ± 4	48 ± 4	$71,1 \pm 0,9$	757 ± 8	751 ± 4

Für die gebauten Netze wurden Zeigerdiagramme angefertigt. Abgesehen von der Diskrepanz bei U_4 in der Sternschaltung entsprechen die Zeigerdiagramme den Erwartungen und stehen in guter Übereinstimmung mit den Messwerten.

Abschließend lässt sich urteilen, dass die gemessenen Werte im Großen und Ganzen den theoretischen Vorhersagen entsprechen und somit die zugrundeliegende Theorie nicht falsifizieren.

Literaturverzeichnis

- Dipl. Ing. Reingruber Herbert, M. N. M. (2022). Leistungsmessung im Wechsel- und Drehstromnetz. https://tc.tugraz.at/main/pluginfile.php/299197/mod_folder/content/0/Leistungsmessung.pdf?forcedownload=1
- Lebigot, E. (2022). *uncertainties*. <https://github.com/lebigot/uncertainties/>

Abbildungsverzeichnis

4.1.	Aufbau Leistungsmessung an einer ohmschen Last	6
4.2.	Sternschaltung mit asymmetrischer Last im Normalbetrieb	9
4.3.	Sternschaltung mit asymmetrischer Last im simulierten Leiterbruch	9
4.4.	Aufbau rudimentärer Asynchronmotor	13
5.1.	Fit zu Versuch 1	14
5.2.	Zeigerdiagramm symmetrische Dreieckschaltung	17
5.3.	Zeigerdiagramm symmetrische Sternschaltung	18
5.4.	Zeigerdiagramm asymmetrische Sternschaltung	19
5.5.	Zeigerdiagramm asymmetrische Sternschaltung Neutralleiterbruch	20
5.6.	Zeigerdiagramm allgemeine Sternschaltung	22
5.7.	Zeigerdiagramm allgemeine Sternschaltung mit vertauschten Außenleitern (L ₂ ↔ L ₃)	22
A.1.	Schaltplan 0	29
A.2.	Schaltplan 1	29
A.3.	Schaltplan 2	30
A.4.	Schaltplan 3	30
A.5.	Schaltplan 4	31

Tabellenverzeichnis

3.1.	Geräteliste	5
4.1.	Messwerte einzelne ohmsche Last	7
4.2.	Dreiecksschaltung	8
4.3.	Sternschaltung (symmetrisch)	8
4.4.	Sternschaltung (asymmetrisch – normal)	9
4.5.	Sternschaltung (asymmetrisch – Leiterbruch)	10
4.6.	Verbraucher Versuch 3	10
4.7.	Wirkleistungsmessung	11
4.8.	Wirkleistungsmessung – Tausch	11
4.9.	Blindleistungsmessung	12
4.10.	Blindleistungsmessung – Tausch	12
5.1.	Messwerte einzelne ohmsche Last & errechneter Widerstand	15
5.2.	Strangströme und -leistungen in sym. Dreieckschaltung	16
5.3.	Strangleistungen in sym. Sternschaltung	17

5.4. Strangleistungen in asym. Sternschaltung	19
5.5. Strangleistungen in asym. Sternschaltung	20
5.6. Blind-, Wirk- und Scheinleistung in einer asym. Sternschaltung	21
7.1. Vergleich Gesamtleistungsaufnahme	25

A. Schaltpläne

Die im vorliegenden Anhang abgebildeten Schaltpläne dienen zur leichteren Nachvollziehbarkeit der Aufbauten. Alle nachfolgenden Grafiken sind der Angabe (2022) entnommen.

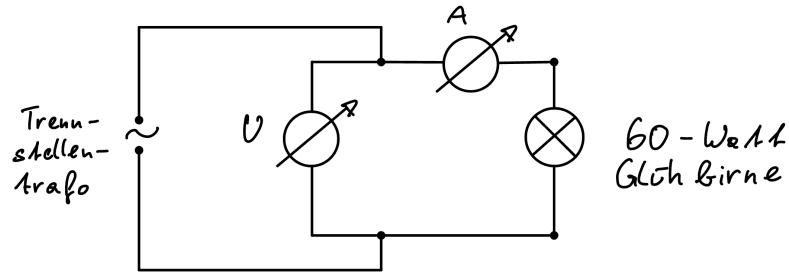


Abbildung A.1: Messung der Wirkleistung, Strom und Spannung einer Glühbirne mittels Spezialmessgerät

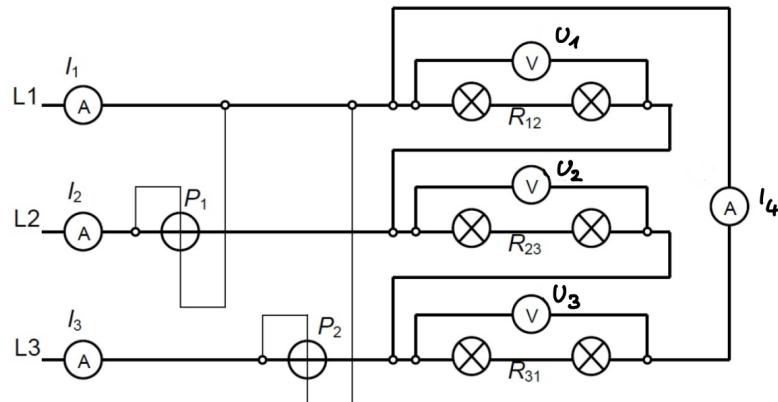


Abbildung A.2: Messung der Wirkleistung mittels Aronschaltung an einem symmetrischen Verbraucher in Dreieckschaltung

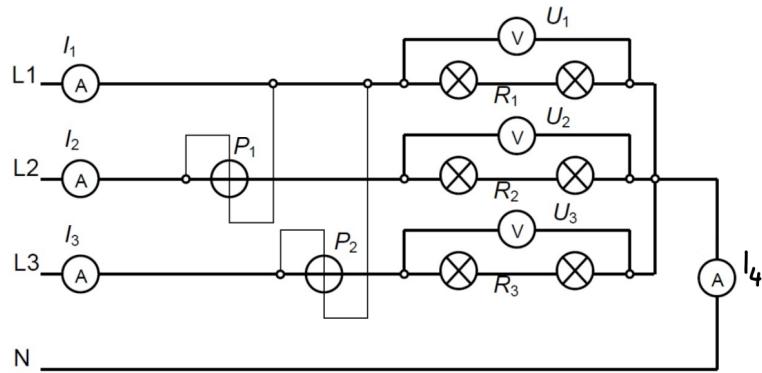


Abbildung A.3: Messung der Wirkleistung mittels Aronschaltung an einem symmetrischen Verbraucher in Sternschaltung

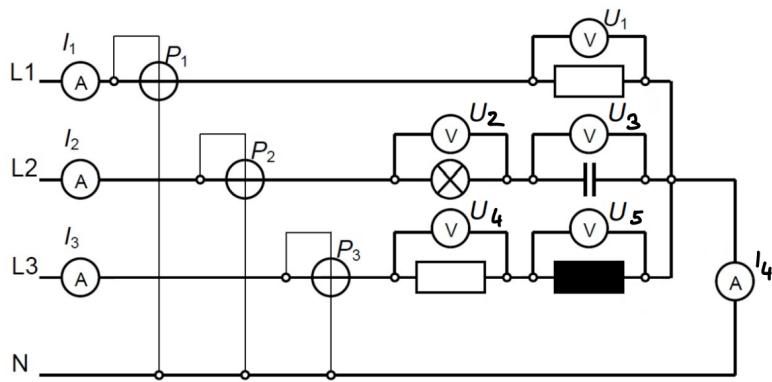


Abbildung A.4: Messung der Wirkleistung an einem allgemeinen Verbraucher in Sternschaltung

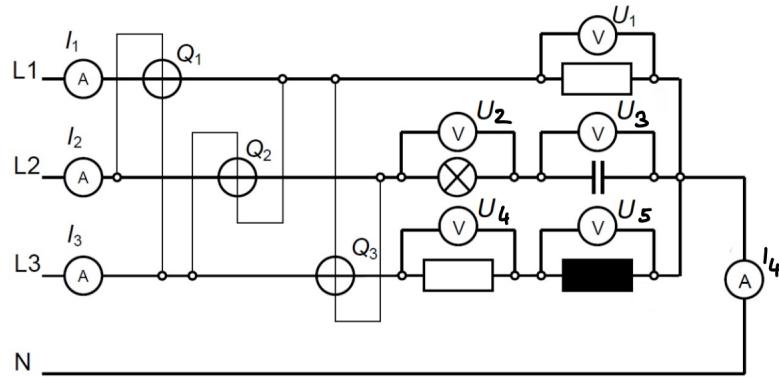


Abbildung A.5: Messung der Blindleistung für eine allgemeine Belastung des Drehstromnetzes. Die Schaltung der Leistungsmessgeräte in der dargestellten Form liefert positive Zeigerausschläge bei INDUKTIVER Blindleistung