



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE
EMDEN·LEER**



Labor

Grundlagen der Elektrotechnik

FB Technik, Abteilung Elektrotechnik und Informatik

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik B

Versuch B-2

Drehstromnetz

Name, Vorname: Alsaady, Yaman	Matrikel-Nr.: 7023554	Gruppe: A2a
Schmidt, Oliver	7023462	WS / SS

Vorbereitung:	Durchführung:	Rücksprachen / Nachbesserungen:
Testat:		

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
2 Vorbereitung	1
3 Messungen	8
3.1 Welche Netzform hat das 400-V-Drehstromnetz?	8
3.2 Fehlerstromschutzschalter zum Personenschutz	8
3.3 Symmetrische Drehstromlast ohne/mit Kompensation	9
3.4 Unsymmetrische Drehstromlast	14
4 Auswertung	19
4.1 Symmetrische Drehstromlast	19
4.2 Unsymmetrische Drehstromlast	20

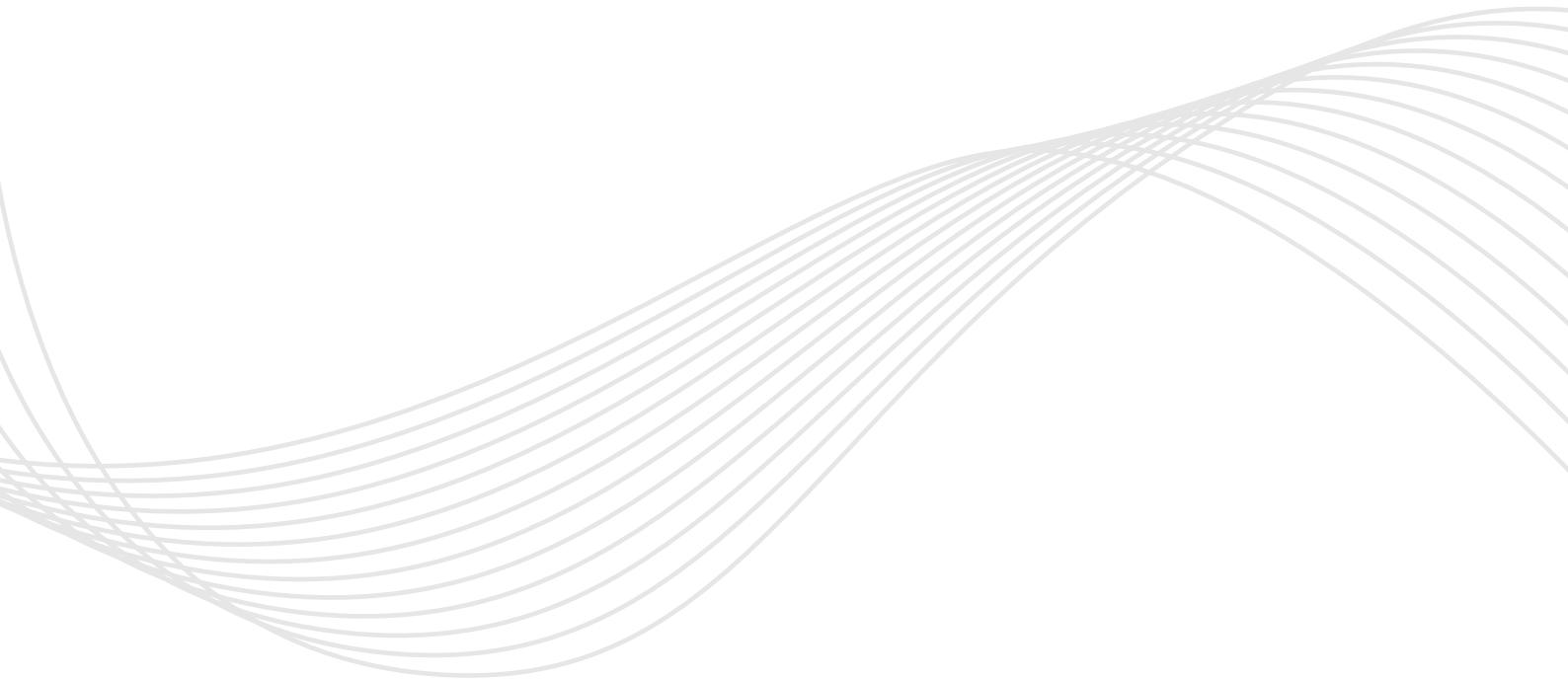
Abbildungsverzeichnis

1 Netzmodell am Versuchstisch	1
2 Skizze Messung, um Netzform zuermitteln	1
3 FI-Schutzschalter und FI-Tester	2
4 Fehlerstrommessung am FI-Schutzschalter mit FI-Tester und Multimetern	2
5 Aufgabe e) I_1 , I_2 , I_3 und I_N	5
6 Zeigerdiagramm der Spannungen U_{1K} , U_{2K} und U_{3K}	7
7 Last a mit und ohne angeschlossenen Neutralleiter (Gruppe XXa)	7
8 Oszillogramm von u_1 mit i_1 - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation	9
9 Skizze der Messschaltung - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation	10
10 Oszillogramm von i_N - Verbindung zwischen Neutralleiter und Sternpunkt	11
11 Oszillogramm von u_N und i_N - Symmetrischen Drehstromlast in Dreieckschaltung .	13
12 Skizze zur Kompensation - Symmetrischen Drehstromlast in Dreieckschaltung	13
13 Skizze zur Kompensation - Symmetrischen Drehstromlast in Sternschaltung	14
14 Oszillogramm von u_N und i_N - Symmetrischen Drehstromlast in Sternschaltung . .	14
15 Oszillogramm von u_1 mit u_{KN} - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter .	15
16 Oszillogramm von u_1 mit i_N - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter . .	15
17 Skizze der Spannungen - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter	16
18 Oszillogramm von u_1 mit u_{KN} - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter	17
19 Oszillogramm von u_1 mit i_N - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter . .	17
20 Skizze der Spannungen - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter	18
21 Skizze der Spannungen - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation	19
22 Skizze der Ströme - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation	20

Tabellenverzeichnis

1 Messwerte - Auslösestrom eines FI-Schutzschalters	8
2 Messwerte - Abschaltzeit eines FI-Schutzschalters	9

3	Messwerte - Komplexen Effektivwerte der Spannungen und Ströme	9
4	Messwerte - Komplexe Impedanzen	12
5	Komplexen Effektivwerte der Spannungen und Ströme - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter	15
6	Komplexen Effektivwerte der Spannungen und Ströme - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter	16
7	Vergleich die gemessenen Werten unter 3.4 (a) mit den errechneten Messwerten . . .	21
8	Vergleich die gemessenen Werten unter 3.4 (b) mit den errechneten Messwerten . .	21



2 Vorbereitung

Die Versuchsvorbereitung ist Bestandteil des Versuchs. Sie erhalten dafür ein gesondertes Testat.

Ohne testierte Vorbereitung können Sie den Versuch nicht durchführen.

- a) Für die Versuchsdurchführung verwenden Sie das im Labortisch eingebaute Netzmodell nach Abbildung 1. Skizzieren Sie eine Schaltung zur Bestimmung der Netzform (siehe Aufgabe 3.1)

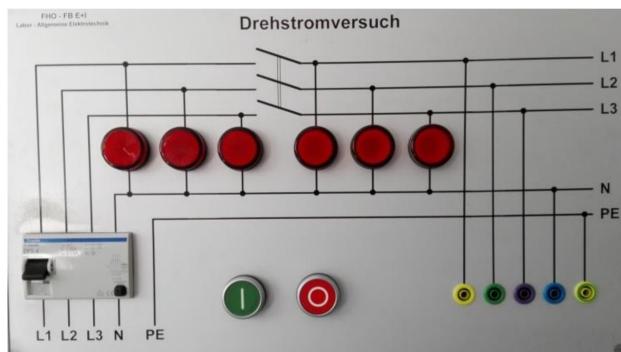


Abbildung 1: Netzmodell am Versuchstisch

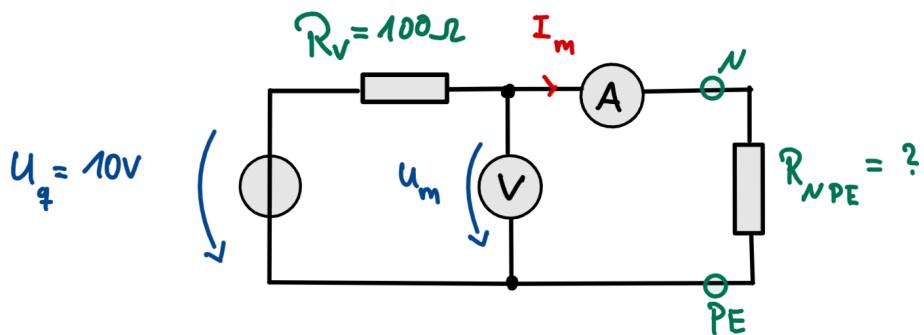


Abbildung 2: Skizze Messung, um Netzform zu ermitteln

Um die Netzform zu bestimmen, ist die Messung des Innenwiderstands zwischen den Leitern N (Neutralleiter) und PE (Schutzleiter) erforderlich. Im vorliegenden Fall gehen wir davon aus, dass es sich um ein TN-C-S-Netz handelt, bei dem der Neutralleiter und der Schutzleiter miteinander verbunden sind und somit einen gemeinsamen PEN-Leiter bilden. Daher sollten sowohl der Neutralleiter als auch der Schutzleiter einen messbaren Innenwiderstand aufweisen. Diesen Innenwiderstand bestimmen wir mithilfe einer Spannungsfehlerschaltung.

- b) Skizzieren Sie eine Schaltung zur Bestimmung des Fehlerstromes des FI-Schutzschalters mit Hilfe des FI-Testers aus Abbildung 3 und Multimetern zur Strom- bzw. Spannungsmessung.

Der FI-Tester wird an einen Außenleiter, den Neutralleiter und die Erde angeschlossen. Im Tester sind drei Widerstände in Reihe geschaltet, die über drei Anschlusspunkte verfügen.

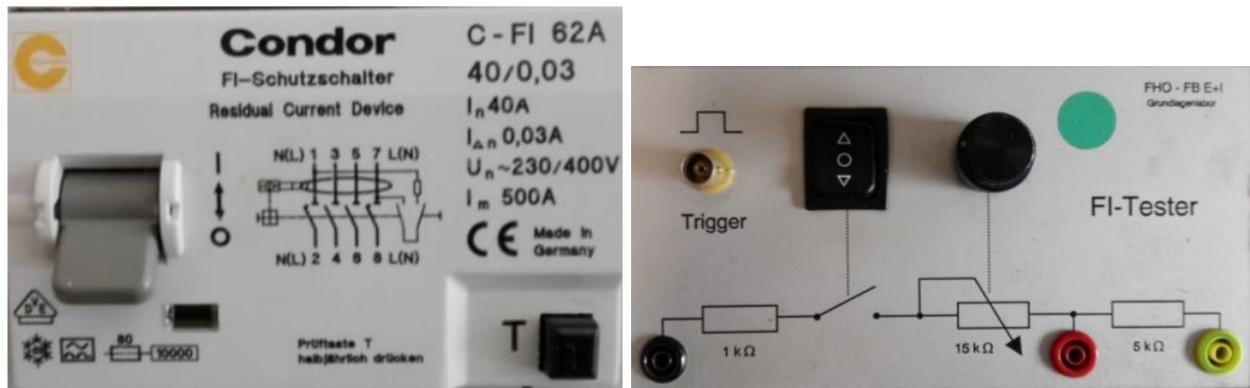


Abbildung 3: FI-Schutzschalter und FI-Tester

Der Lastwiderstand und der variable Widerstand werden zwischen dem Neutralleiter und L1 angeschlossen, während der Fehler-Widerstand parallel dazu geschaltet ist.

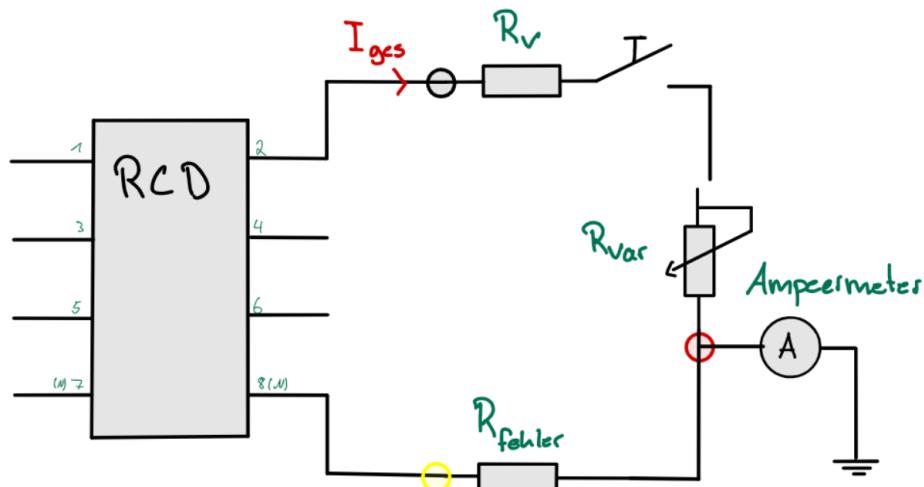


Abbildung 4: Fehlerstrommessung am FI-Schutzschalter mit FI-Tester und Multimetern

Das Hauptziel besteht darin, den FI-Schutzschalter auszulösen, sobald ein Differenzstrom von mehr als 30 mA auftritt. Aus diesem Grund muss der Wert des variablen Widerstands, der anfänglich bei 15k Ohm liegt, schrittweise verringert werden, bis der FI-Schalter auslöst.

- c) An einem Vierleiter-Drehstromnetz ist eine symmetrische ohmsch-induktive Last (Reihenschaltung von Induktivität und Widerstand) in Sternschaltung angeschlossen. Bestimmen Sie formelmäßig die nötige Kapazität in Parallelschaltung (Sternschaltung), um eine vollständige Kompensation ($\cos \varphi = 1$) zu erreichen.

$$\begin{aligned}
 \underline{Y} &= \frac{1}{(R + j\omega L)} + j\omega C \\
 \underline{Y} &= \frac{1 + j\omega C(R + j\omega L)}{R + j\omega L} \\
 \underline{Y} &= \frac{1 - \omega^2 LC + j\omega CR}{R + j\omega L} \\
 \underline{Y} &= \frac{(1 - \omega^2 LC + j\omega CR) \cdot (R - j\omega L)}{R^2 + (\omega L)^2} \\
 \underline{Y} &= \frac{R - \omega^2 RLC + \omega^2 RLC}{R^2 + (\omega L)^2} + j \frac{-\omega L + \omega^3 CL^2 + \omega CR^2}{R^2 + (\omega L)^2} \\
 \underline{Y}_{komp} &= \operatorname{Re}\{\underline{Y}\} = \frac{R - \omega^2 RLC + \omega^2 RLC}{R^2 + (\omega L)^2} \\
 \underline{Y}_{komp} &= \operatorname{Re}\{\underline{Y}\} = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \\
 \Rightarrow \operatorname{Im}\{\underline{Y}\} &= 0 \\
 -\omega L + \omega^3 CL^2 + \omega CR^2 &= 0 \\
 C \cdot (\omega^3 L^2 + \omega R^2) &= \omega L \\
 C &= \frac{\omega L}{\omega^3 L^2 + \omega R^2} \\
 C_Y &= \frac{L}{\omega^2 L^2 + R^2}
 \end{aligned}$$

- d) Bestimmen Sie formelmäßig die nötige Kapazität, wenn die Kondensatoren in Dreieck verschaltet sind.

$$\begin{aligned}
 C_Y &= \frac{L}{\omega^2 L^2 + R^2} \\
 C_\Delta &= \frac{1}{3} \cdot C_Y \\
 C_\Delta &= \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{\omega^2 L^2 + R^2}
 \end{aligned}$$

- e) An einem Vierleiter-Drehstromnetz mit der konstanten Außenleiterspannung $U = 380 \text{ V}$ sind nach Abbildung 7 unsymmetrische Lasten angeschlossen. Bestimmen Sie rechnerisch und grafisch den Strom im Nullleiter, legen Sie dazu \underline{U}_1 in die reelle Achse, $f = 50 \text{ Hz}$!

Berechnung der Strangspannung:

$$U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$U_{Str} = \frac{380 \text{ V}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{Str} = 219,39 \text{ V}$$

$$U_{1N} = 220 \text{ V} e^{j0^\circ} \quad U_{2N} = 220 \text{ V} e^{-j120^\circ} \quad U_{3N} = 220 \text{ V} e^{j120^\circ}$$

Die einzelnen komplexen Widerstände werden berechnet, um die Strangstromstärken zu ermitteln.

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 1,47 \text{ k}\Omega + j2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1,5 \text{ H} = 1,54 \text{ k}\Omega e^{j17,77^\circ}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega e^{j0^\circ}$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} = 2,18 \text{ k}\Omega + \frac{1}{j2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 2 \mu\text{F}} = 2,67 \text{ k}\Omega e^{-j36,13^\circ}$$

Die zuvor ermittelten Werte werden jetzt genutzt, um die Strangstrome zu berechnen.

$$I_1 = \frac{U_{1N}}{\underline{Z}_1} = \frac{219,4 \text{ V} e^{j0^\circ}}{1,54 \text{ k}\Omega e^{j17,77^\circ}} = 0,14 \text{ A} e^{-j17,77^\circ}$$

$$I_2 = \frac{U_{2N}}{\underline{Z}_2} = \frac{219,4 \text{ V} e^{-j120^\circ}}{4 \text{ k}\Omega e^{j0^\circ}} = 0,109 \text{ A} e^{-j120^\circ}$$

$$I_3 = \frac{U_{3N}}{\underline{Z}_3} = \frac{219,4 \text{ V} e^{j120^\circ}}{2,67 \text{ k}\Omega e^{-j36,13^\circ}} = 0,081 \text{ A} e^{j156,13^\circ}$$

$$\sum I = I_1 + I_2 + I_3 + I_N = 0$$

$$\Rightarrow I_N = -(I_1 + I_2 + I_3)$$

$$I_N = -(0,14 \text{ A} e^{-j17,77^\circ} + 0,109 \text{ A} e^{-j120^\circ} + 0,081 \text{ A} e^{j156,13^\circ})$$

$$I_N = -(0,105 \text{ A} e^{-87,42^\circ}) = 0,105 \text{ A} e^{92,58^\circ}$$

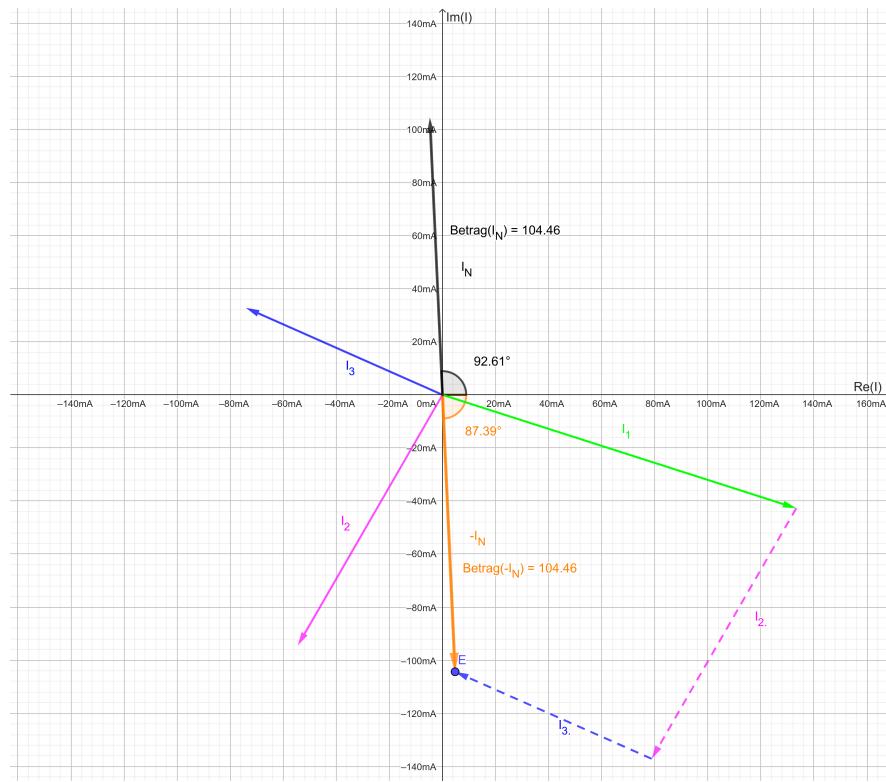


Abbildung 5: Aufgabe e) I_1 , I_2 , I_3 und I_N

- f) Bestimmen Sie nun für dieselbe Last alle Ströme und Spannungen ohne angeschlossenen Neutralleiter. Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm der Spannungen \underline{U}_{1K} , \underline{U}_{2K} und \underline{U}_{3K} .

Leitfähigkeit:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1 &= \frac{1}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{1}{1,47 \text{ k}\Omega + j2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1,5 \text{ H}} = 0,617 \text{ mS} - j0,198 \text{ mS} \\ \underline{Y}_2 &= \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2 \text{ k}\Omega} = 0,5 \text{ mS} \\ \underline{Y}_3 &= \frac{1}{R_3 - j\frac{1}{j\omega C_3}} = \frac{1}{2,18 \text{ k}\Omega - j\frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 2 \mu F}} = 0,299 \text{ mS} + j0,218 \text{ mS} \\ \underline{Y} &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 = 1,416 \text{ mS} + j0,02 \text{ mS} = 1,416 \text{ mS} \cdot e^{j0,81^\circ} \end{aligned}$$

Sternpunktspannung:

$$\underline{U}_{KN} = \frac{\underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1N} + \underline{Y}_2 \cdot \underline{U}_{2N} + \underline{Y}_3 \cdot \underline{U}_{3N}}{\underline{Y}}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KN} &= \left(0,648 \text{ mS} \cdot e^{-j17,79^\circ} \cdot 219,39 \text{ V} e^{j0} + 0,5 \text{ mS} \cdot e^{j0} \cdot 219,39 \text{ V} e^{-j120^\circ} \right. \\ &\quad \left. + 0,37 \text{ mS} \cdot e^{j36,1^\circ} \cdot 219,39 \text{ V} e^{j120^\circ} \right) \cdot \frac{1}{1,416 \text{ mS} \cdot e^{j0,81^\circ}} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{KN} = 3,45 \text{ V} - j74,71 \text{ V} = 74,8 \text{ V} e^{-j87,36^\circ}$$

Spannungsmaschen:

$$\underline{U}_{1K} = \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{KN} = 219,39 \text{ V} e^{j0^\circ} - 74,8 \text{ V} e^{-j87,36^\circ}$$

$$\underline{U}_{1K} = 229,1 \text{ V} e^{j19^\circ}$$

$$\underline{U}_{2K} = \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{KN} = 219,39 \text{ V} e^{-j120^\circ} - 74,8 \text{ V} e^{-j87,36^\circ}$$

$$\underline{U}_{2K} = 272,162,1 \text{ V} e^{-j134,4^\circ}$$

$$\underline{U}_{3K} = \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{KN} = 219,39 \text{ V} e^{j120^\circ} - 74,8 \text{ V} e^{-j87,36^\circ}$$

$$\underline{U}_{3K} = 288,5 \text{ V} e^{j133,2^\circ}$$

Ströme:

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1K} = 0,648 \text{ mS} \cdot e^{-j17,79^\circ} \cdot 229,1 \text{ V} e^{j19^\circ}$$

$$\underline{I}_1 = 148,4 \text{ mA} \cdot e^{j1,3^\circ}$$

$$\underline{I}_2 = \underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1K} = 0,5 \text{ mS} \cdot e^{j0^\circ} \cdot 272,162,1 \text{ V} e^{-j134,4^\circ}$$

$$\underline{I}_2 = 81,1 \text{ mA} \cdot e^{-j134,5^\circ}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{Y}_1 \cdot \underline{U}_{1K} = 0,37 \text{ mS} \cdot e^{j36,1^\circ} \cdot 288,5 \text{ V} e^{j133,2^\circ}$$

$$\underline{I}_3 = 106,74 \text{ mA} \cdot e^{j149,3^\circ}$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \approx 0$$

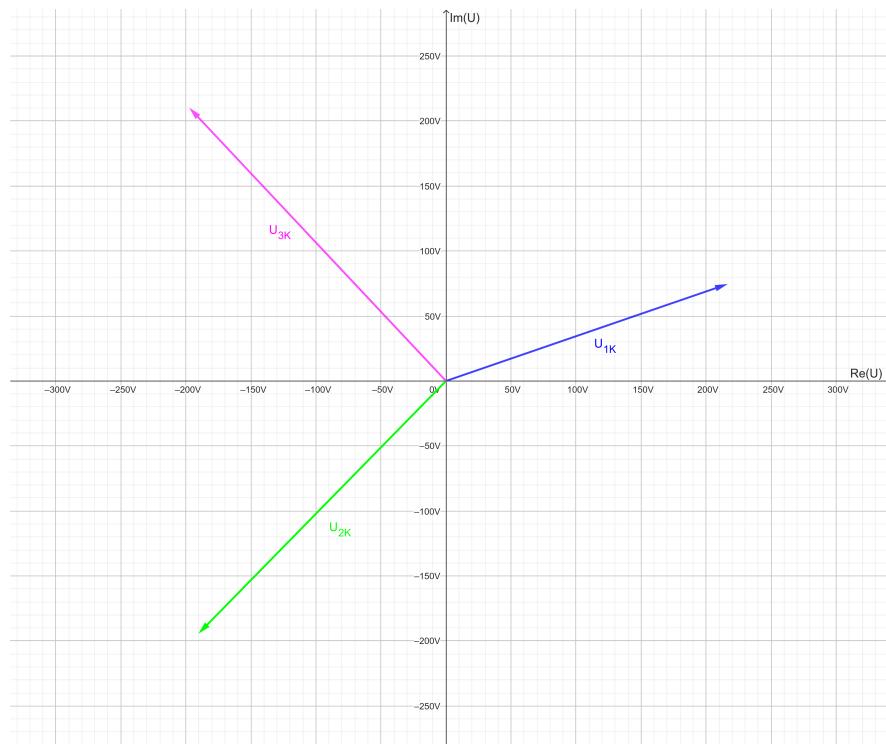


Abbildung 6: Zeigerdiagramm der Spannungen \underline{U}_{1K} , \underline{U}_{2K} und \underline{U}_{3K}

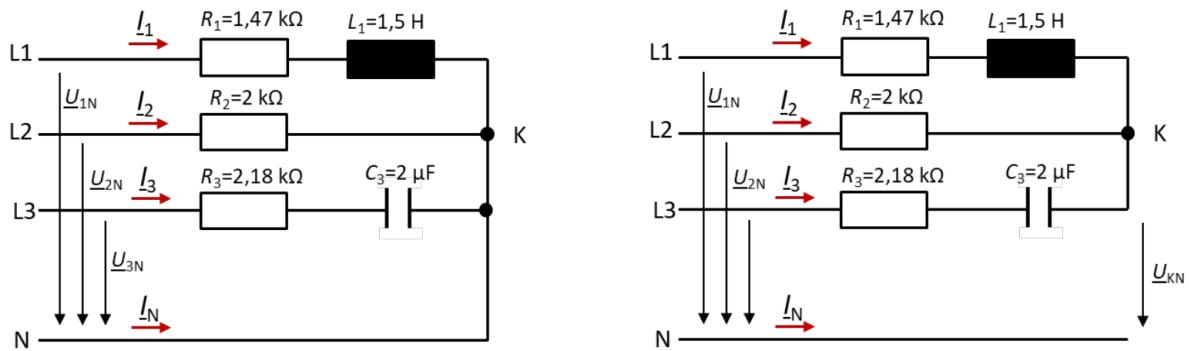


Abbildung 7: Last a mit und ohne angeschlossenen Neutralleiter (Gruppe XXa)

3 Messungen

3.1 Welche Netzform hat das 400-V-Drehstromnetz?

- Bestimmen Sie durch eine Messung mit einem „Ohmmeter“ und mit einer Strom-Spannungsmessung ($I < 100 \text{ mA}$, $R = 100 \Omega$) die Netzform des im Labortisches eingebauten 400V-Drehstromnetzes. Erläutern Sie Ihre Beobachtungen!

Mit einem Ohmmeter wurde ein Innenwiderstand von 0Ω gemessen. Allerdings reicht die Messspannung des Ohmmeters nicht aus, um den Innenwiderstand R_{N-PE} zwischen N und PE zu erfassen. Dies kann durch die Verwendung einer Spannungsfehlerschaltung erreicht werden, bei der die Spannung mithilfe einer externen Quelle entsprechend angepasst werden kann.

$$R_{N-PE} = \frac{U_M}{I_M}$$
$$R_{N-PE} = \frac{50 \text{ mV}}{100 \text{ mA}}$$
$$R_{N-PE} = 0,5\Omega$$

Wenn ein Innenwiderstand gemessen wurde, lässt dies darauf schließen, dass es sich um ein **TN-C-S-Netz** handelt. In diesem Netztyp sind der Neutralleiter und der Schutzleiter (PE) miteinander verbunden, was den Innenwiderstand erklärt.

3.2 Fehlerstromschutzschalter zum Personenschutz

- Ermitteln Sie den tatsächlichen Auslösestrom des FI-Schutzschalters durch Mittelwertbildung aus drei Messungen, benutzen Sie dazu Multimeter und den FI-Tester aus Bild 9. Nutzen Sie dazu die Min/Max-Funktion des Multimeters. Stellen Sie das Potentiometer auf einen großen Wert ein und verkleinern Sie dann langsam den Widerstandswert. Der Auslösestrom kann dann am Multimeter abgelesen werden.

Tabelle 1: Messwerte - Auslösestrom eines FI-Schutzschalters

Anzahl	I in mA
1	20,75
2	20,60
3	20,00
Mittelwert	20,39 mA

- b) Bestimmen Sie die Abschaltzeit bei Nennfehlerstrom des FI-Schutzschalters durch Mittelwertbildung aus drei Messungen, benutzen Sie dazu Multimeter, FI-Tester, Oszilloskop und Trennteiler. Ein Oszillogramm ist für die Ausarbeitung aufzubereiten!

Tabelle 2: Messwerte - Abschaltzeit eines FI-Schutzschalters

Anzahl	t in ms
1	27,77
2	28,99
3	25,89
Mittelwert	27,55 ms

3.3 Symmetrische Drehstromlast ohne/mit Kompensation

- a) Bestimmen Sie die komplexen Effektivwerte der Spannungen \underline{U}_{1N} , \underline{U}_{2N} , \underline{U}_{3N} und \underline{U}_{NK} und der Ströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 und \underline{I}_K bei angeschlossener symmetrischer Drehstromlast nach Bild 12. Skizzieren Sie die Messschaltung und verwenden Sie zur Messung Oszilloskop, Trennteiler und Stromwandler. Das Oszillogramm von u_1 mit i_1 ist mit in die Ausarbeitung zu übernehmen und aufzuarbeiten.

Tabelle 3: Messwerte - Komplexe Effektivwerte der Spannungen und Ströme

Art	U_{eff} in V	Phase φ in °	Art	I_{eff} in mA	Phase in °
U_{1N}	232	0	I_1	960	-70
U_{2N}	234	240	I_2	900	170
U_{3N}	233	120	I_3	920	50
U_{KN}	0	0	I_N	0	0

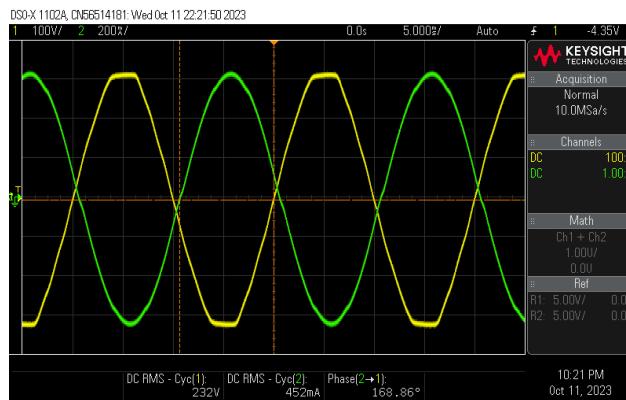


Abbildung 8: Oszillogramm von u_1 mit i_1 - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation

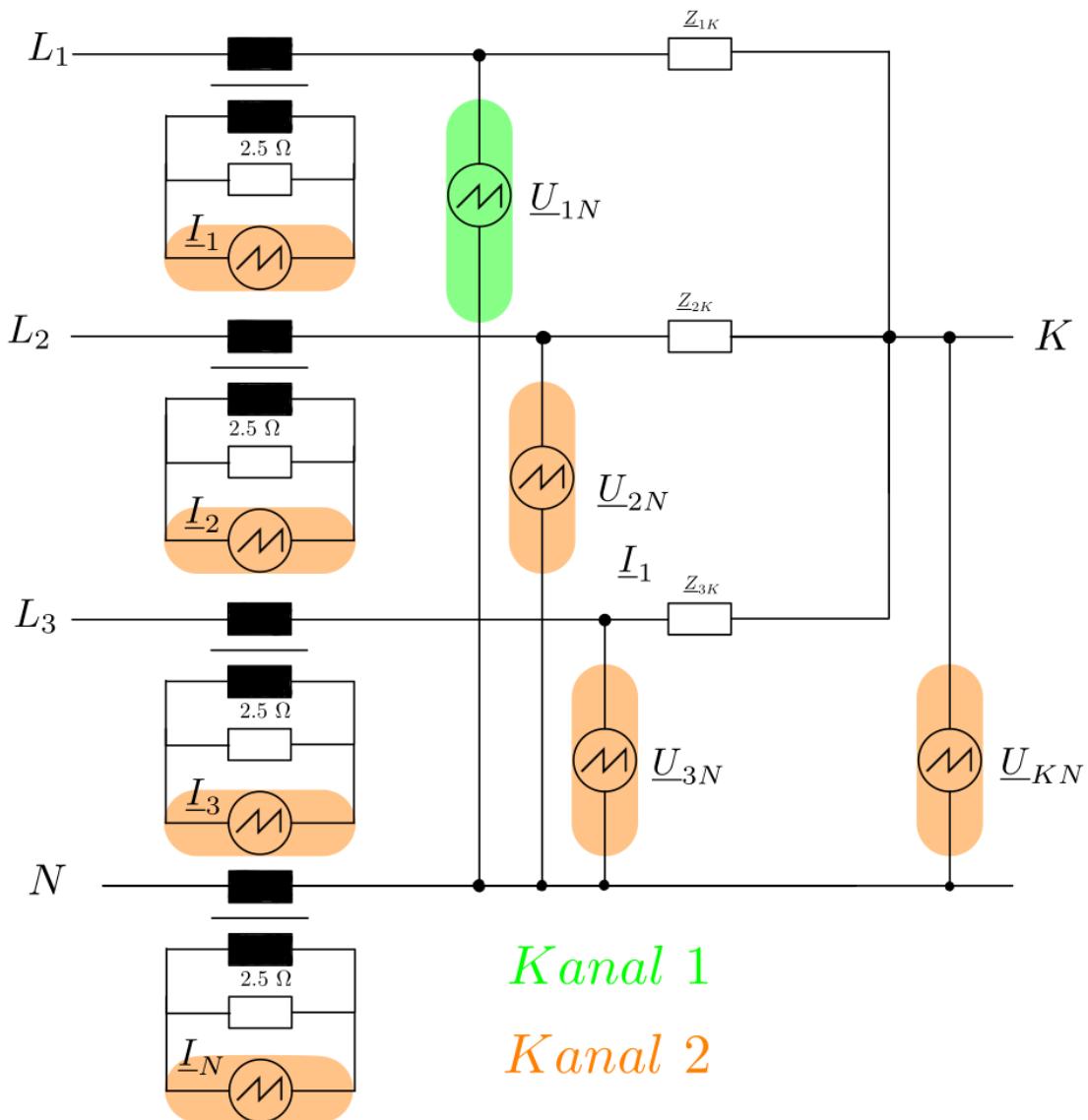


Abbildung 9: Skizze der Messschaltung - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation

- b) Verbinden Sie nun den Neutralleiter mit dem Knoten K der Sternschaltung und messen Sie den Strom I_N . Nehmen Sie ein Oszillogramm auf und beschreiben Sie ihre Beobachtungen. Entfernen Sie anschließend wieder die Verbindung zwischen Neutralleiter und Sternpunkt K.

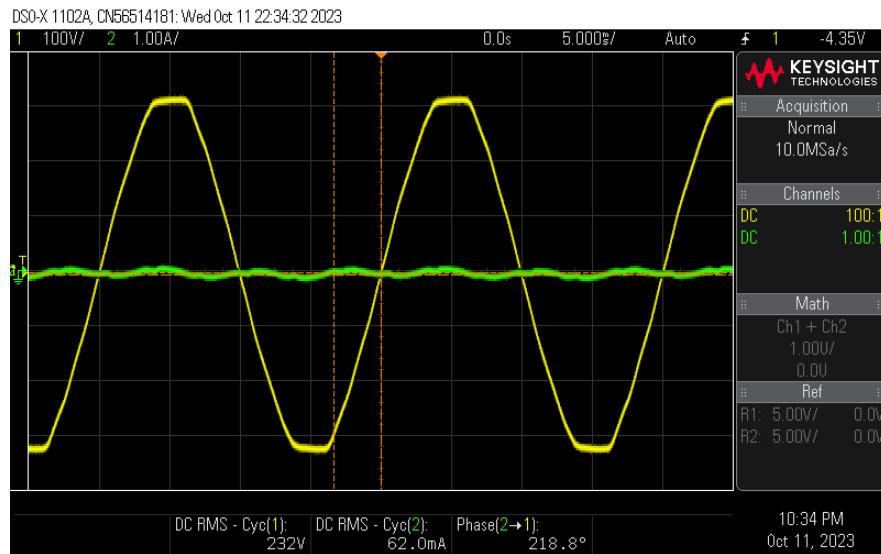


Abbildung 10: Oszillogramm von i_N - Verbindung zwischen Neutralleiter und Sternpunkt

$$\begin{aligned}
 I_N &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \\
 \underline{I}_N &= 960 \text{ mA } e^{-j70^\circ} + 900 \text{ mA } e^{170^\circ} + 920 \text{ mA } e^{50^\circ} \\
 \underline{I}_N &= 52 \text{ mA } e^{-j50^\circ} \\
 \Rightarrow \underline{I}_N &\approx 0 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Bei dieser Messung beträgt der Stromfluss im Knotenpunkt zum Neutralleiter ca. 52mA. Dieser Strom ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Alle drei Phasen weisen mehrere komplexe Widerstände auf. Da in allen Phasen derselbe Strom fließt und zwischen ihnen eine Phasenverschiebung von 120° besteht, heben sich die Ströme gegenseitig auf, wodurch kein Strom durch den Sternpunkt-Leiter fließt.

- c) Bestimmen Sie aus den Messungen unter (a) die komplexe Impedanz \underline{Z}_K in kartesischen Koordinaten durch Mittelung der Werte \underline{Z}_{1K} , \underline{Z}_{2K} und \underline{Z}_{3K} . Ermitteln Sie anschließend die nötige Kompensationskapazität in Stern- und Dreieckschaltung. Nehmen Sie dazu an, dass die symmetrische Last aus entsprechenden Bauteilen in Reihenschaltung besteht.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_K &= \frac{\underline{U}_{str}}{\underline{I}_{str}} \\ \underline{Z}_K &= \frac{U \cdot e^{j\varphi_U}}{I \cdot e^{j\varphi_I}} \\ \underline{Z}_K &= \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi_U} \cdot e^{-j\varphi_I} \\ \Rightarrow \underline{Z}_K &= \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi_U - \varphi_I}\end{aligned}$$

$$|Z| = \frac{U}{I} \quad \varphi_Z = \varphi_U - \varphi_I \quad Re\{Z\} = |Z| \cdot \cos(\varphi_Z) \quad Im\{Z\} = |Z| \cdot \sin(\varphi_Z)$$

Um Impedanzen zu bestimmen, wird die Strangspannung durch den Strangstrom geteilt. Die Phase der Strangspannung wird von der Phase des Strangstroms subtrahiert, wodurch die Phasenkomponente der Impedanz ermittelt wird. Impedanzen werden in kartesischer Form ausgedrückt. Der reellen Anteil entspricht den ohmschen Widerstand und der imaginär Anteil entspricht den induktiven bzw. kapazitiven Widerstand.

Tabelle 4: Messwerte - Komplexe Impedanzen

Art	Z in Ω	Phase φ in $^\circ$	$Re\{z\}$	$Im\{z\}$	L in mH	C in μH
\underline{Z}_{1K}	241	70	153	187	600	10, 19
\underline{Z}_{2K}	260	70	201	845	640	9, 47
\underline{Z}_{3K}	253	70	160	196	620	9, 73
\underline{Z}_{KN}	0	0	0	0	0	0

- d) Beobachten Sie die Spannungen \underline{u}_{1N} , \underline{u}_{2N} , \underline{u}_{3N} und \underline{u}_{NK} die Ströme \underline{i}_1 , \underline{i}_2 , \underline{i}_3 und \underline{i}_N bei angeschlossener symmetrischer Drehstromlast und drei Kondensatoren $C = 4\mu F$ in Dreieckschaltung. Skizzieren Sie die Schaltung und verwenden Sie zur Messung Oszilloskop, Trennteiler und Stromwandler. Halten Sie in einem Satz Ihre Beobachtungen mit einer entsprechenden Begründung fest (ein Oszillogramm in die Ausarbeitung übernehmen und aufarbeiten; \underline{u}_1 mit \underline{i}_1).

Durch die Implementierung der Kompensation bei der symmetrischen Drehstromlast konnten wir beobachten, dass die zuvor erfolgte Phasenverschiebung zwischen der Spannung (U) und dem Strom (I) vollständig aufgehoben wurde. Dies ist auf Abbildung 11 zu erkennen, da der Phasenverlauf identisch ist, obwohl der Strom beträchtliche Ober- und Unterschwingungen aufweist. Diese Schwankungen sind eine natürliche Konsequenz der Herstellung von Bauteilen für die symmetrische Drehstromlast, da eine exakte Fertigung nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist.

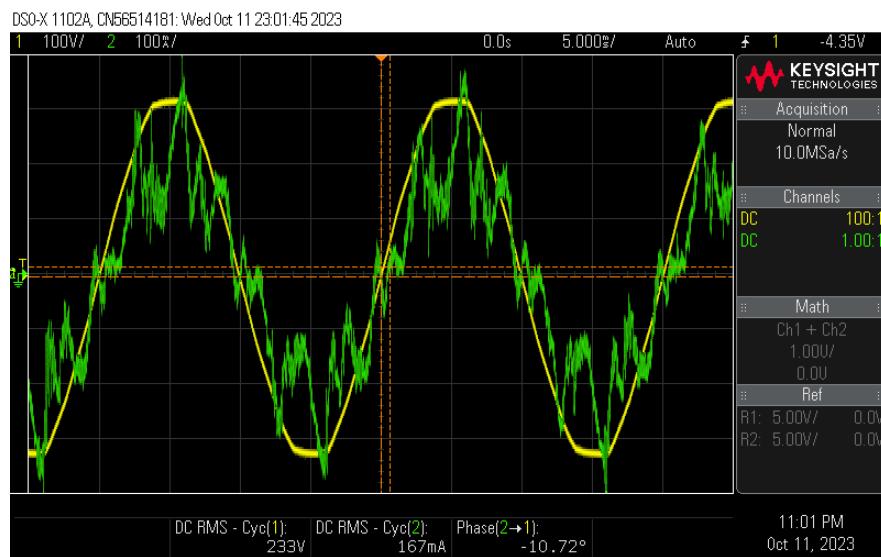


Abbildung 11: Oszillogramm von u_N und i_N - Symmetrischen Drehstromlast in Dreieckschaltung

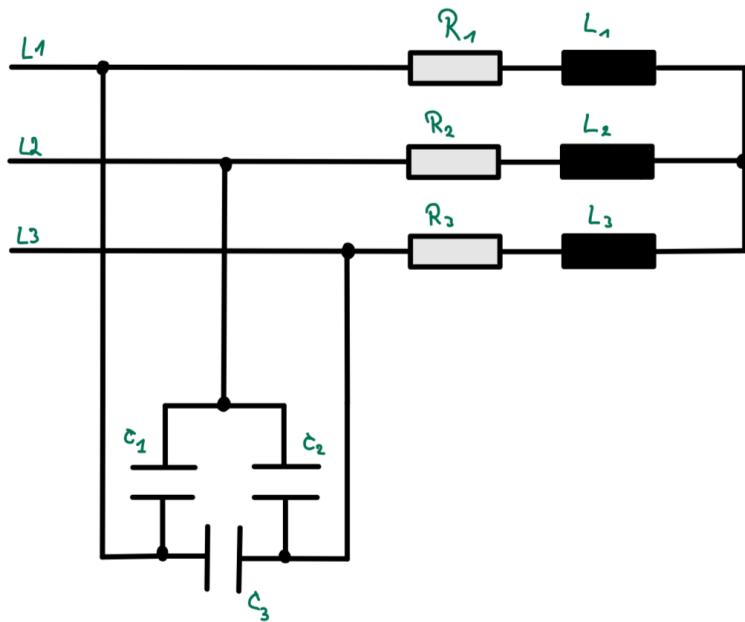


Abbildung 12: Skizze zur Kompensation - Symmetrischen Drehstromlast in Dreieckschaltung

- e) Schalten Sie nun die drei Kondensatoren in Stern und schließen Sie diese jetzt parallel zur Last an. Überlegen Sie, welche Auswirkungen das auf den Phasenwinkel hat und begründen Sie Ihre Beobachtungen.

In Bezug auf die Sternkompensation konnten wir keine Kompensation mit den $4\mu F$ Kondensatoren feststellen, wie in Abbildung 14 dargestellt ist. Dies liegt daran, dass zwischen der Stern- und Dreieckkompensation ein Faktor von 3 besteht. Um eine Kompensation der Phasenverschiebung zu erreichen, müsste daher ein $12\mu F$ Kondensator verwendet werden.

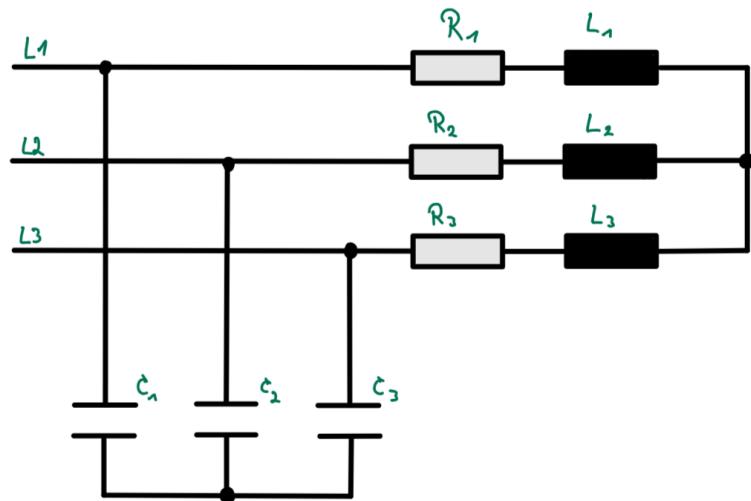


Abbildung 13: Skizze zur Kompensation - Symmetrischen Drehstromlast in Sternschaltung

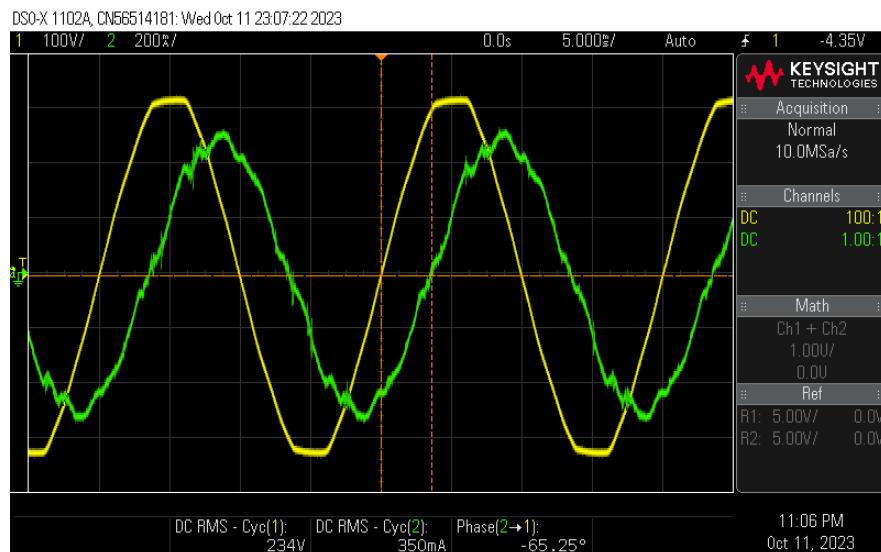


Abbildung 14: Oszillogramm von u_N und i_N - Symmetrischen Drehstromlast in Sternschaltung

3.4 Unsymmetrische Drehstromlast

- a) Bestimmen Sie die komplexen Effektivwerte der Spannungen U_{1N} , U_{2N} , U_{3N} und U_{NK} und der Ströme I_1 , I_2 , I_3 und I_K bei der unsymmetrischen Drehstromlast nach Bild 13 mit angegeschlossenem Neutralleiter. (Gruppe: A2a).
- Skizzieren Sie die Schaltung und verwenden Sie zur Messung Oszilloskop, Trennteiler und Stromwandler. Zwei Oszilloskopbilder sind mit in die Ausarbeitung zu übernehmen und aufzuarbeiten. (u_1 mit u_{KN} , u_1 mit i_N).

Tabelle 5: Komplexen Effektivwerte der Spannungen und Ströme - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter

Art	U_{eff} in V	Phase φ in °	Art	I_{eff} in mA	Phase in °
U_{1N}	234	0	I_1	140	-22
U_{2N}	233	240	I_2	116	240
U_{3N}	233	120	I_3	84	156
U_{KN}	0	0	I_N	114	90

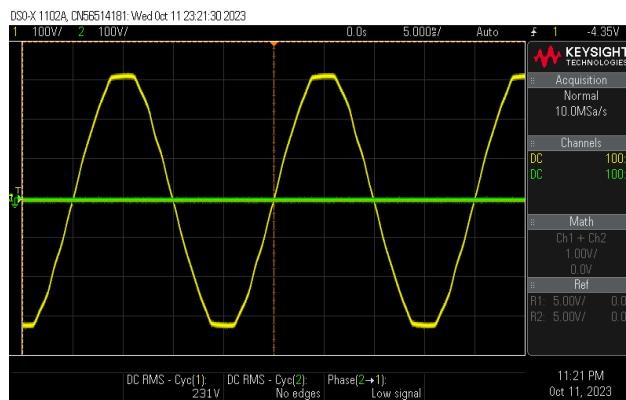


Abbildung 15: Oszillogramm von u_1 mit u_{KN} - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter

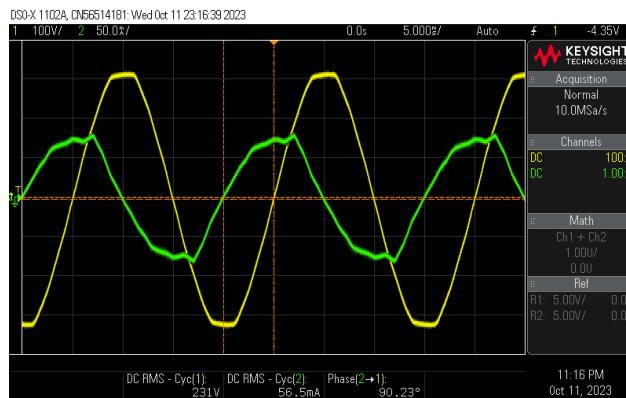


Abbildung 16: Oszillogramm von u_1 mit i_N - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter

- b) Bestimmen Sie die komplexen Effektivwerte der Spannungen U_{1N} , U_{2N} , U_{3N} und U_{NK} und der Ströme I_1 , I_2 , I_3 und I_K bei der unsymmetrischen Drehstromlast nach Bild 13 ohne angeschlossenem Neutralleiter. (Gruppe: A2a)
- Skizzieren Sie die Schaltung und verwenden Sie zur Messung Oszilloskop, Trennteiler und Stromwandler. Zwei Oszillogramme sind mit in die Ausarbeitung zu übernehmen und aufzuarbeiten. (u_1 mit u_{KN} , u_1 mit i_N).

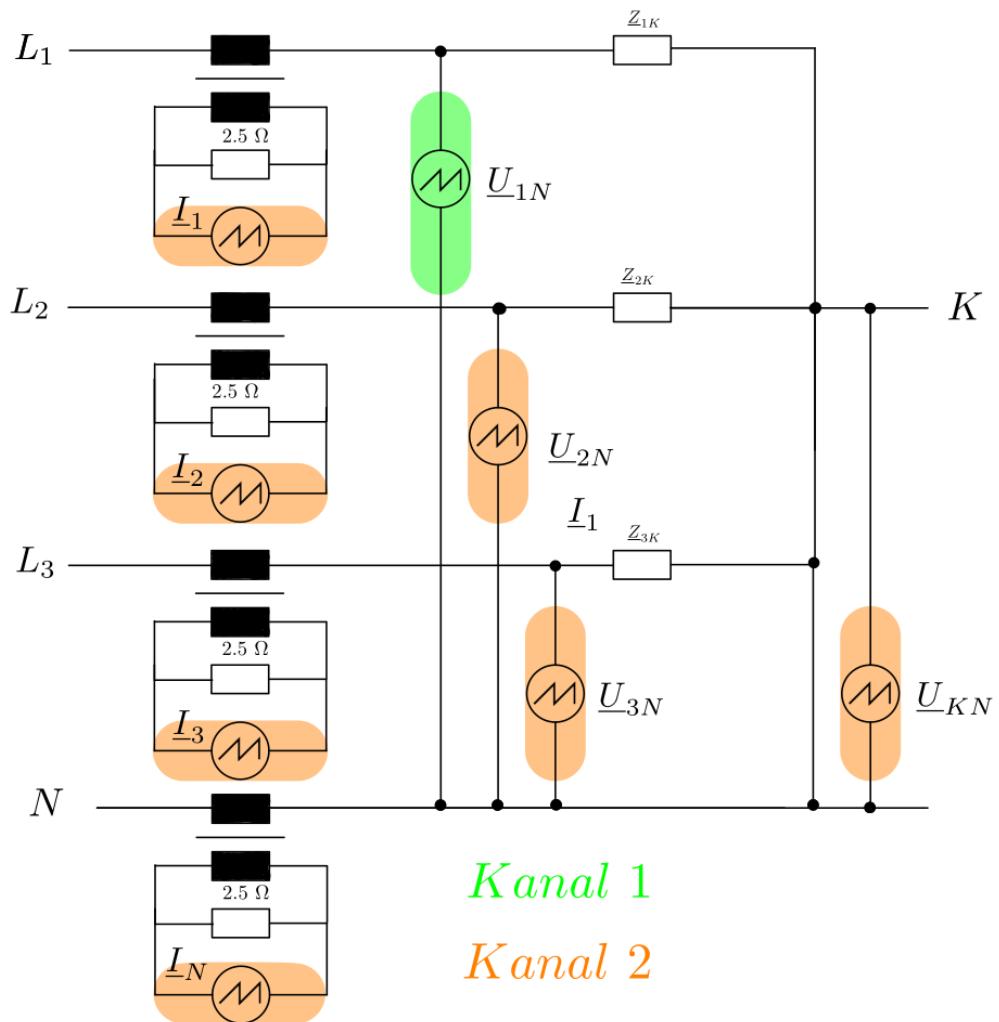


Abbildung 17: Skizze der Spannungen - Unsymmetrische Drehstromlast mit Neutralleiter

Tabelle 6: Komplexen Effektivwerte der Spannungen und Ströme - Unsymmetrische Drehstromlast
Ohne Neutralleiter

Art	U_{eff} in V	Phase φ in °	Art	I_{eff} in mA	Phase in °
U_{1N}	234	0	I_1	150	3
U_{2N}	231	239	I_2	81	228
U_{3N}	233	119	I_3	112	148
U_{KN}	82	268	I_N	0	0

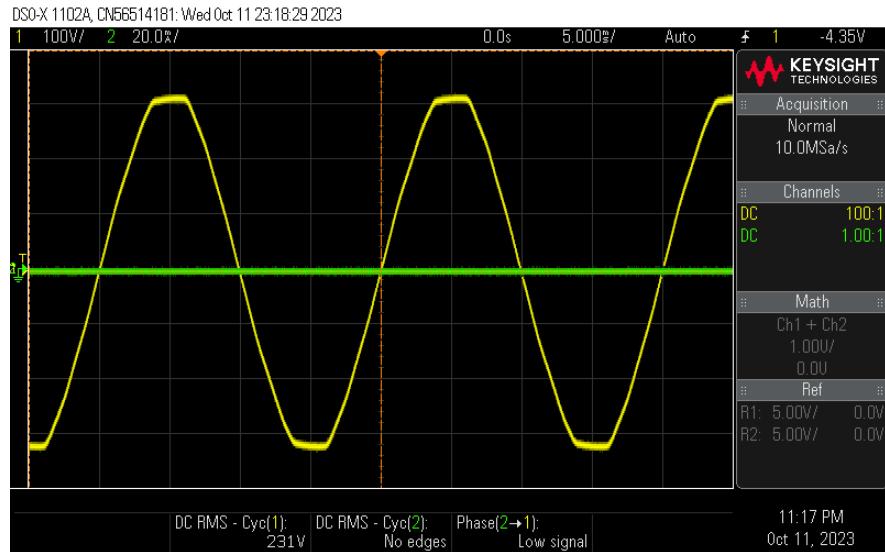


Abbildung 18: Oszillogramm von u_1 mit u_{KN} - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter

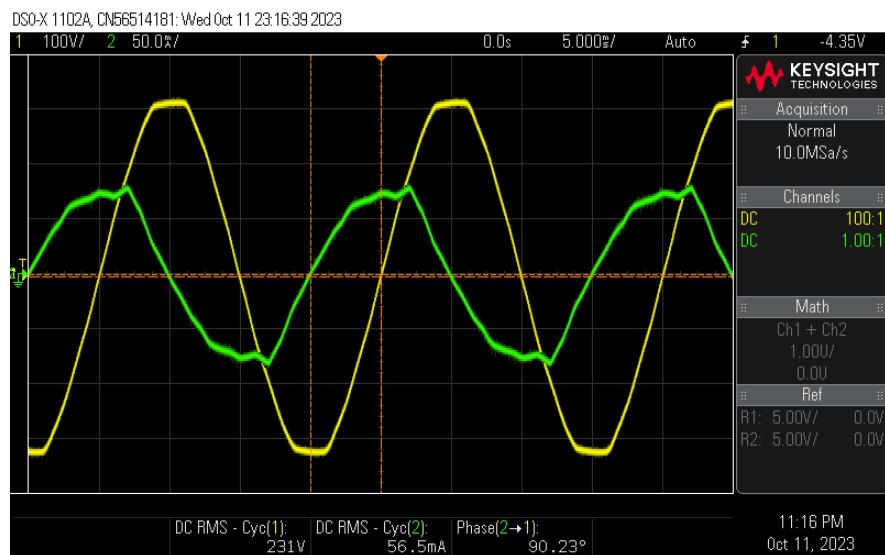


Abbildung 19: Oszillogramm von u_1 mit i_N - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter

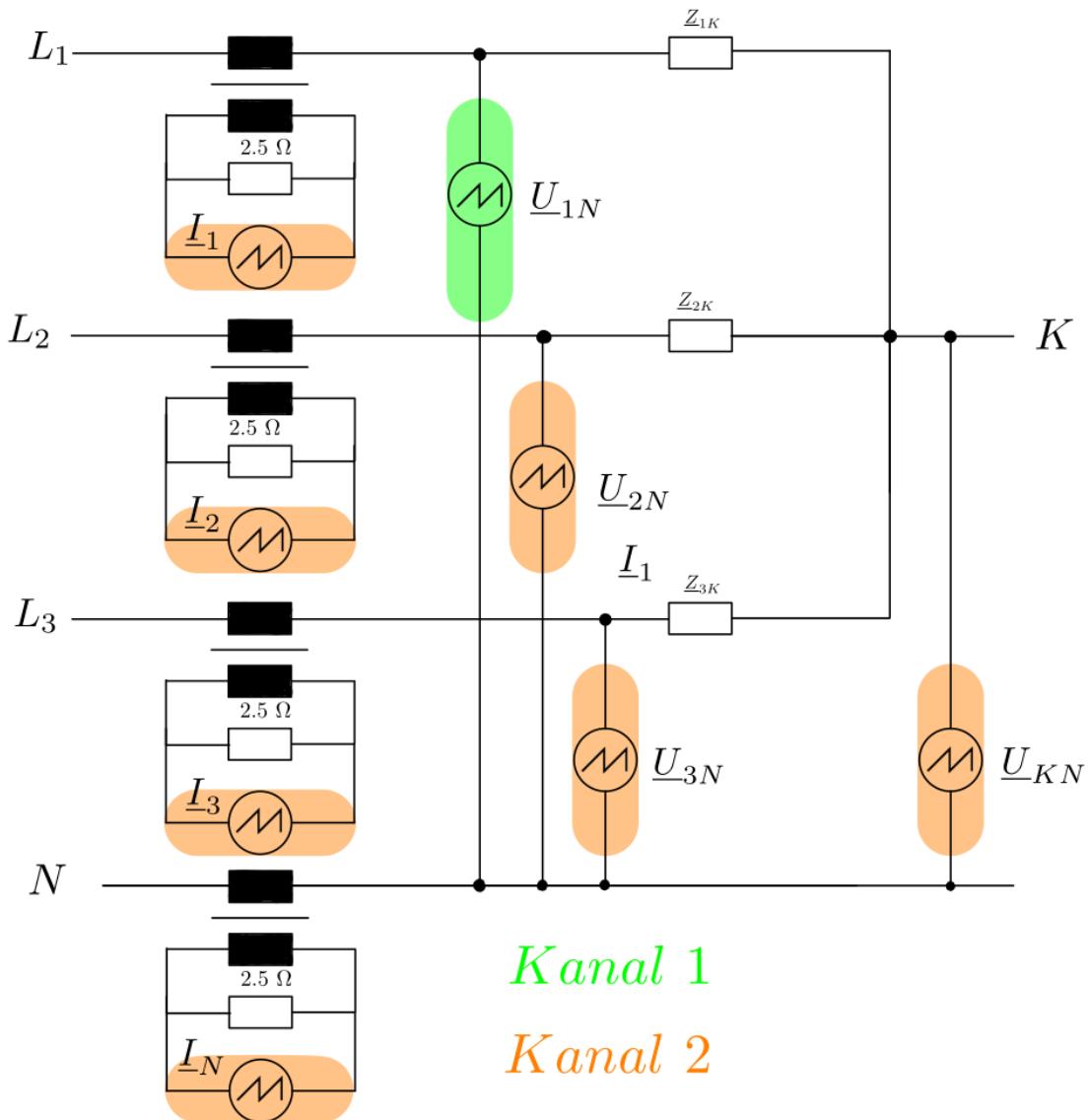


Abbildung 20: Skizze der Spannungen - Unsymmetrische Drehstromlast Ohne Neutralleiter

4 Auswertung

4.1 Symmetrische Drehstromlast

- a) Berechnen Sie unter Verwendung von Gleichung (7) für die Belastungen nach 3.3 (a) die komplexe Scheinleistung \underline{S} aus den komplexen Größen \underline{U}_{1N} , \underline{U}_{2N} , \underline{U}_{3N} sowie \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 , und ermitteln Sie hieraus die von der Last aufgenommene Wirk- und die Blindleistung.

$$\underline{S} = \underline{U}_{1N} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{2N} \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_{3N} \cdot \underline{I}_3^*$$

$$\underline{S} = 232V e^{j0^\circ} \cdot 0,96A e^{-(j70^\circ)} + 234V e^{j240^\circ} \cdot 0,9A e^{-(j170^\circ)} + 233V e^{j120^\circ} \cdot 0,2A e^{-(j50^\circ)}$$

$$\underline{S} = 650,44VA \cdot e^{j70^\circ} = 223.82W + j614.93Var$$

$$P = \text{Re}\{\underline{S}\} = 223.82W$$

$$Q = \text{Im}\{\underline{S}\} = 614.93Var$$

- b) Bestimmen Sie für 3.3 (a) den Wirkleistungsfaktor $\cos \varphi$ der Last. Verwenden Sie hierfür die Ergebnisse aus (a).

$$\begin{aligned} \underline{S} &= |S| \cdot e^{j\varphi} = 650,44VA \cdot e^{j70^\circ} \\ \Rightarrow \varphi &= 70^\circ \end{aligned}$$

- c) Zeichnen Sie für die Belastungen nach 3.3 (a) das Zeigerdiagramm der Spannungen \underline{U}_{1N} , \underline{U}_{2N} , \underline{U}_{3N} und \underline{U}_K sowie das Zeigerdiagramm der Ströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 und \underline{I}_N .

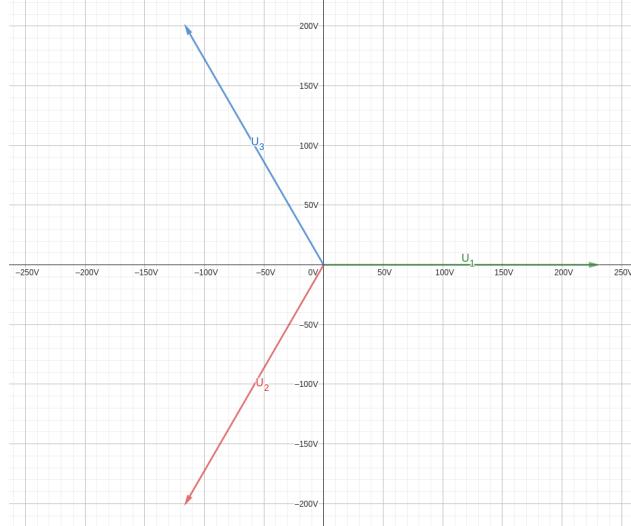


Abbildung 21: Skizze der Spannungen - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation

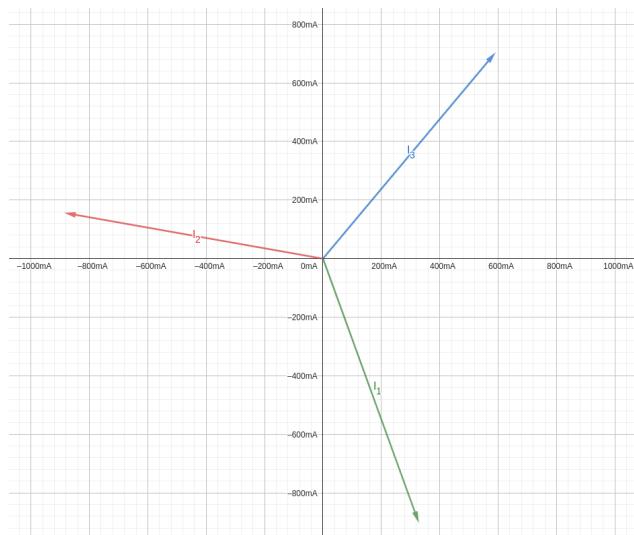


Abbildung 22: Skizze der Ströme - Symmetrische Drehstromlast ohne Kompensation

- d) Bewerten Sie Ihre Beobachtungen für 3.3 (b), (d) und (e) anhand der aufgenommenen Oszillogramme und Ihrer Versuchsvorbereitungen.

In Abschnitt 3.3 (b) haben wir eine symmetrische Verbindung mit dem Knotenpunkt untersucht und festgestellt, dass die Strangströme im Vergleich zur Spannung eine Phasenverschiebung von 70° aufweisen. Beim Anschluss des Neutralleiters an diesen Knotenpunkt konnten wir keinen signifikanten Unterschied feststellen, da die Last symmetrisch ist.

Im Abschnitt 3.3 (d) haben wir die Spannungen und Ströme bei der Dreieckskompensation analysiert. Dabei bemerkten wir, dass die Strangströme im Vergleich zur Spannung keine Phasenverschiebung aufwiesen. Allerdings konnten wir Ober- und Unterschwingungen in den Strömen beobachten.

Im Abschnitt 3.3 (e) betrachteten wir die Stern-Kompensation und stellten fest, dass die Strangströme im Vergleich zur Spannung eine Phasenverschiebung von 70° aufwiesen. Es besteht die Gefahr, dass die Kompensation nicht wie erwartet funktioniert, da die Kondensatoren dennoch etwa dreimal größer sein sollten, um die Ergebnisse zu erzielen.

4.2 Unsymmetrische Drehstromlast

- a) Vergleichen Sie die gemessenen Werten unter 3.4 (a) und (b) mit den in der Vorbereitung errechneten Messwerten. Bewerten Sie die Unterschiede.

Tabelle 7: Vergleich die gemessenen Werte unter 3.4 (a) mit den errechneten Messwerten

Art	Messung		Rechnung	
	\underline{U}_{eff} in V	Phase φ in °	\underline{U}_{eff} in V	Phase φ in °
\underline{U}_{1N}	234	0	220	0
\underline{U}_{2N}	233	240	220	240
\underline{U}_{3N}	233	120	220	120
\underline{U}_{KN}	0	0	0	0
Art	\underline{I}_{eff} in mA	Phase in °	\underline{I}_{eff} in mA	Phase in °
\underline{I}_1	140	-22	140	-17,77
\underline{I}_2	116	240	109	240
\underline{I}_3	84	156	81	156
\underline{I}_N	114	90	114	93

Tabelle 8: Vergleich die gemessenen Werte unter 3.4 (b) mit den errechneten Messwerten

Art	Messung		Rechnung	
	\underline{U}_{eff} in V	Phase φ in °	\underline{U}_{eff} in V	Phase φ in °
\underline{U}_{1N}	234	0	220	0
\underline{U}_{2N}	231	239	220	240
\underline{U}_{3N}	233	119	220	120
\underline{U}_{KN}	82	268	75	273
Art	\underline{I}_{eff} in mA	Phase in °	\underline{I}_{eff} in mA	Phase in °
\underline{I}_1	150	3	148	1,3
\underline{I}_2	81	228	81	225
\underline{I}_3	112	148	107	149
\underline{I}_N	0	0	0	0

Die Tabelle 7 und 8 zeigt, dass die gemessenen Spannungen und Ströme äquivalent zu den rechnerisch ermittelten Werten sind. Die Ströme weisen geringfügige Abweichungen von den Messwerten auf, die jedoch als vernachlässigbar angesehen werden können.

Bei der Rechnung wurde angenommen, dass die Strangspannung 220 V beträgt, wobei die gemessenen Werte der Standardnetzspannung von 230 V entsprechen.

- b) Berechnen Sie die komplexe Scheinleistung \underline{S} , und ermitteln Sie hieraus die Wirk- und die Blindleistung (dreiphasig) für die unter 3.4 gemessenen Drehstromlast

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= \underline{U}_{1N} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{2N} \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_{3N} \cdot \underline{I}_3^* \\
 &= 234V e^{j0^\circ} \cdot 0,15A e^{-(j3^\circ)} + 231V e^{j239^\circ} \cdot 0,08A e^{-(j228^\circ)} + 233V e^{j119^\circ} \cdot 0,11A e^{-(j148^\circ)} \\
 &= 76,37VA \cdot e^{-j8,08^\circ} = 75,61W - j10,74Var \\
 P &= \text{Re}\{\underline{S}\} = 75,61W \\
 Q &= \text{Im}\{\underline{S}\} = -10,74Var
 \end{aligned}$$