Praktikum Anlagen-Schutztechnik

Versuch EE2:

Ein- und dreiphasige Strom- und Spannungswandler

04/2025

Prof. Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler
Dipl.-Ing. K. Schellenberger

1 Versuchsvorbereitung

1.1 Versuchsziel

- Kennenlernen der grundlegenden Eigenschaften ein- und dreiphasiger Wandler
- Untersuchung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit von den Belastungen
- Kennenlernen verschiedener Schaltungsvarianten von Wandlern im dreiphasigen Netz

1.2 Vorausgesetzte Kenntnisse

- Funktionsweise von Transformatoren, Ersatzschaltbild, Zeigerbild
- Schaltungen für Strom- und Spannungsmessung in ein- und dreiphasigen Netzen
- Aufbau von Energieversorgungsnetzen, Sternpunktbehandlung, Fehler im Netz

1.3 Praktikumsinhalte

Im Versuch werden Wandler genutzt, die nach dem induktiven Prinzip arbeiten.
Auf normgerechten Typenschildern gibt es Angaben zur Genauigkeit. In der folgenden Tabelle werden auszugsweise einige Werte für Stromwandler dargestellt (Spannungswandler siehe [9]).

Bezeichnung	Genauigkeits-klasse	Messabweichung bei I_{pr} in %	Höhe maximaler Überstrom I_p	Gesamtfehler bei max. Überstrom
Messwandler			FS	größer 10%
0,5 FS 3	0,5	+/- 0,5	3 * I_{pr}	größer 10%
3 FS 5	3	+/- 3	5 * I_{pr}	größer 10%
5 FS 10	5	+/- 5	10 * I_{pr}	größer 10%
Schutzwandler			ALF	
5 P 10	1	+/- 1	10 * I_{pr}	kleiner 5%
10 P 5	3	+/- 3	5 * I_{pr}	kleiner 10%
10 P 20	3	+/- 3	20 * I_{pr}	kleiner 10%

Diese Grenzwerte gelten unter bestimmten Bedingungen, z.B. bei einer Belastung der Sekundärseite mit der Nennbürde und bei sinusförmigem Primärstrom.

Da es keine Idealen Wandler gibt, wird der Sekundärstrom (unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses) immer etwas kleiner sein als der Primärstrom. Messwandlern werden deshalb oft bewusst „falsch“ gewickelt: z.B. wird auf der Sekundärseite (N2) eine Windung weniger aufgebracht (Windungsausgleich, N1 / N2 = I2 / I1). Dadurch verbessert sich die Genauigkeit (im Nennstrombereich und bei Nennbürde!).

1.4 Vorbereitungsaufgaben

1. Warum und für welche Aufgaben werden Wandler in der Energieversorgung eingesetzt?
2. An der Bauform und an einigen Details kann man sehen, für welchen Verwendungszweck ein Wandler geeignet ist. Nennen Sie mindestens vier Anwendungskriterien, an die ein Wandler baulich angepasst sein muss, und woran man das erkennt!
3. Skizzieren Sie je ein Leistungsschild eines Strom- und eines Spannungswandlers. Welche Angaben müssen vorhanden sein und welche Bedeutung haben diese?
4. Was versteht man unter dem Begriff „Bürde“ eines Wandlers, wie wird sie berechnet?
5. Was versteht man unter dem Begriff „Strom-Messabweichung“, und wie lautet die Formel?
6. Welche Unterschiede bestehen zwischen Mess- und Schutzwandlern?

Hinweis: Bitte beachten Sie die Praktikums-Richtlinie (im OPAL), und übermitteln Sie Ihre Lösung der Aufgaben spätestens 2 Werktage vor Versuchsbeginn dem betreuenden Laboringenieur (als gut lesbare PDF-Datei über das OPAL, nur notfalls per Mail).

Bereiten Sie auf einem Tablet o.ä. pro Gruppe je eine Tabelle mit Diagramm vor für 2.1.1 / 2.1.2 und 2.1.4 / 2.1.5 (ähnlich Bild b auf Folie 46 der Vorlesung) zur sofortigen Eintragung und grafischen Darstellung der Mess- und Rechenwerte während des Praktikums.

1.5 Sicherheitshinweise

Die im Versuch verwendeten Wandler arbeiten, abweichend von den üblichen Einsatzgebieten bei sehr hohen Strömen und Spannungen, mit maximalen Primärströmen von 6 A und einer maximalen Primärspannung von 400 V. Zum Schaltungsaufbau sind die normalen Sicherheits-Laborkabel zu benutzen.
Vor jedem Einschalten einer Messschaltung muss diese vom Laboringenieur freigegeben werden!
An Induktivitäten (z.B. Transformatoren und Wandlern) können bei Unterbrechung des fließenden Stromes hohe Induktionsspannungen auftreten. **Vor jeder Änderung des Versuchsaufbaus oder an Messgeräten ist die Spannungsversorgung herunter zu regeln** (ggf. danach abzuschalten)**!**

2 Praktikumsdurchführung

In die nachfolgende Tabelle sollen zuerst alle auffindbaren Kennwerte der angegebenen Wandler eingetragen werden (z.B. die Werte vom Leistungsschild). Nutzen Sie dazu auch Ihre Vorbereitungen, sowie die ausliegenden Dokumente. Einige Werte davon benötigen Sie für die Versuchsausführung bzw. Auswertung.
Beachten Sie besonders die Unterscheidung zwischen der sekundärseitigen Last (= „Bürde“) und der Belastung mit Primär- / Sekundär- Laststrom, z.B. mit Bemessungs- oder Überstrom bzw. -spannung, sowie die Unterschiede zwischen Schutz- und Messwandlern.

Stromwandler (einphasig), Typ			745 10	Aufsteck-Wandler
Bemessungsströme (Nenn-Übersetzungsverhältnis)	k_r (I_{pr} /I_{sr})	in A	_____	_____
Typ- und Klassenangabe				
Bemessungs-(Nenn-) Scheinleistung (= Nennbürde)	S_r	VA		
Genauigkeitsklasse				
max. prozentualer Fehler bei I_{pr} *		%		
Überstrom-Begrenzungsfaktor bzw. Genauigkeitsgrenzfaktor *	FS / ALF			
Proz. Gesamt-Fehlergrenze bei Nenn-Überstromfaktor *		%		
Bemessungsfrequenz	f_r	Hz		
Max. Betriebs/ Prüfspannung		kV		
Bemessungs- Überstrom (therm. / dyn.)	I_{th} / I_{dyn}	A		
Wärmebeständigkeitsklasse				
Isolierstoffklasse				
Normen und Zulassungen				

Spannungswandler (einphasig), Typ			745 14	GE 24
Bemessungsspannungen (Nenn-Übersetzungsverhältnis)	k_r (U_{pr}/U_{sr})	V	_____	_____
Typ- und Klassenangabe				
Bemessungs-Scheinleistung	S_r	VA		
Genauigkeitsklasse *	cl			
Bemessungsfrequenz	f_r	Hz		
Prüfspannungen		kV		
Zul. Dauer-/ Grenzstrom	I_p	A		
Wärmebeständigkeitsklasse				
Normen und Zulassungen				

* diese Werte müssen ggf. berechnet oder aus Tabellen abgelesen werden

2.1 Messungen an Stromwandlern (einphasig)

2.1.1 Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses bzw. des Stromfehlers (F_I) am Stromwandler „Leybold“ (74510) bei minimaler Last („Bürde“)

Ergänzen / kontrollieren Sie das an Platz 1 aufgebaute einphasige Modellnetz, bestehend aus Stelltrafo und ohmscher Last.

- Kontrolle der Verbind. aller Schutzleiter zum PE der netzverbundenen 3-~-Anschlusseinheit
- Netzanschluss des Stelltrafos, erste **Einstellung U_1 = 0 V** (AC), d.h. Regler Linksanschlag
- ohmsche Last mit 3 parallel geschalteten Widerständen, erste **Einstellung** auf **R = 50 %**
- Ergänzung der Schaltung mit dem Stromwandler 745 10 (Primärseitig, **K (1.1)** und **L (1.2)**)
- Einbindung Multimeter (**S 18, Messbereich 10 A ~**) zur Kontrolle des Laststromes I_1 (= I_P, Primärstrom)

Zur Beachtung: Der Stromwandler darf **sekundärseitig niemals offen,** sondern muss immer nahe am Kurzschluss, also mit einem sehr kleinen Bürdewiderstand betrieben werden!
Wenn ein Multimeter (z.B. 18 S) auf einen Strommessbereich (z.B. **10 A, AC**) eingestellt wird, ist diese Forderung erfüllt. (Anschluss Multimeter ($I_2 = I_S$) an k (2.1) und l (2.2), bei L Brücke stecken).
Nach Kontrolle der Schaltung durch den Versuchsbetreuer testen Sie die Funktionsfähigkeit Ihrer Schaltung und der Komponenten (bei 200 V etwa 1 A Anzeige an beiden Multimetern).
Verwenden Sie ein Oszilloskop mit zwei Stromzangen zur Darstellung der Sinusform von Primär- und Sekundärstrom.
Stellen Sie mit Hilfe des Stelltransformators primärseitig verschiedene Stromstärken (I_P = **I_1**) nach Tabelle 1 ein. Notieren Sie den zeitgleich angezeigten Primär- und Sekundärstrom (**I_2**).
Hinweis: Für stabilere Messanzeigen können Sie an beiden Multimetern **„max“** einstellen, dazu 5-mal Taste „max“ drücken.
Zur Beachtung: Zur Messung mit Überstrom (**500 %**) am Multimeter auf den **10-A**-Bereich umstellen (mit Taste „**Auto/ Man**“). Die Messung ist **zügig** durchzuführen, um eine Überhitzung des Trafos und der ohmschen Last zu vermeiden.

I_p / I_{pr}	**5 %**	**20 %**	**50 %**	**100 %**	**120 %**	**200 %**	**500 %**
$I_p = I_1$ [A]	0,05…….						
$I_s = I_2$ [A]							
F_I [%]							
Oszilloskop	**0,1 V**	**0,1 V**	**0,3 V**	**1 V**	**1V**	**1 V**	**1 V**

Tabelle 1

Berechnen Sie die Abweichungen des Übersetzungsverhältnisses (Strommessabweichungen). Beachten Sie dabei das Vorzeichen! Zeichnen Sie diese in Ihr vorbereitetes Diagramm ein (y-Achse: F_I, x-Achse: I_p / I_{pr}). Überprüfen Sie sofort die Plausibilität Ihrer Messwerte.

Berechnen Sie, welche Bürde das verwendete Multimeter für den Wandler darstellt.

Sekundär-Nennstrom **I_{sr}** :	Innenwiderst. des 18 S:	result. Bürde für d. Wandler:

2.1.2 Bestimmung des Übersetzungsfehlers bei Belastung mit der Nennbürde

Die an der Sekundärseite angeschlossenen Messgeräte können ihren eigenen Energiebedarf direkt aus dem Wandler beziehen. Der Wandler arbeitet dann nicht mehr in seinem Idealzustand nahe am sekundärseitigen Kurzschluss. Dies muss bei der Dimensionierung und der Messgenauigkeit eines Wandlers berücksichtigt werden.

Berechnen Sie, welchen Widerstand die sekundärseitige Bürde haben dürfte, um den Wandler bei Nennstrom mit Nennscheinleistung zu betreiben.

Sekundär-Nennstrom I_{sr} :	Nennscheinleistung:	Nenn-Bürdenwiderstand:

Realisieren Sie diese Bürde mittels eines passenden Widerstandes zusätzlich zum bereits angeschlossenen Strommessgerät (Einstellung 10 A, „Max“, ohmsche auf Last 50 %).
Beobachten Sie, ab welcher Stromstärke die Signalform von der Sinusform abweicht.

Wiederholen Sie die Messungen von Aufgabe 2.1.1, jedoch bei Belastung mit Nennbürde.

I_P / I_{1N}	**5 %**	**20 %**	**50 %**	**100 %**	**120 %**	**200 %**	**500 %**
I_1 [A]	0,05….....						
I_2 [A]							
F_I [%]							
Oszilloskop	**0,1 V**	**0., V**	**0,3 V**	**1 V**	**1V**	**1 V**	**3 V**

Tabelle 2

Ermitteln Sie die Messabweichungen und zeichnen Sie diese in das Diagramm von 2.1.1. ein.
Welche Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der Stromstärke **und** der Bürde erkennen Sie?
Entspricht der verwendete Wandler der angegebenen Genauigkeitsklasse? Begründen Sie das!

2.1.3 Untersuchung des Einflusses einer zu großen Bürde auf die Genauigkeit

Wechseln Sie jetzt am Stromwandler auf die untere, einstellbare Bürde (Schaltung 1).
Einstellung **R_{Last}** auf **50%**, Multimeter neu einschalten, DC/AC, diesmal **nicht** auf „**max**“.
Ermitteln Sie den Sekundärstrom **I_2** sowie mit einem weiteren Multimeter die Spannung **U_2** auf der Sekundärseite des Wandlers bei verschiedenen Bürde-Widerständen (Einstellung nach Tabelle).
Im Primärkreis des Wandlers ist **I_1** auf **1 A** (Nennstrom) **konstant** zu halten **(**ggf. nachregeln).
Beobachten Sie am Oszilloskop (Einstellung 1V/div), ab welcher Bürde es zu deutlichen Feldverzerrungen kommt. Achten Sie ebenfalls auf akustische Effekte.
Optional:
Für die letzte Messung (letzte Spalte der Tabelle) vermindern Sie die Spannung der Stromversorgung auf 0 V. Öffnen Sie ausnahmsweise die Sekundärseite des Wandlers (an der Bürde) zur Simulation einer maximalen Bürde. Beobachten Sie die Spannung bei vorsichtigem Hochregeln bis zum Primär-Nennstrom.
Notieren sie die erreichte Sekundärspannung, dann sofort die Spannung herunterdrehen und aus.

Einstellung $R_{Bü}$ [%]	**10**	**Verzerr. ab:**	**40**	**60**	**100**	**offen**
I_1 [A]						
I_2 [A]						**-**
U_2 [V]						

Tabelle 3

Welche Schlussfolgerungen kann man aus den hohen Abweichungen bei zu hoher Bürde ziehen?
Warum steigt die Spannung auf der Sekundärseite des Wandlers bei Erhöhung der Bürde an?
Warum steigt die Spannung nicht linear an mit der Erhöhung der Bürde?

2.1.4 Bestimmung des Stromfehlers eines Aufsteck-Stromwandlers bei kleiner Bürde

Ersetzen Sie in Ihrer Schaltung den Modell-Wandler und seine Bürde durch einen handelsüblichen Aufsteck- Stromwandler (z.B. „WAGO“), zuerst ohne zusätzliche Bürde.

Hinweis: Der vorhandene Eisenkreis eines Messwandlers kann für verschiedene Übersetzungsverhältnisse genutzt werden, indem z.B. die Anzahl der vom Primär-Strom durchflossenen Windungen verändert wird. Wird, wie ursprünglich vorgesehen, nur eine Primärwindung verwendet, ist der verwendete Wandler für I_{1N} = 50 A ausgelegt. Bei diesem Wandler wurden 50 Primärwindungen durchgefädelt, somit kann er jetzt für I_{1N} = 1 A genutzt werden.

Überprüfen Sie den Stromfehler dieses so präparierten Wandlers wie zuvor zuerst mit einer zu kleinen Bürde (Multimeter). Stellen Sie die ohmsche Last zu Beginn auf **R = 50 %** ein, sowie die beiden Multimeter auf „**max**“. Beobachten Sie die Sinusform am Oszilloskop!

Achtung! Bei Messungen mit **I_1 > 3 A Messbereich auf 10 A umstellen** (Taste „Auto/Man“).
Zügige Steigerung **bis 5 A**, konstanten Messwert abwarten, ablesen und sofort wieder absenken.

I_P / I_{1N}	**5 %**	**20 %**	**50 %**	**100 %**	**120 %**	**200 %**	**500 %**
I_1 [A]	0,05…….						
I_2 [A]							
F_I [%]							
Oszilloskop	**0,1 V**	**0., V**	**0,3 V**	**1 V**	**1V**	**1 V**	**1 V**

Tabelle 4

Ermitteln Sie die Messabweichung und zeichnen sie diese ins Diagramm (Vorzeichen beachten!).

2.1.5 Bestimmung des Stromfehlers des Aufsteck-Stromwandlers bei Nennbürde

Berechnen Sie den für diesen Wandler passenden Bürde-Widerstand.

Sekundär-Nennstrom **I_{sr}** :	Nennscheinleistung:	Bürde-Widerstand:

Simulieren Sie diese zusätzliche Bürde mit einem ohmschen Widerstand. Integrieren Sie diesen in Ihre Schaltung. Ermitteln Sie die Messwerte zu Bestimmung des wahren Übersetzungsverhältnisses bei jedem Laststrom. Beobachten Sie wieder die Sinusform sowie akustische Effekte.

I_P / I_{1N}	**5 %**	**20 %**	**50 %**	**100 %**	**120 %**	**200 %**	**500 %**
I_1 [A]	0,05…….						
I_2 [A]							
F_I [%]							
Oszilloskop.	**0,1 V**	**0., V**	**0,3 V**	**1 V**	**1V**	**1 V**	**1 V**

Tabelle 5

Berechnen Sie die Messabweichung und zeichnen Sie diese in Ihr Diagramm ein (Vorz. beachten!
Ab welcher Stromstärke beginnt die Verzerrung der Sinusform? I_1 = ……I_2 =…….
Welche Messabweichung ergibt sich bei $I_{1\,nenn}$ = 1 A und 4-facher Bürde? I_2 =…….. F_I = ……....
Was können Sie daraus schlussfolgern?

2.1.6 Auswertung der Messergebnisse in Ihrem Protokoll

Vergleichen Sie die beiden Wandler miteinander und bewerten Sie die diese bezüglich der erwarteten Genauigkeit und der vorgesehenen Einsatzgebiete!
Gehen Sie dabei einerseits auf die Übertragungsgenauigkeit im Bereich der Nenn-Strombelastung bei verschiedenen Bebürdungen und andererseits auf die Veränderung des Übersetzungsverhältnisses bei Erhöhung der Strombelastung ein! Benennen Sie die Ursachen dieser Veränderung, sowie mögliche Maßnahmen dagegen.
Bewerten Sie das verwendete Messverfahren und die verwendeten Messgeräte bezüglich der Aussagekraft zur Bestimmung der Übertragungsfehler der Messwandler.

2.2 Dreiphasen-Stromwandler („Leybold“ 74512)

2.2.1 Verhalten des Stromwandlers im symmetrisch belasteten Netz

Kontrollieren bzw. ergänzen Sie das dreiphasige Modellnetz an Platz 2:

- Dreiphasige, regelbare Spannungseinspeisung, Anschluss an HTW-CEE-Wandsteckdose
- Einbindung der Primärseite des dreiphasigen Stromwandlers (**745 12**) in den Stromkreis
- Daran Anschluss der ohmschen Last, je Phase einen Widerstandsstrang anschließen
- Die andere Seite der Widerstände gemeinsam an „N“ anschließen (Sternschaltung)
- Kontrolle Anschluss aller Schutzerden an „PE“ der Spannungsquelle
- Voreinstellung der Lastwiderstände auf **R = 80 %**
- Messgerät zur Kontrolle des Laststromes einer Phase ($I_{P(L1)}$) anschließen

Zur Beachtung: Der **Stromwandler** darf **sekundärseitig niemals offen** betrieben werden!
Anschluss von drei Digitalmultimetern zur Messung der Ströme in den Sekundärwicklungen (siehe auch Schaltung 3).
Nach Abnahme der Schaltung durch den Versuchsbetreuer! :
Stellen Sie den Transformator auf eine Leiter-Erde-Spannung (**L1-N**) von **200 V** ein.
Kontrollieren Sie stichprobenartig die Richtigkeit der Anzeigen der drei Sekundärströme an den Multimetern. Stellen Sie dazu die ohmsche Last nacheinander auf 80 %, 50 %, 30 % ein.

Messungen (I_{sek}) mit angeschlossenem Neutralleiter	**R = 80 %**	**R = 50 %**	**R = 30 %**
$I_{P(L1)}$ [A]			
I_{L1} [A]			
I_{L2} [A]			
I_{L3} [A]			

Tabelle 7

Regeln Sie die Spannung herunter auf 0V.
Warum sind die angezeigten Messwerte der einzelnen Phasen nicht gleich? Nennen Sie mindestens 4 mögliche Ursachen.
In Schaltung 3 wurden alle kraftwerksseitigen Sekundär-Anschlüsse der Wandler miteinander und mit der Schutzerde verbunden. Welchen Einfluss hat dieser Anschluss auf die Messergebnisse? Welche weiteren Gründe könnte es dafür geben?

2.2.2 Strommessung im unsymmetrisch belasteten Netz

Um das Verhalten dieses Stromwandlers bei **unsymmetrischer Belastung** zu untersuchen, wird ein ohmscher Widerstand **parallel** zur ohmschen Last des Stranges **L3** geschaltet. Benutzen Sie dazu die einstellbare Last bzw. Bürde des Spannungswandlers (**745 15**, 0 – 1500 Ω, einschließlich Vorwiderstand).

Stellen Sie die ohmsche **Last** auf einen Wert von **R = 50 %** und den **Parallelwiderstand auf 60 %** ein. Erhöhen Sie die Spannung wieder auf **200 V**. Kontrollieren Sie mittels separater Stromzange den Stromfluss im Neutralleiter.
Messen Sie wiederum den Primärstrom $\mathbf{I_{p(L1)}}$ und die 3 sekundärseitigen Leiterströme, je einmal bei angeschlossenem und einmal bei abgetrenntem Neutralleiter N.

(R = 50%, mit zusätzlicher Last an L3)	**Unsymmetrische Last angeschlossener N**	**Unsymmetrische Last abgetrennter N**
$\mathbf{I_{P(L1)}}$ **[A]**		
$\mathbf{I_{L1}}$ **[A]**		
$\mathbf{I_{L2}}$ **[A]**		
$\mathbf{I_{L3}}$ **[A]**		
$\mathbf{I_N}$ **[A]** (Stromzange)		

Tabelle 8

Regeln Sie die Spannung herunter und schalten Sie diese aus.
Warum ändern sich auch die Ströme in den nicht betroffenen Leitern, und warum in Abhängigkeit vom Anschluss des N-Leiters?
Vergleichen Sie die Messwerte miteinander und mit denen von Tabelle 7.

2.2.3 Messung des Nullstromes

Nehmen Sie vorerst den zusätzlichen Widerstand aus der Schaltung heraus. Schließen Sie den N-Leiter wieder an. Schließen Sie jetzt die drei einzelnen Stromwandler so zusammen, dass Sie den Nullstrom messen können! (**Holmgreen-Schaltung**, siehe auch Schaltbild 4.)
Die ohmsche Last bleibt auf **R = 50 %** eingestellt. Erhöhen Sie die Spannung wieder auf **200 V**.

Messen Sie den Nullstrom zuerst bei symmetrischer Last.
Stellen Sie dann wieder den Zustand „unsymmetrische Last“ mittels des o.g. **Parallelwiderstandes (60 %)** parallel zum Laststrang 3 her.

$\mathbf{R_{Last}}$	**Symmetrische Last N verbunden**	**Unsymmetrische Last N verbunden**	**Unsymmetrische Last N aufgetrennt**
$\mathbf{I_{p(L1)}}$ **[A]**			
$\mathbf{I_0}$ **[A]**			
$\mathbf{I_N}$ **[A]** (Stromzange)			

Tabelle 9

Regeln Sie die Spannung herunter und schalten Sie diese aus. Verbinden Sie den N-Leiter wieder.
Welche Art von Fehlern im Netz könnten durch diese Schaltung erkannt werden?
2.2.4 optional: Summenstromwandler: entfällt

2.3 Spannungswandler, einphasig, mit zwei Sekundärwicklungen („Leybold“ 74514)

2.3.1 Messung des Übersetzungsverhältnisses eines einphasigen Spannungswandlers

Bauen Sie an Platz 1 ein zweipoliges Modellnetz auf, bei dem Sie die Spannung mittels Wandler messen können. Verwenden Sie dazu folgende Geräte:

- Zweipolige regelbare Spannungseinspeisung (Stelltransformator),
- Einphasiger Spannungswandler mit zwei Sekundärwicklungen (Nr. **745 14**)

Zur Beachtung: Der Spannungswandler darf **sekundärseitig niemals kurzgeschlossen** werden! Stellen Sie deshalb **alle Multimeter auf Spannungsmessung** um!

Schließen Sie je ein Digitalmultimeter zur Erfassung der Primärspannung und der beiden Sekundärspannungen an. Überprüfen Sie alle PE-Anschlüsse.

Notieren bzw. berechnen Sie alle Eintragungen der folgenden Tabelle.

Sekundär-Nennspannung	Nenn-Scheinleistung	Nenn-Bürdewiderstand	Multimeter-Widerstand R_i	Zulässig?
$U_{2.1-2.2}$				
$U_{3.1-3.2}$				

Schalten Sie den Transformator ein und erhöhen Sie die Spannung wie in der Tabelle angegeben. Ermitteln Sie die angezeigten Messwerte **$U_{2.1-2.2}$**, **$U_{1.1-1.2}$** und **$U_{3.1-3.2}$**.

$U_P = U_{1.1-1.2}$: [V]	20, …..	100, …..	200, ……	270, …..
$U_{S2} = U_{2.1-2.2}$: [V]				
F_{U2} [%]				
$U_{S3} = U_{3.1-3.2}$.: [V]				
F_{U3} [%]				

Tabelle 11

Regeln Sie die Spannung herunter und schalten Sie diese aus.
Berechnen Sie die Messabweichungen unter Beachtung des Übersetzungsverhältnisses! Prüfen Sie die Plausibilität der berechneten Werte!

2.3.2 optional: **Untersuchung des Messfehlers in Abhängigkeit von der Bürde**

- Anschluss der unveränderlichen Last („Bürde“) parallel zum Messgerät an 3.1 und 3.2
- veränderliche Last (Bürde-Regler auf **100 %**) an 2.1 und 2.2. (u1 / v1 (100 V / $\sqrt{3}$).

Einstellung Primärspannung **<u>200 V</u>**, Ablesen **U_p** und **U_{S2}** des Wandlers an den Klemmen u 1 / v 1 für verschiedene Werte der Bürde 2 ab, sowie einmalig die Werte an **U_{S3}** der Bürde 1.

Bürde 2 [%]	**100**	**40**	**0**	**Bürde 1**
$R_{Bü2}$ [Ω]	**1900**	**1000**	**400**	**220**
$U_P = U_{1.1-1.2}$: [V]				
$U_{S2} = U_{2.1-2.2}$: [V]				**U_{S3}**
F_{U2} [%]				**F_{U3}**

Tabelle 12

Spannung herunterregeln und aus. Welche physikalischen Effekte treten bei Überbürdung auf?

2.4 Messungen am dreiphasigen Spannungswandler („Leybold“ 74516)

2.4.1 Messung mit drei einpolig isolierten Wandlern mit 3 ~ - Δ - Hilfswicklung

zu verwendende Geräte (Platz 2)**:**

- Dreiphasige regelbare Spannungseinspeisung, Spannungsmessgerät zur Kontrolle
- Einschubplatte mit drei einphasigen Spannungswandlern und Hilfswicklungen (Nr. **745 16**)

Schließen Sie den Wandler nach Schaltung 7 an die Stromversorgung an.

Die Primär- Wicklungen sind mit den Spannungen auf der Energieversorger-Seite an L1, L2 und L3 sowie auf der anderen Seite mit „N“ der Spannungsquelle verbunden (Sternschaltung).

Die Hilfswicklung ist als offene Dreieckschaltung auszuführen und einseitig mit PE verbunden. Sie kann somit zur Messung der „Nullspannung“ (**U_{en}**) genutzt werden.

Die Sekundärwicklungen des Wandlers sind als Sternschaltung auszuführen, der Sternpunkt wird mit PE verbunden.

Schließen Sie je ein Spannungsmessgerät zum Messen aller drei sekundärseitigen **Leiter-Leiter-Spannungen** und eines an die Hilfswicklung (zwischen „e“ und „n“) an. Kennzeichnen Sie in Ihrem Schaltplan die Messgeräte mit 1 - 3 und „en“ entsprechend Tabelle 14.

Achtung! Die Sekundärwicklungen des Wandlers dürfen **nicht kurzgeschlossen** werden! Überprüfen Sie, ob alle **Multimeter** auf **„Spannungsmessung“ eingestellt** wurden!
Nach Abnahme der Schaltung durch den Versuchsbetreuer stellen Sie die Spannungsquelle auf **200 V** (U_{L1-N}) ein.

Testen Sie zuerst bei symmetrischer Belastung.
Schaffen Sie dann einen unsymmetrischen Betriebszustand, indem Sie den Außenleiter L_3 am Transformator entfernen, und messen Sie erneut.
Trennen Sie danach zusätzlich den N-Leiter vom Transformator und messen Sie nochmals.

Schaltung	**U1 (U_{L1-L2})**	**U2 (U_{L2-L3})**	**U3 (U_{L1-L3})**	**U_{en}**
N verbunden, symmetrisch				
N verbunden, L_3 entfernt				
N getrennt, L_3 entfernt				

Tabelle 14

Erklären Sie, warum sich die Messwerte der letzten beiden Zeilen unterscheiden!

Inwiefern eignet sich diese Schaltung zu Messungen bei unsymmetrischem Betrieb und bei Fehlern im Netz? Interpretieren Sie die Messwerte dementsprechend.

2.4.2 Messung an dreiphasigen Netzen mit zwei Wandlern in V-Schaltung

Schalten Sie die Spannung aus. Verbinden Sie L3 und N wieder mit dem Trafo.
Entfernen Sie alle Kabel und Brücken vom Wandler, außer den Verbindungen zum Transformator und den PE-Anschlüssen. Verwenden Sie Schaltplan 8.

Realisieren Sie mit den Primärwicklungen der Wandlern 1 (U) und 3 (W) eine **V-Schaltung,** bei der die beiden Enden der Primärwicklungen (L1, L3) an L2 angeschlossen werden.
Die Hilfswicklung und der N-Anschluss des Wandlers bleiben offen.

Schließen Sie alle Messgeräte an. Bezeichnen Sie diese in Ihrem Schaltplan entsprechend der untenstehenden Tabelle.

Schalten Sie die Spannung (**200 V**) ein. Testen Sie zuerst bei symmetrischer Belastung. Schaffen Sie dann einen unsymmetrischen Betriebszustand, indem Sie jeweils einen der Außenleiter (L_1, dann L_2, dann L_3) zwischen Transformator und Wandler-Eingang abtrennen.

Kontrollieren Sie als letztes, ob die Schaltung auch bei geringerer Spannung (100 V) richtige Werte anzeigt.

Schaltung	**U1 ($U_{2u1-2w1}$)**	**U2 (U_{2u1-PE})**	**U3 (U_{2w1-PE})**
symmetrisch (200 V)			
unsymmetrisch, L_1 getrennt			
unsymmetrisch, L_2 getrennt			
unsymmetrisch, L_3 getrennt			
symmetrisch (100 V)			

Tabelle 15

Regeln Sie die Spannung herunter und schalten Sie diese aus.

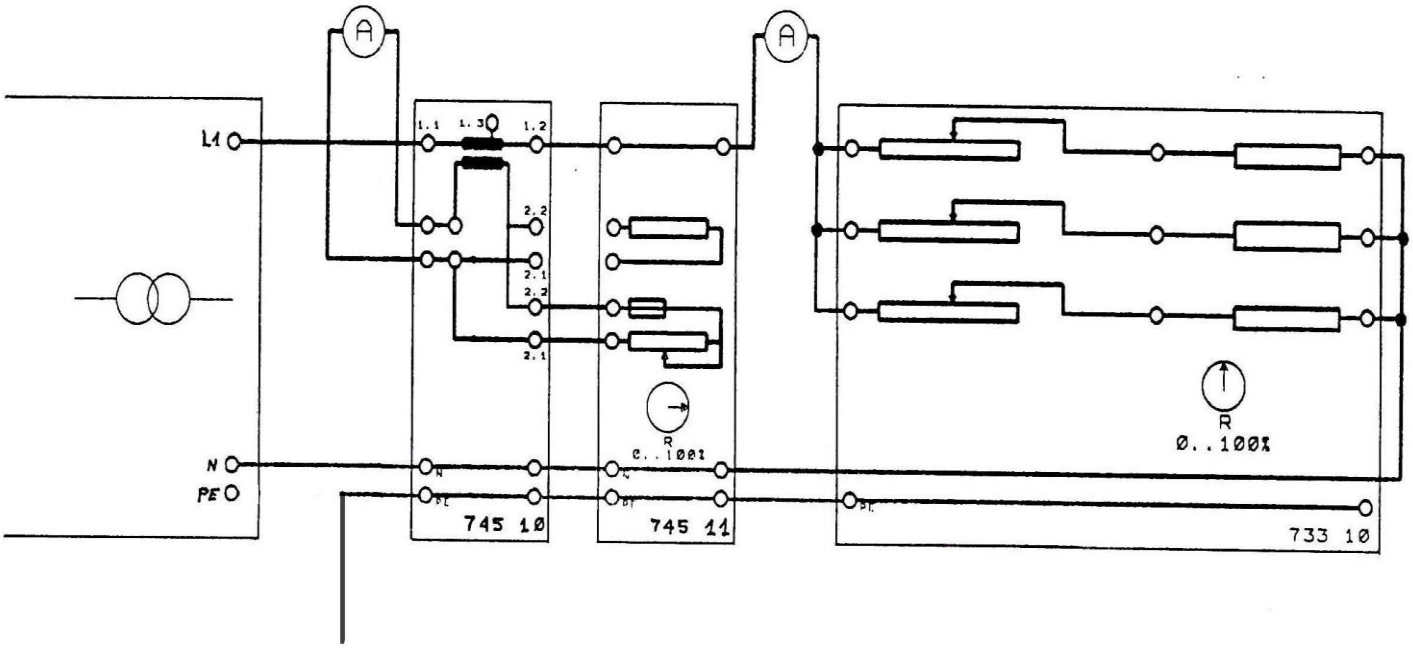
Interpretieren Sie die Messwerte. Für welche Messaufgaben wäre diese Schaltung geeignet?

3 Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

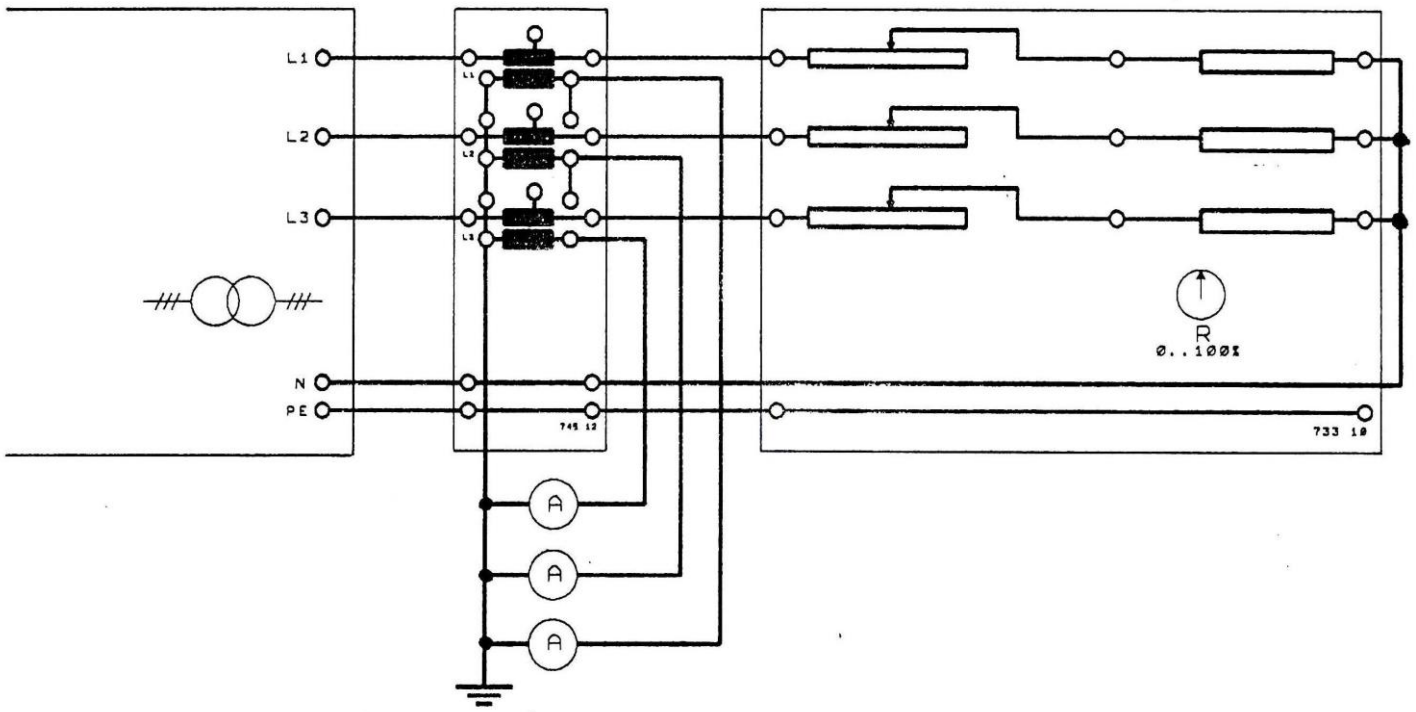
ALF	Genauigkeits-Grenzfaktor (Bemessungs-Überstromfaktor für Schutzwandler)
FS	Überstrom-Begrenzungsfaktor (für Messwandler)
F_i	Strommessabweichung, Fehler des Übersetzungsverhältnisses
F_U	Spannungsmessabweichung, Fehler des Übersetzungsverhältnisses
I_0	Nullstrom
$I_1 = I_p$	Effektivwert des Primärstromes
$I_2 = I_s$	Effektivwert des Sekundärstromes
I_{L1}, $I_{L \dots}$	Effektivwert des Stromes im Leiter L1, L …
I_{pr}	Bemessungsstrom, primär
I_{sr}	Bemessungsstrom, sekundär
I_{th}	thermischer Bemessungs-Kurzzeitstrom (1 s)
I_{dyn}	Bemessungs-Stoßstrom (mechanische Festigkeit
I_{Summe}	Summenstrom
k_r	Bemessungsübersetzung
$R_{Bü}$	Bürden-Widerstand
R_{Last}	Lastwiderstand
$U_{1.1 – 1.2}$	Spannung zwischen den Klemmen 1.1 und 1.2
$U_{2.1 – 2.2}$	Spannung zwischen den Klemmen 2.1 und 2.2
$U_{3.1 – 3.2}$	Spannung zwischen den Klemmen 3.1 und 3.2
U_{pr}	Bemessungsspannung, primär
U_{sr}	Bemessungsspannung, sekundär
$U_1 = U_p$	beim einphasigen Strom und Spannungswandler - Primärspannung
$U_2 = U_s$	beim einphasigen Strom und Spannungswandler – Sekundärspannung
U_{S1}, $U_{s \dots}$	beim dreiphasigen Spannungswandler – gemessene Sek.-Spannung an $L_{1, L \dots}$
U_{en}	Nullspannung
Sr	Bemessungs-(Nenn-) Scheinleistung („Außenbürde“)

Anmerkung: in älterer Literatur steht statt $_{r}$ (regulär) zumeist $_{n}$ (nenn-).

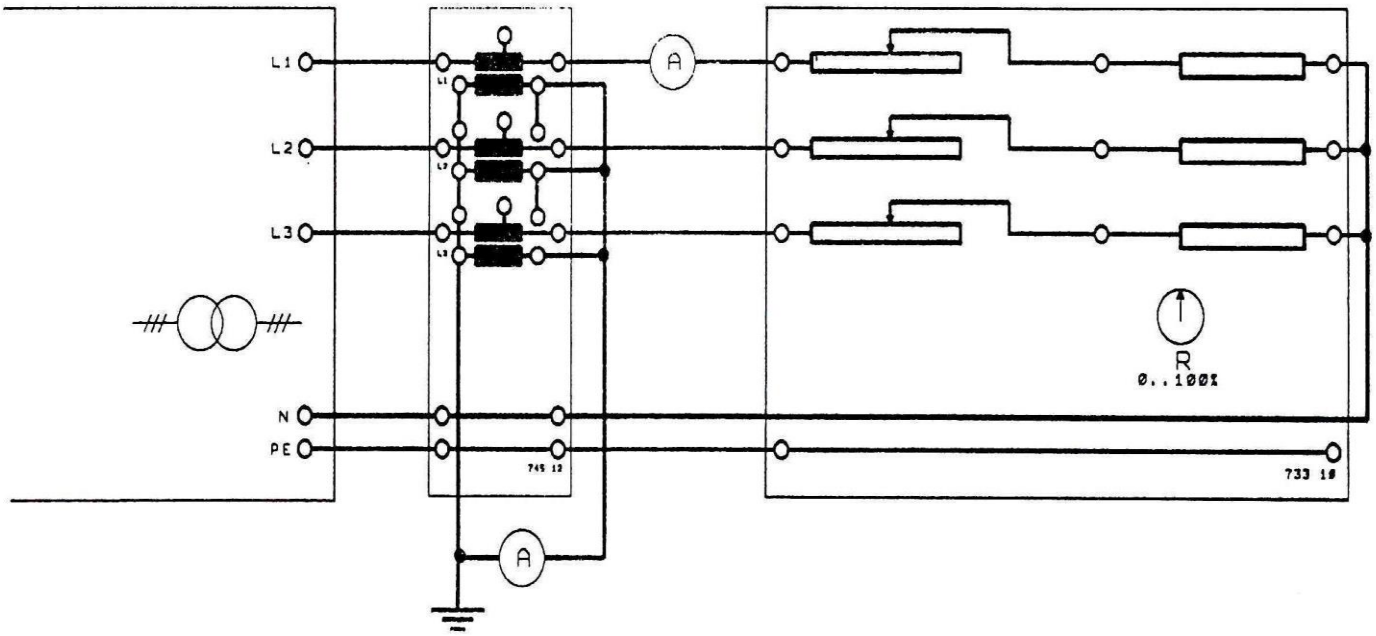
4 Schaltungen



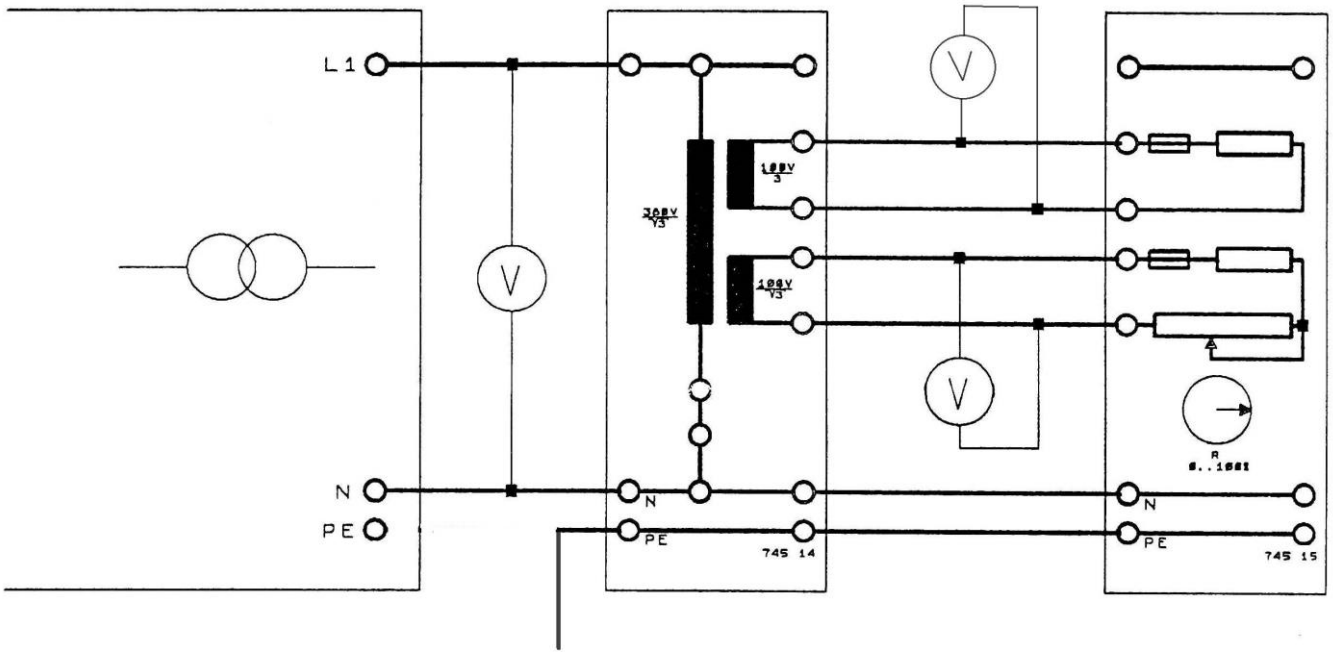
Schaltung 1: Messung des Übersetzungsverhältnisses eines einphasigen Stromwandlers



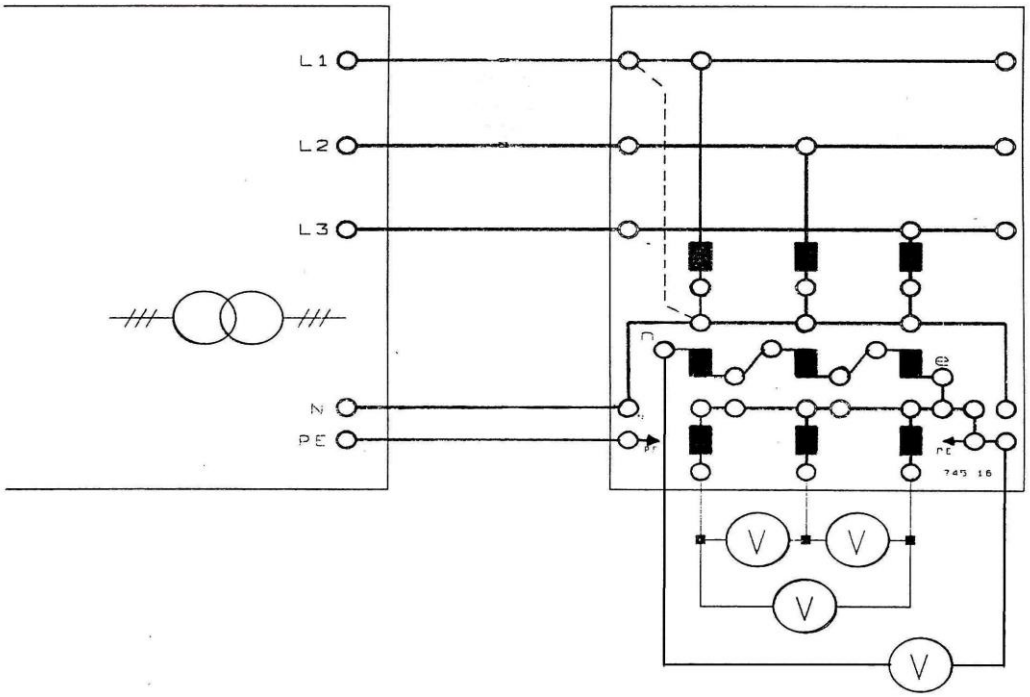
Schaltung 3: Messungen an einem dreiphasigen Stromwandler



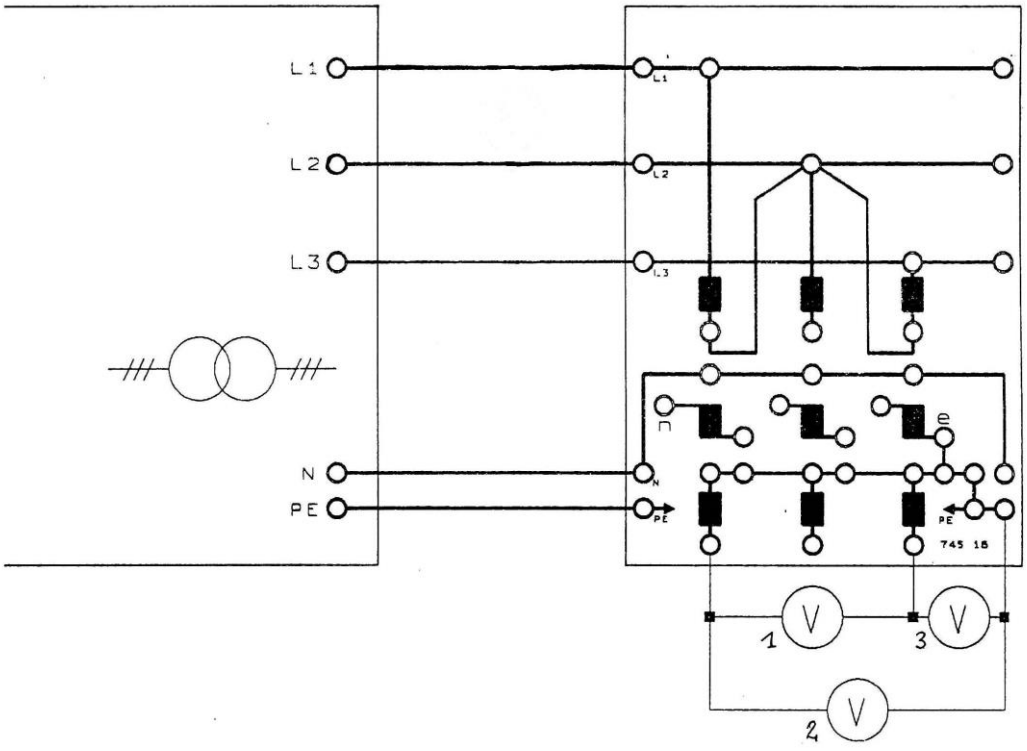
Schaltung 4: Holmgreen-Schaltung zur Messung des Nullstromes



Schaltung 6: Messungen am einphasigen Spannungswandler mit zwei Sekundärwicklungen



Schaltung 7: Dreiphasiger Spannungswandler, Messung Leiter-Leiter- und Nullspannung



Schaltung 8: V-Schaltung zweier Spannungswandler

5 Literatur

[1] Cichowski, R.; Schossig, W.; Schossig, T.: Netzschutztechnik, VDE – Verlag, 2018; an der HTW online verfügbar (Kapitel 6, S 46 – 55)

[2] Kasikci, I.: Planung von Elektroenergieanlagen: Theorie, Vorschriften, Praxis; Springer-Verlag, 2018; an der HTW online verfügbar (Kapitel 24, Seiten 458 – 464)

[3] Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis; Springer Fachmedien Verlag Wiesbaden, 2013, an der HTW online verfügbar (Kapitel 4, S. 170 – 178)

[4] Doemeland, W.; Götz, K.: Handbuch Schutztechnik, 5. Auflage, Verlag Technik GmbH, Berlin 1995 / 2007 (S. 51 – 86)

[5] DIN VDE 0414-9-1 (2020-03, Allgemeine Anforderungen, derzeit im Entwurf), 0414-9-2 (2013-07, Stromwandler), 0414-9-3 (2012-05, Spannungswandler)

[6] Clemens, H.; Rothe, K.: Schutztechnik in Elektroenergiesystemen, 3. Auflage, Verlag Technik GmbH, Berlin 1991 (S. 105-122)

[7] Müller, L.; Boog, E.: Selektivschutz elektrischer Anlagen, 2. Ausgabe, VWEW – Verlag, Frankfurt am Main 1990 (S. 40 – 56)

[8] Zube, B.: Selektivschutz für elektrische Netze und Anlagen, VDE – Verlag, Berlin-Offenbach 1990 (S. 20, S. 83 – 89)

[9] Rogler, R.: Vorlesung „Schutztechnik“, HTW Dresden

[10] Meyer, J.: Skript zur Vorlesung „Selektivschutztechnik“, HTW Dresden