



Antonius Abdalla, BSc.

Auswirkungen von Transformatoren auf Fehler in gelöschten Netzen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar FICKERT

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Graz, Mai 2018

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Zu allererst möchte ich Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert vom Institut für Elektrische Anlagen und Netze an der Technischen Universität Graz für sein Engagement und seine fachliche und persönliche Unterstützung danken.

Darüber hinaus möchte ich mich sowohl bei meinen Eltern Nagi und Salwa als auch bei meinen Geschwistern Barbara und John bedanken, die mir durch ihre Unterstützung den Abschluss meines Studiums ermöglicht haben. An dieser Stelle möchte ich auch meiner Verlobten Evanka, die mir stets tatkräftig zur Seite stand und mich motivierte, danken.

Abschließend möchte ich noch allen danken, die mir bei der Erstellung dieser Masterarbeit zu Hilfe kamen.

Übersicht

Die bei einem Erdschluss auftretenden Fehlerströme sind für die Energieversorgung bzw. Netzbetreiber unerwünscht. Diese unerwünschten Erdschlussströme können nicht verhindert werden, weshalb es sehr wichtig ist diese in jeglicher Hinsicht genauer zu untersuchen.

Da im Übertragungsnetz Transformatoren eine große Rolle spielen und der Erdschluss, der am häufig auftretende Fehler ist, dient als Basis der Masterarbeit die Untersuchung des Transformators bei einem Erdschluss. Da dies weitgehend bekannt ist, wird sowohl der Einphasentransformator als auch der Dreiphasentransformator auf sein Verhalten bei Erdschlüssen im Zusammenhang mit einer Leitungsunterbrechung untersucht.

Abstract

The fault currents that occur in a ground fault are undesirable for the power supply or the energy supply company. These undesirable ground fault currents cannot be prevented which is why it is very important to analyze them in all respects. Since transformers play an important role in the transmission network and the ground fault situation, which is the most frequent occurring error, this serves as the base of the master's thesis, the analysis of transformers in the event of a ground fault.

In this context, both the one-phase transformer and the three-phase transformer are analyzed in their behaviour at ground fault in connection with broken lines events.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT	3
ÜBERSICHT	7
ABSTRACT.....	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	12
1 KURZFASSUNG	13
1.1 AUFGABENSTELLUNG UND ZIEL	13
1.2 ERGEBNISSE	13
1.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN	13
2 EINLEITUNG.....	14
3 STERNPUNKTBETRACHTUNG BEI ERDSCHLÜSSEN	15
3.1 NETZE MIT ISOLIERTEM STERNPUNKT	15
3.1.1 <i>Erdschluss im isolierten Netz</i>	16
3.1.1 <i>Zweipoliger Erdschluss im isolierten Netz</i>	17
3.2 GELÖSCHTES NETZ (KOMPENSIERTES NETZ).....	18
3.2.1 <i>Erdschluss im gelöschten Netz</i>	19
3.2.2 <i>Zweipoliger Erdschluss im gelöschten Netz</i>	20
3.3 NETZE MIT STARR GEERDETEN STERNPUNKT.....	21
3.3.1 <i>Erdschluss im starr geerdeten Netz</i>	22
3.3.2 <i>Zweipoliger Erdschluss im starr geerdeten Netz</i>	23
3.4 NETZE MIT NIEDEROHMIG GEERDETEN STERNPUNKT.....	24
3.4.1 <i>Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz</i>	25
3.4.2 <i>Zweipoliger Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz</i>	26
3.4.1 <i>Beispiel eines niederohmig geerdetes Netz</i>	27
3.5 STERNPUNKTSCHALTUNG IN EINIGEN LÄNDERN DER WELT.....	31
4 UNTERSUCHUNG EINER NETZBELASTUNG MITTELS 1-PHASEN-TRANSFORMATOR ZWISCHEN 2 AUßENLEITERN	32
4.1 GRUNDLEGENDE ÜBERLEGUNG UND AUFGABENSTELLUNG	32
4.2 MESSAUFBAU.....	34
4.3 MAßSTABSFRAGEN	35
4.4 GESUNDES NETZ	36
4.4.1 <i>Überblick – Gesundes Netz</i>	36
4.4.2 <i>Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz</i>	38
4.4.3 <i>Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz</i>	38
4.4.4 <i>Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz</i>	39
4.4.5 <i>Messungen – Gesundes Netz</i>	40
4.4.6 <i>Zeigerdiagramme – Gesundes Netz</i>	45
4.5 STEHENDER ERDSCHLUSS (REGULÄR).....	48

4.5.1	Überblick – stehender Erdschluss.....	48
4.5.2	Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss.....	50
4.5.3	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss.....	50
4.5.4	Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss.....	51
4.5.5	Messungen – stehender Erdschluss.....	52
4.5.6	Zeigerdiagramme – stehender Erdschluss.....	59
4.6	FALL 1: ERDSCHLUSS MIT LEITUNGSUNTERBRECHUNG AUF DER VERSORGENGSSEITE.....	63
4.6.1	Überblick – Fall 1.....	63
4.6.1	Theoretische Spannungsverhältnisse – Fall 1.....	65
4.6.2	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Fall 1.....	65
4.6.3	Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 1.....	66
4.6.1	Messungen – Fall 1.....	67
4.6.2	Zeigerdiagramme – Fall 1.....	74
4.7	FALL 2: ERDSCHLUSS MIT LEITUNGSUNTERBRECHUNG AUF DER VERBRAUCHERSEITE – RÜCKWÄRTIGER FEHLER.....	77
4.7.1	Überblick – Fall 2.....	77
4.7.2	Theoretische Spannungsverhältnisse – Fall 2.....	79
4.7.3	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Fall 2.....	80
4.7.4	Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 2.....	81
4.7.1	Messungen – Fall 2.....	82
4.7.2	Zeigerdiagramme – Fall 2.....	89
5	UNTERSUCHUNG EINES 3-PHASEN-TRANSFORMATORS.....	93
5.1	MESSAUFBAU.....	93
5.2	MAßSTABSFRAGEN.....	94
5.3	GESUNDES NETZ (PHASE 0).....	95
5.3.1	Überblick – Gesundes Netz.....	95
5.3.2	Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz.....	97
5.3.3	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz.....	97
5.3.4	Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz.....	97
5.3.5	Messungen – Gesundes Netz.....	98
5.3.6	Zeigerdiagramme – Gesundes Netz.....	99
5.4	STEHENDER ERDSCHLUSS (REGULÄR – PHASE 1).....	100
5.4.1	Überblick – stehender Erdschluss.....	100
5.4.1	Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss.....	102
5.4.2	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss.....	102
5.4.3	Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss.....	102
5.4.4	Messungen – stehender Erdschluss.....	103
5.4.5	Zeigerdiagramme – stehender Erdschluss.....	106
5.5	ERDSCHLUSS MIT LEITUNGSUNTERBRECHUNG AUF DER VERSORGENGSSEITE – NACH LEITERRISS, ÜA IN ORDNUNG (PHASE 2).....	108
5.5.1	Überblick – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung.....	108
5.5.2	Theoretische Spannungsverhältnisse – Phase 2.....	110
5.5.3	Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Phase 2.....	110

5.5.4	<i>Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 2</i>	111
5.5.5	<i>Messungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung</i>	112
5.5.6	<i>Zeigerdiagramme – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung</i>	116
5.6	ERDSCHLUSS MIT LEITUNGSUNTERBRECHUNG AUF DER VERSORGUNGSSEITE – NACH LEITERRISS, ÜA BESCHÄDIGT (PHASE 3)..	119
5.6.1	<i>Überblick – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt</i>	119
5.6.2	<i>Theoretische Spannungsverhältnisse – Phase 3</i>	121
5.6.3	<i>Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Phase 3</i>	122
5.6.4	<i>Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 3</i>	122
5.6.5	<i>Messungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt</i>	123
5.6.6	<i>Zeigerdiagramme – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt</i>	128
6	LITERATURVERZEICHNIS	132
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	133

Abkürzungsverzeichnis

Transformatorblindreaktanz	X_T	Einheit Ohm Ω
Leitungsimpedanz	Z_L	Einheit Ohm Ω
Leiter-Erd-Kapazität	C_E	Einheit Farad F
Petersen-Spule	L_D	Einheit Henry H
Sternpunktterdungswiderstand	R_E	Einheit Ohm Ω
Sternpunktsspannung	\underline{U}_{NE}	Einheit Volt V
Kapazitiver Erdschlussstrom	I_{CE}	Einheit Volt A
Löschspulenstrom	I_L	Einheit Volt A
Kreisfrequenz	ω	Einheit Hertz $1/s$
Leiter-Erde Spannung	U_{LE}	Einheit Volt V
Leiter-Sternpunkt-Spannung	U_{LN}	Einheit Volt V
Wirkanteil der Mitimpedanz	R^1	Einheit Ohm Ω
Blindanteil der Mitimpedanz	X^1	Einheit Ohm Ω
Mitimpedanz	Z^1	Einheit Ohm Ω
Gegenimpedanz	Z^2	Einheit Ohm Ω
Nullimpedanz	Z^0	Einheit Ohm Ω
Koppelimpedanz	Z_{11}	Einheit Ohm Ω
Sternpunktterdungswiderstand	R_{st}	Einheit Ohm Ω
Blindanteil der Selbstreaktanz	X_{11}	Einheit Ohm Ω
Wirkanteil der Selbstreaktanz	R_{11}	Einheit Ohm Ω
Erde / Erdpotential	E	-
Oberspannungsseite	OS	-
Unterspannungsseite	US	-
Überspannungsableiter	ÜA	-
Erdfaktor	k_0	-

1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung und Ziel

In erster Linie wird sowohl der Einphasentransformator als auch der Dreiphasentransformator bei Erdschlüssen spezifiziert und anhand von Versuchen analysiert. In weiterer Folge werden dann, die mit dem Erdschluss verbundenen Folgen auf der Primär- und der Sekundärseite der Transformatoren anhand von fiktiven Beispielen (Variationen mit und ohne Leitungsunterbrechung) untersucht.

1.2 Ergebnisse

Es wird gezeigt, dass bei einem Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite keine Spannungserhöhung, sondern eine Spannungsverminderung und eine Verschiebung der Sternpunkt-Erde-Spannung auftritt. Die bei einem Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite auftretenden Sternpunkt-Erde-Spannungen entsprechen dem 1,5-fachen der Spannungen, die bei einem klassischen Erdschluss auftreten. Beim klassischen Erdschluss entspricht die Sternpunkt-Erde-Spannung der Phasenspannung des Systems. Infolge der fehlerbedingten Spannungserhöhung (Erdschluss mit Leitungsunterbrechung) kann es zu Folgefehlern (eventuelle Auslösung des Überspannungsableiter bei Transformatoren mit Überspannungsableiter geschütztem Sternpunkt) kommen, welche die 3-fache Phasenspannung beim Verbraucher zuzufolge haben können.

1.3 Schlussfolgerungen

Da die bei einem Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgerseite auftretenden Folgefehler sehr kritisch sind, ist eine schnelle Fehlererkennung sowie eine schnelle Fehlerbehebung von großer Bedeutung. Des Weiteren ist anzumerken, dass fatale Folgefehler vermieden werden können, indem der Überspannungsableiter (siehe Abbildung 63 ff.) unter Umständen anders dimensioniert wird. Die Voraussetzung definiert allerdings eine entsprechende Spannungsfestigkeit der Isolation und Sättigungsgrenze allfälliger Petersenspulen.

2 Einleitung

Der Erdschluss spielt im Übertragungsnetz eine große Rolle, da dieser den am zahlreichsten auftretenden Fehler darstellt. Diese unerwünschten Fehler, müssen erkannt und beseitigt werden. Hierfür gibt es mehrere Maßnahmen, deren Grundlage die Ausbreitung des Stromes im Erdreich ist. Wichtig ist nicht nur die Kenntnis über die Stromausbreitung, sondern auch die Folgen des Fehlerstromes. Ausgangspunkt dieser Masterarbeit ist die Auswirkung dieses, in Folge des Erdschlusses auftretenden Fehlerstromes im willkürlich gewählten Zusammenhang mit einer Leitungsunterbrechung auf Transformatoren.

Die Forschungsfrage, die sich hier stellt, ist, welche Auswirkungen der Erdschlussfehlerstrom auf die Transformatoren im Netz hat und was geschieht bei Erdschlüssen im Zusammenhang mit fiktiv gewählten Variationen von Erdschlüssen mit Leitungsunterbrechungen auf der Versorgungsseite oder auf der Verbraucherseite.

Vorerst wird ein Einphasentransformator und sein Verhalten auf Erdschlüsse im Zusammenhang mit einer Leitungsunterbrechung (verbraucher- und versorgungsseitig) untersucht. Mit den bei der Messung ermittelten Messergebnissen erfolgt eine Darstellung der Spannungsdreiecke an den ausgewählten Messpunkten.

Mit den Erkenntnissen aus den Messungen des Einphasentransformators wird in weiterer Folge ein Dreiphasentransformator untersucht und ebenfalls die Spannungsverhältnisse an den ausgewählten Messpunkten bestimmt und abgebildet.

3 Sternpunktbetrachtung bei Erdschlüssen

3.1 Netze mit isoliertem Sternpunkt

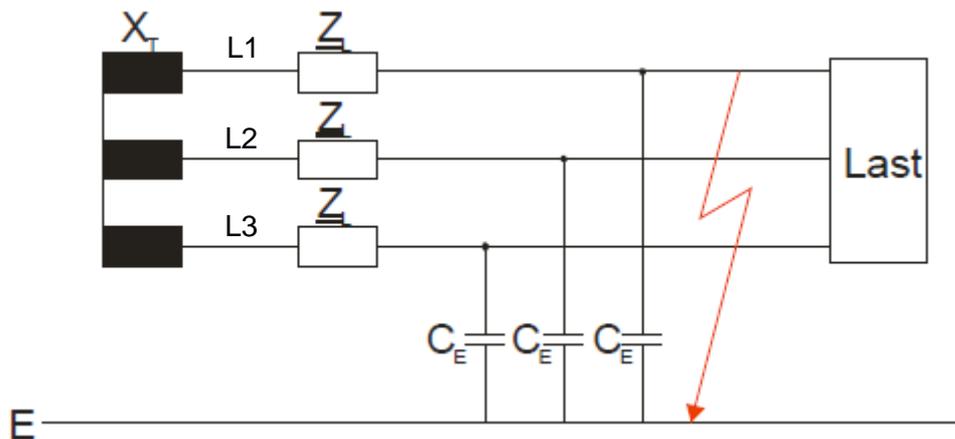


Abbildung 1: Drehstromnetz mit isoliertem Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]

Von Netzen mit isoliertem Sternpunkt spricht man dann, wenn der Sternpunkt mit keinerlei Einrichtung beschaltet wird (Sternpunkt gegenüber Erde isoliert). Abbildung 1 zeigt das Prinzipschaltbild eines isolierten Dreiphasennetzes bei einem Erdschluss. Begrenzt wird der Anwendungsbereich von isolierten Netzen durch den kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} (siehe auch Tabelle 1), dieser wiederum ist anhängig von der Größe der Erdkapazitäten des Netzes. Ausgehend davon, bedeutet dies für eine größere Ausdehnung des Netzes oder der Einsatz von Kabeln ein höherer, resultierender Erdschlussstrom. Bei einem Erdschluss nehmen die nicht vom Fehler betroffenen Leiter die Außenleiterspannung ($\sqrt{3}$ -fache Spannung) an. Dadurch kann es leicht zu Doppel- und Mehrfacherdschlüssen kommen. [1]

Verwendung

- bei Mittelspannungsfreileitungsnetzen geringer Ausdehnung
- bei kleinen Kabelnetzen (z.B. Industrienetze)

[1]

Vorteile

- einfache Ausführung
- geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen
- fallweise keine Versorgungsunterbrechung bei Einfachfehlern

[1]

Nachteile

- Netzausdehnung durch den kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} begrenzt
- erhöhte Überspannungsbeanspruchung
- Dauererdschlüsse und damit die Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
- intermittierende Erdschlüsse sind möglich
- keine sichere selektive Erdschlusserfassung

[1]

3.1.1 Erdschluss im isolierten Netz

Bei diesem Fehler handelt es sich um einen Erdschluss (L1 ist mit Erde verbunden). An der Fehlerstelle fließt der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} . Die Spannungen der Außenleiter L2 und L3 werden auf das $\sqrt{3}$ -fachen angehoben (siehe Abbildung 2). [1]

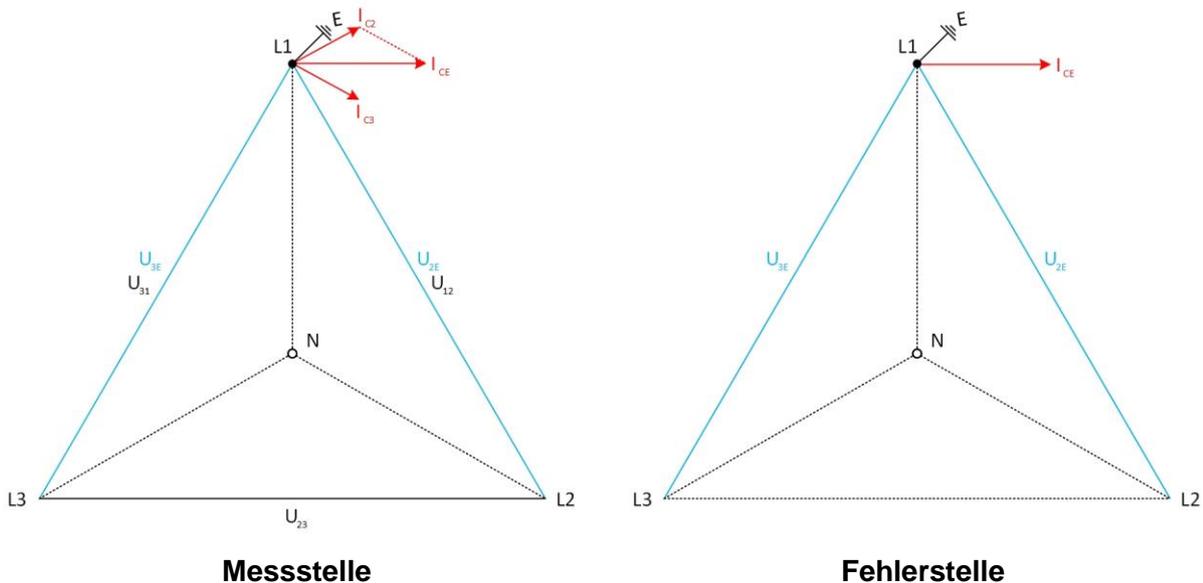


Abbildung 2: Erdschluss im isolierten Netz (L1-E) [1]

An der Messstelle sind die kapazitiven Ströme I_{C2} und I_{C3} um ca. 90 Grad gegenüber U_{12} bzw. U_{31} phasenverschoben.

3.1.1 Zweipoliger Erdschluss im isolierten Netz

Bei diesem Fehler sind L2 und L3 mit Erde verbunden. Die Spannung des Außenleiters L1 nimmt den 1,5-fachen Wert der Spannung an (siehe Abbildung 3). An der Fehlerstelle sind die Spannungen von L2 und L3 gleich Null. [1]

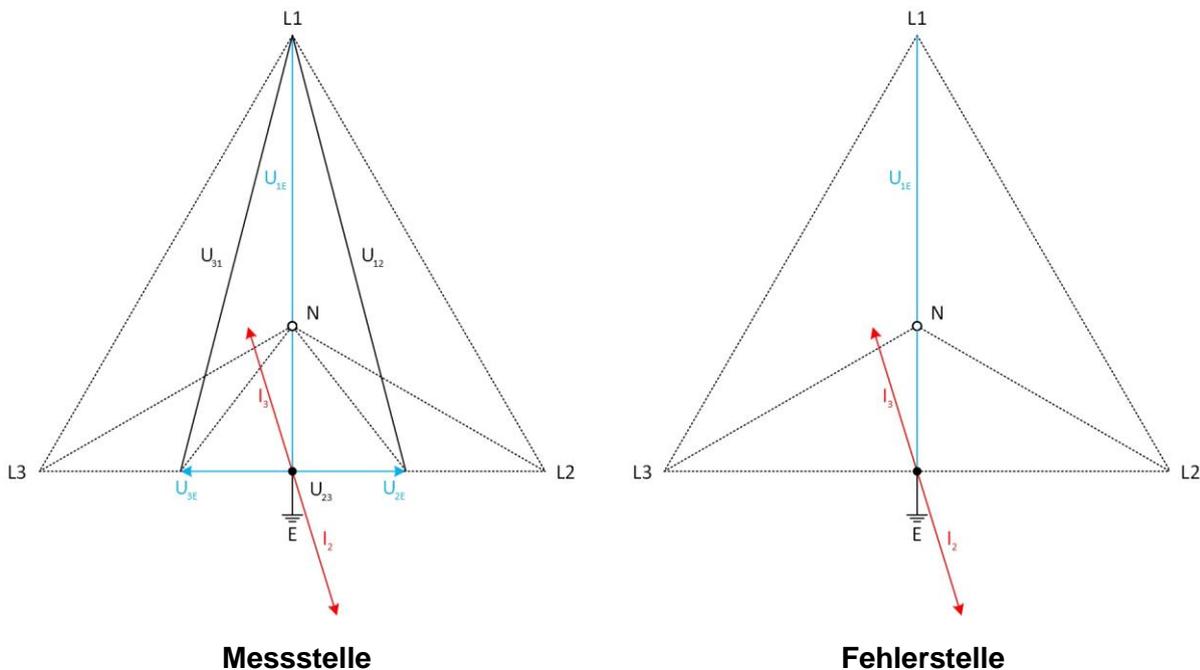


Abbildung 3: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im isolierten Netz (L2-L3-E) [1]

Die Ströme von L2 und L3 sind gleich groß, aber entgegengesetzt (siehe Abbildung 3).

3.2 Gelöschtes Netz (kompensiertes Netz)

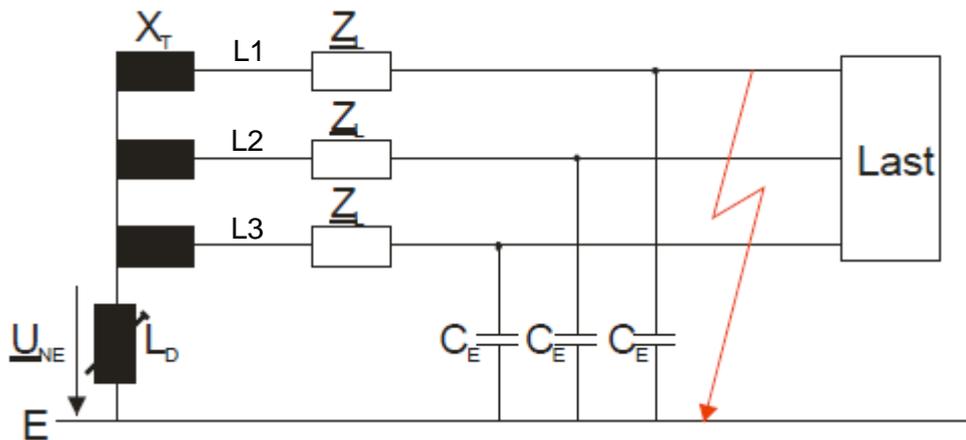


Abbildung 4: Drehstromnetz mit Erdlöschung – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]

Spricht man von einem gelöschten Netz, so sind in diesem Netz mindestens ein oder mehrere Sternpunkte der sich im Netz befindlichen Transformatoren an einer Petersen-Spule (Erdschlusslöschspule) angeschlossen sind. Abbildung 4 zeigt das Prinzipschaltbild eines gelöschten Dreiphasennetzes bei einem Erdschluss. [1]

Der durch die Leitungskapazitäten fließende Fehlerstrom I_{CE} wird durch die Löschspule bzw. durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert. Eine vollständige Kompensation ist allerdings nicht möglich, da aufgrund von ohmschen Verlusten und Oberschwingungen ein nicht kompensierbarer Reststrom übrigbleibt. Dieser Reststrom ist von der Größe des Netzes abhängig und begrenzt somit auch die Netzausdehnung. Die Löschgrenze beträgt bei Mittelspannungsnetzen (bis ca. 30 kV) 60 A und bei Hochspannungsnetzen (110 kV) 132 A. Bei einem Erdschluss kann das Netz weiterbetrieben werden, jedoch nehmen die nicht vom Fehler betroffenen Leiter die Außenleiterspannung ($\sqrt{3}$ -fache Spannung) an. Es treten die selben Spannungsverhältnisse wie beim isoliertem Netz auf. [1]

Verwendung

- bei Mittel- und Hochspannungsnetzen (10 kV bis 110 kV) größerer Ausdehnung

[1]

Vorteile

- Erhöhung der Versorgungssicherheit, da trotz eines Erdschlusses das Netz vorübergehend weiter betrieben werden kann
- die wiederkehrende Spannung steigt deutlich langsamer (gegenüber isoliertem Netz)
- kleine Erdschlussrestströme
- geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen
- meist selbstlöschende Erdschlüsse (mit 80 prozentiger Wahrscheinlichkeit in Freileitungsnetzen)
- geringe Abschaltungszahlen

[1]

Nachteile

- Netzausdehnung wie bei isoliertem Netz durch den kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} begrenzt
- erhöhte Überspannungsbeanspruchung der fehlerfreien Außenleiter
- intermittierende Erdschlüsse sind möglich
- auftreten von Dauererdschlüssen und damit die Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
- Höherer Isolations- und Regelaufwand gegenüber isolierten Sternpunktnetzen

[1]

3.2.1 Erdschluss im gelöschten Netz

Bei diesem Fehler handelt es sich um einen Erdschluss (L1 ist mit Erde verbunden). Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} und der induktive Löschstrom I_L heben sich an der Fehlerstelle idealerweise auf (übrig bleibt der Reststrom). Entfernt man sich von der Fehlerstelle so kommen zusätzlich noch die kapazitiven Ströme der beiden anderen Leiter hinzu (siehe Abbildung 5 an der Messstelle). Die Spannungen der Außenleiter L2 und L3 werden auf das $\sqrt{3}$ -fache angehoben. [1]

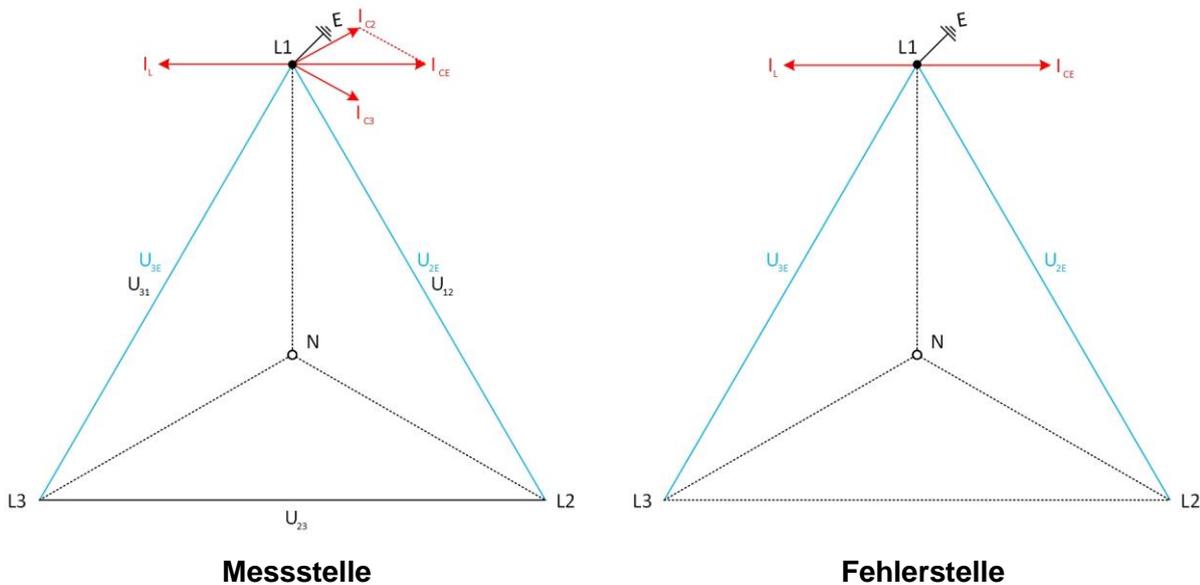


Abbildung 5: Erdschluss im gelöschten Netz (L1-E) [1]

An der Messstelle sind die kapazitiven Ströme I_{C2} und I_{C3} um ca. 90 Grad gegenüber U_{12} bzw. U_{31} phasenverschoben.

3.2.2 Zweipoliger Erdschluss im gelöschten Netz

Bei diesem Fehler sind L2 und L3 mit Erde verbunden. Die Spannung der Phase L1 nimmt den 1,5-fachen Wert der Spannung an. An der Fehlerstelle betragen die Spannungen der Außenleiter L2 und L3 Null Volt. [1]

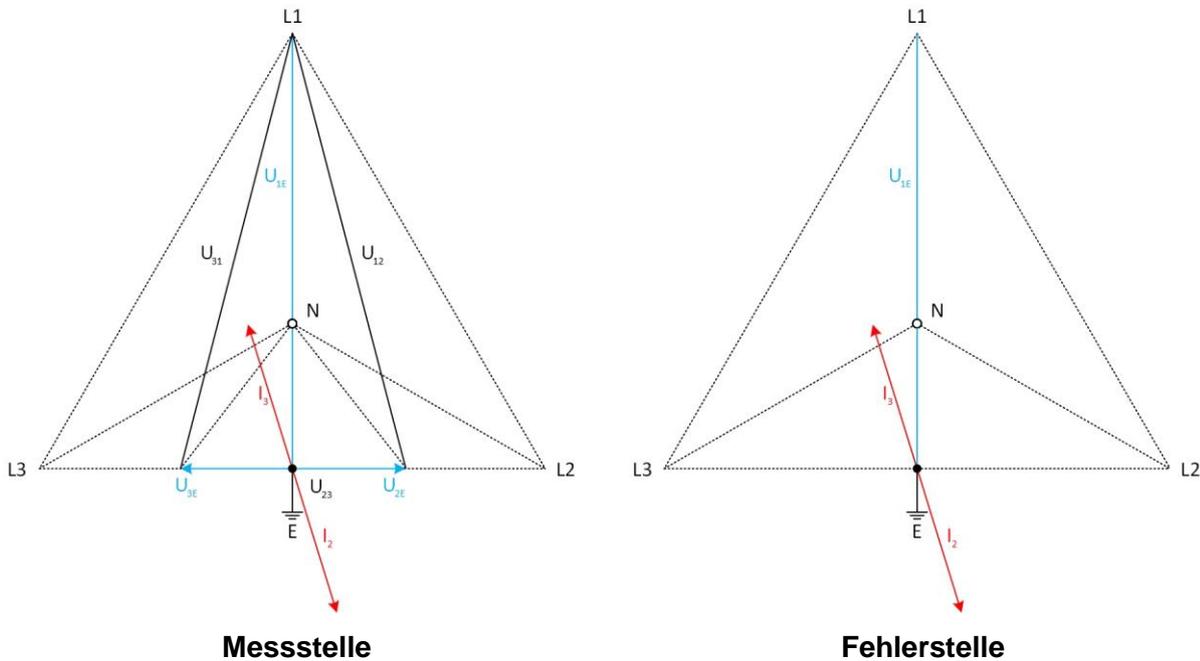


Abbildung 6: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im gelöschten Netz (L2-L3-E) [1]

Die Ströme von L2 und L3 sind gleich groß, aber entgegengesetzt (siehe Abbildung 6).

3.3 Netze mit starr geerdeten Sternpunkt

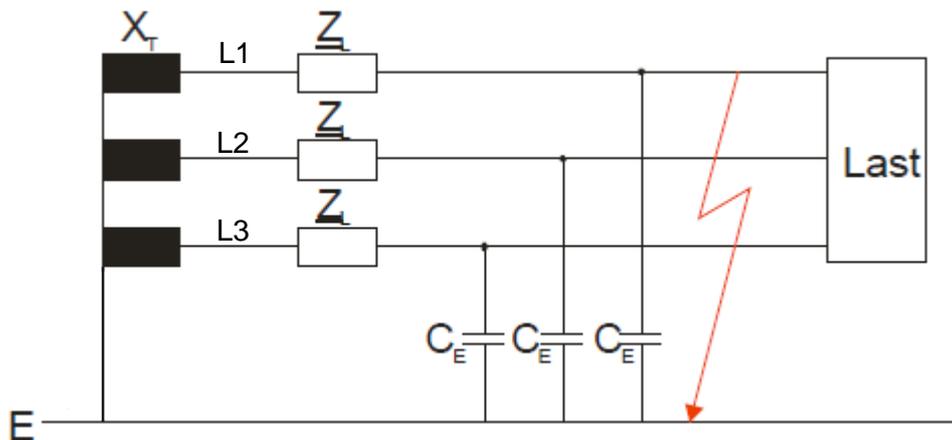


Abbildung 7: Drehstromnetz mit starr geerdeten Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]

In diesem Fall wird der Transformatorsternpunkt von mindestens einem Transformator starr (direkt) geerdet. Der Netzschutz ist dahingehend gegeben, dass es bei einem Erdschluss zu einer selbstständigen Abschaltung kommt. Der Fehlerstrom ruft am Erdungswiderstand einen Spannungsabfall hervor, der eine Sternpunktverlagerung zufolge hat. Somit kommt es zu einer erhöhten Isolationsbeanspruchung der Isolatoren (jedoch etwas geringer als bei gelöschten oder isolierten Netzen). Bei einem Erdschluss kommt es zu einer geringeren Spannungsanhebung der nicht vom Fehler betroffenen Leiter verglichen mit einem isolierten oder gelöschten Netz. Die Fehlerströme weisen hohe Amplituden, bezogen auf die Leitungsnennströme auf. Deswegen müssen die Schutzeinrichtungen schnellstmöglich eingreifen. [1]

Verwendung

- bei Niederspannungsnetzen (0,4 kV)
- bei Hoch- und Höchstspannungsnetzen (110 kV bis 750 kV) größerer Ausdehnung

[1]

Vorteile

- nahezu uneingeschränkte Netzausdehnung möglich
- einfache selektiver Erfassung des Erdschlusses durch die klare Erkennung des Fehlerortes über die entsprechende Schutzeinrichtung
- einfache Ausführung
- geringe Isolationsbeanspruchung bei einem Erdschluss

[1]

Nachteile

- enorme Anforderungen an die Erdungsanlagen
- keine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung möglich (Abschaltungsdauer ca. 0,01 ... 1 s)
- hohe Fehlerstromamplituden

[1]

3.3.1 Erdschluss im starr geerdeten Netz

Bei diesem Fehler handelt es sich um einen Erdschluss (L1 ist mit Erde verbunden). Der volle Fehlerstrom fließt über Erde ab. Die Spannung der betroffenen Phase wird Null, die Spannungen der Außenleiter L2 und L3 bleiben erhalten (siehe Abbildung 8). [1]

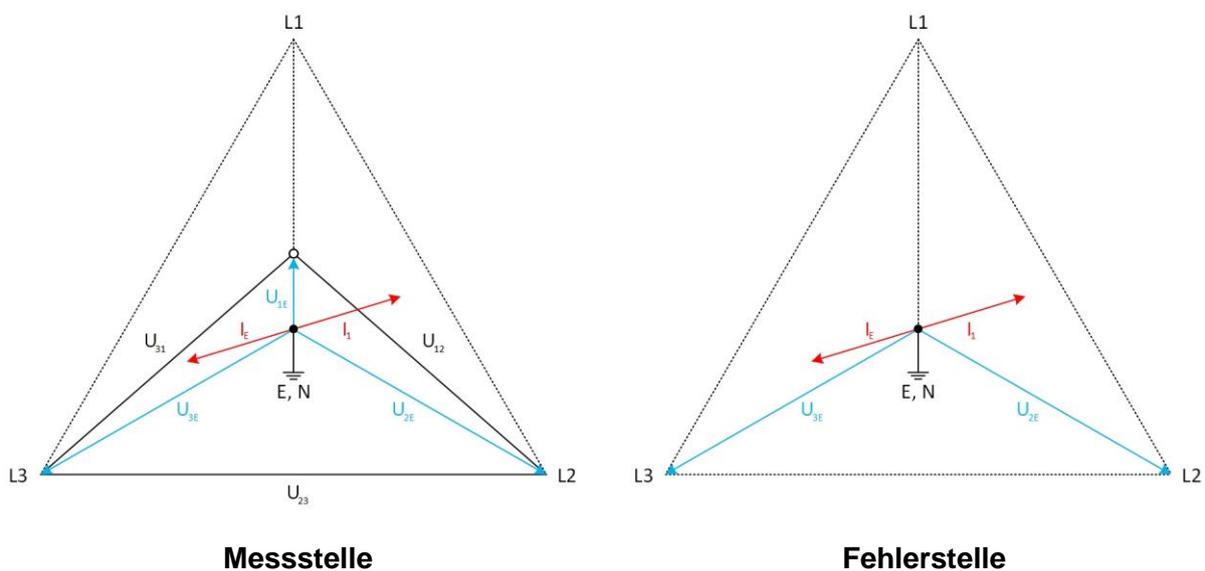


Abbildung 8: Erdschluss im starr geerdeten Netz (L1-E) [1]

Wie aus der Abbildung ersichtlich, weisen der Erdfehlerstrom I_E und der Strom des mit Erde verbundenen Außenleiters I_1 denselben Betrag mit unterschiedlichen Vorzeichen auf.

3.3.2 Zweipoliger Erdschluss im starr geerdeten Netz

Bei diesem Fehler sind L2 und L3 mit Erde verbunden. Die Spannung des Außenleiters L1 bleibt erhalten. An der Fehlerstelle sind die Spannungen von L2 und L3 gleich Null, die Fehlerströme setzen sich aus den Leiterströmen der Außenleiter L2 und L3 und einem kleinen Anteil des Erdstromes zusammen (siehe Abbildung 9). [1]

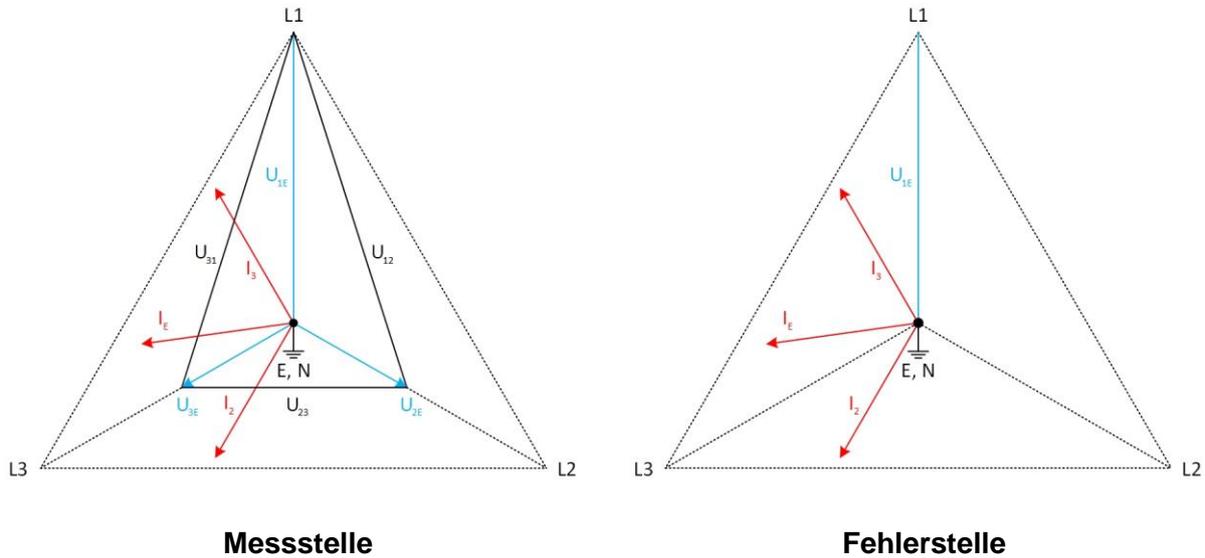


Abbildung 9: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im niederohmig geerdeten Netz (L2-L3-E) [1]

Wie aus der Abbildung ersichtlich, sind die beiden Ströme I_2 und I_3 um ca. 90 Grad gegenüber den Phasenspannungen phasenverschoben.

3.4 Netze mit niederohmig geerdeten Sternpunkt

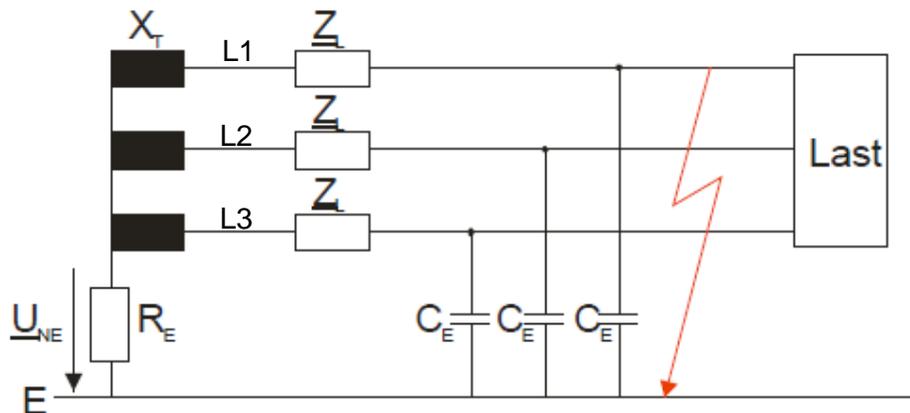


Abbildung 10: Drehstromnetz mit niederohmig geerdeten Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]

Bei dieser Netzausführung wird der Transformatorsternpunkt von mindestens einem Transformator über Erdungswiderstände R_E (niederohmige Erdung – R_E ist einige 10Ω bis ca. 60Ω , beim starr geerdeten Netz ist R_E gleich 0Ω) geerdet. Der Netzschutz und ist dahingehend gegeben, dass es bei einem Erdschluss zu einer selbstständigen Abschaltung kommt. Der Fehlerstrom ruft am Erdungswiderstand einen Spannungsabfall hervor, der eine Sternpunktsverlagerung zufolge hat. Somit kommt es zu einer erhöhten Isolationsbeanspruchung der Isolatoren (jedoch etwas geringer als bei gelöschten oder isolierten Netzen). Bei einem Erdschluss kommt es zu einer geringeren Spannungsanhebung der nicht vom Fehler betroffenen Leiter verglichen mit einem isolierten oder gelöschten Netz. Die Fehlerströme weisen hohe Amplituden, bezogen auf die Leitungsnennströme auf. Deswegen müssen die Schutzeinrichtungen schnellstmöglich eingreifen. [1]

Die Darstellung des Mit-, Gegen- und Nullsystems zeigt lässt auf das Spannungsdreieck in Abbildung 12 rückschließen.

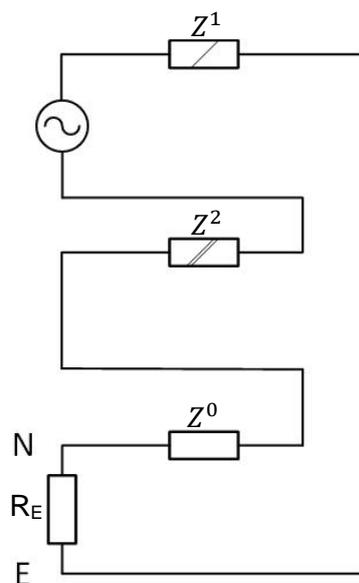


Abbildung 11: Mit-, Gegen- und Nullsystem

Verwendung

- bei Niederspannungsnetzen (0,4 kV)
- bei Hoch- und Höchstspannungsnetzen (110 kV bis 750 kV) größerer Ausdehnung

[1]

Vorteile

- nahezu uneingeschränkte Netzausdehnung möglich
- einfache selektiver Erfassung des Erdschlusses durch die klare Erkennung des Fehlerortes über die entsprechende Schutzeinrichtung
- einfache Ausführung
- geringe Isolationsbeanspruchung bei einem Erdschluss

[1]

Nachteile

- erhöhte Anforderungen an die Erdungsanlagen
- keine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung möglich (Abschaltungsdauer ca. 0,01 ... 1 s)
- hohe Fehlerstromamplituden

[1]

3.4.1 Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz

Bei diesem Fehler handelt es sich um einen Erdschluss (L1 ist mit Erde verbunden). Der volle Fehlerstrom fließt über Erde ab. Die Spannung des betroffenen Außenleiters wird Null, die Spannungen der Außenleiter L2 und L3 bleiben erhalten (siehe Abbildung 12). [1]

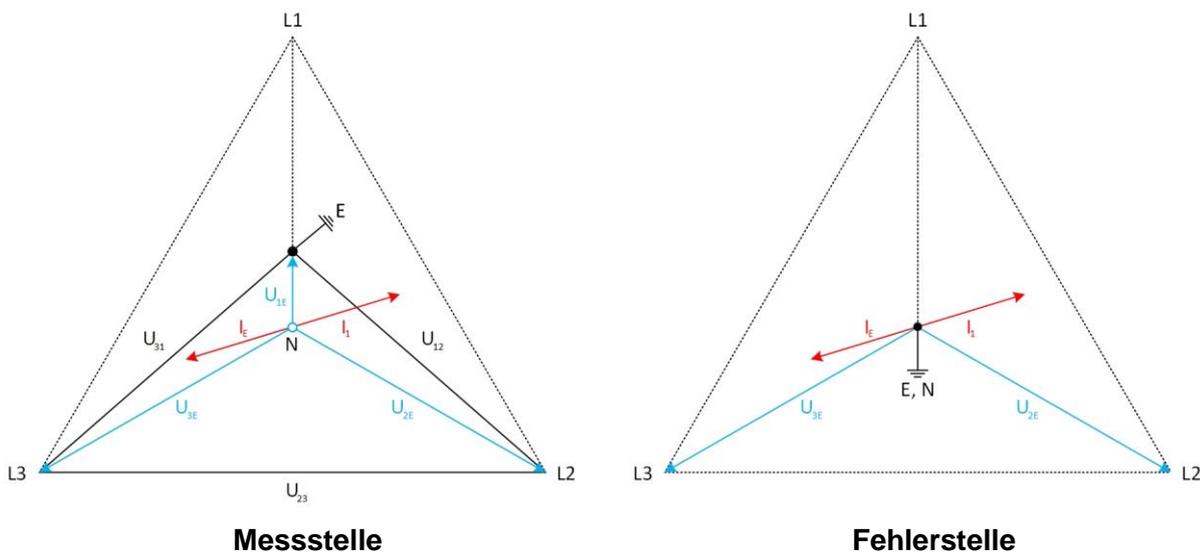


Abbildung 12: Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz (L1-E) [1]

Wie aus der Abbildung ersichtlich, weisen der Erdfehlerstrom I_E und der Strom des mit Erde verbundenen Außenleiters I_1 denselben Betrag mit unterschiedlichen Vorzeichen auf.

3.4.2 Zweipoliger Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz

Bei diesem Fehler sind L2 und L3 mit Erde verbunden. Die Spannung des Außenleiters L1 bleibt erhalten. An der Fehlerstelle sind die Spannungen von L2 und L3 gleich Null, die Fehlerströme setzen sich aus den Leiterströmen der Außenleiter L2 und L3 und einem kleinen Anteil des Erdstromes zusammen (siehe Abbildung 13). [1]

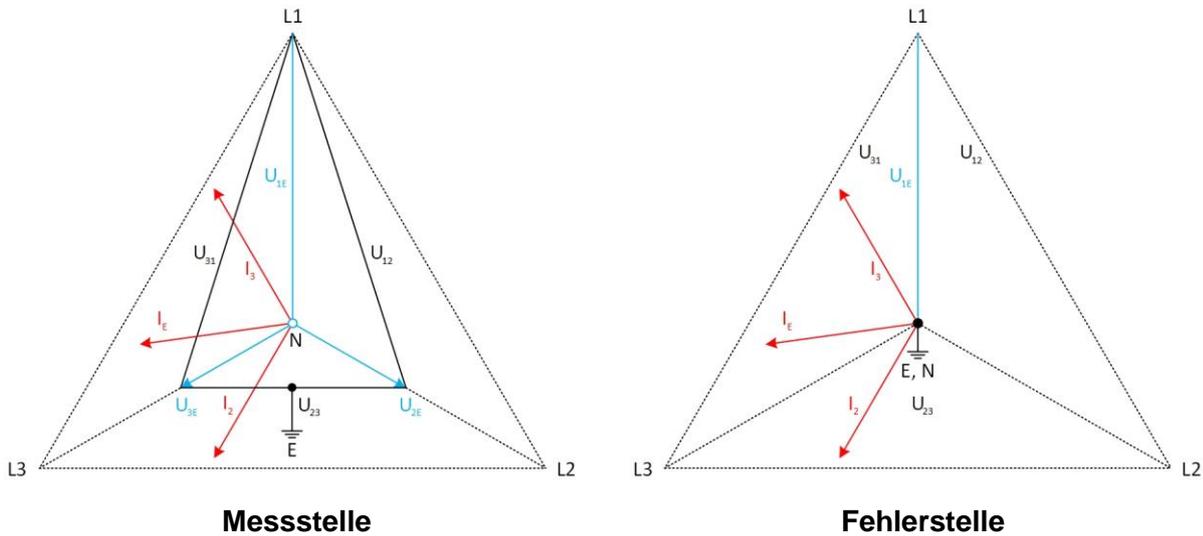


Abbildung 13: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im niederohmig geerdeten Netz (L2-L3-E) [1]

Wie aus der Abbildung ersichtlich, sind die beiden Ströme I_2 und I_3 um ca. 90 Grad gegenüber den Phasenspannungen phasenverschoben.

3.4.1 Beispiel eines niederohmig geerdetes Netz

Hier wird ein Netz mit niederohmig geerdeten Sternpunkt und das zugehörige Mit-, Gegen- und Nullsystem dargestellt.

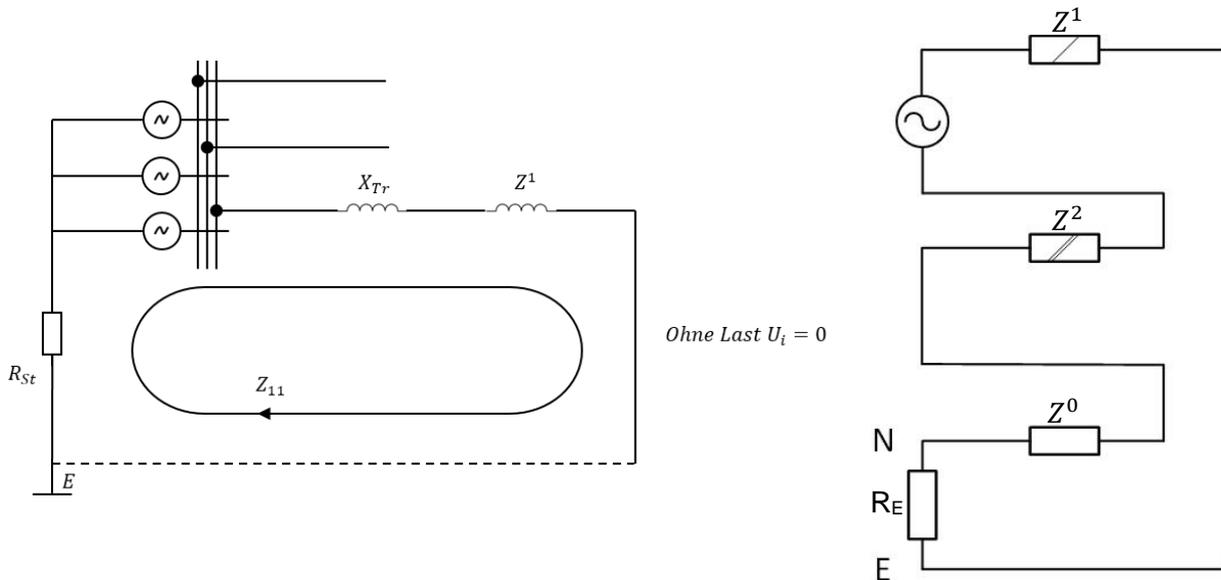


Abbildung 14: Niederohmig geerdetes Netz und zugehöriges Mit-, Gegen- und Nullsystem

Dargestellt wird das Netz ohne Last und mit zwei leerlaufenden Außenleiter. Z^1 ist die Mitimpedanz des Netzes und Z_{11} ist die Koppelimpedanz.

Vereinfacht man Abbildung 14 so kommt man zu Abbildung 15.

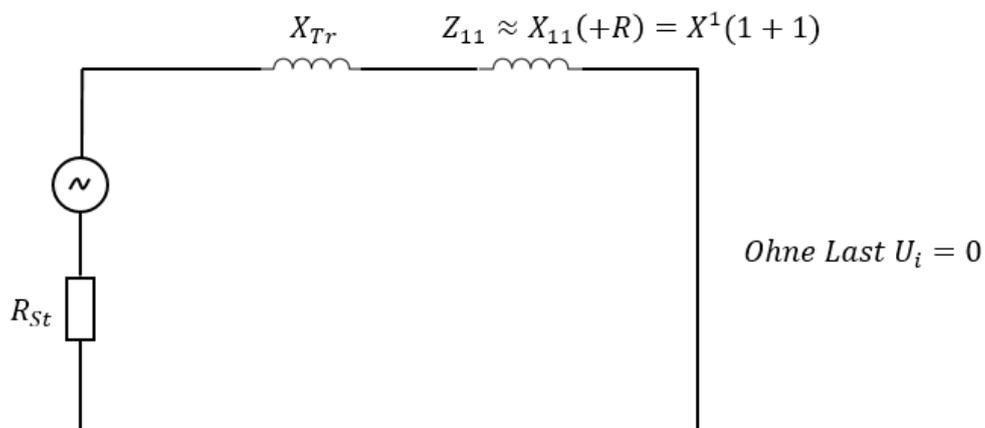


Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung des niederohmig geerdeten Netzes

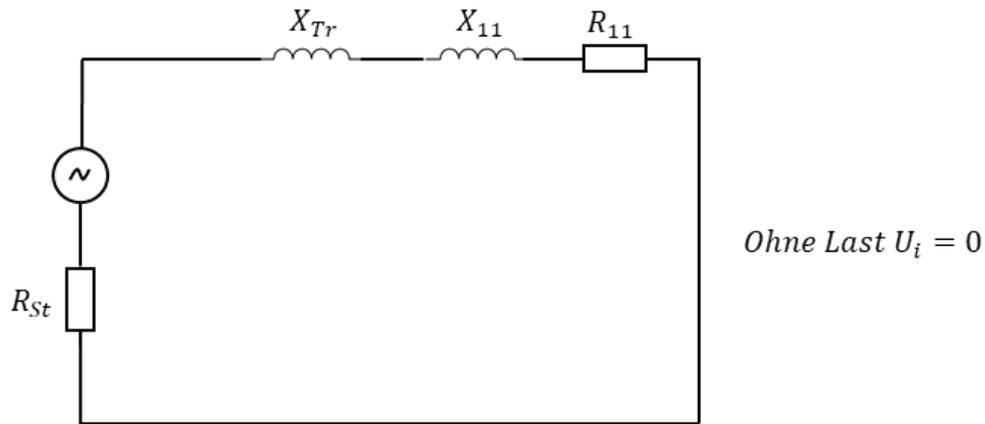


Abbildung 16: Aufteilung von Z_{11} in X_{11} und R_{11}

In den vorherigen zwei Abbildungen sieht man die Vereinfachung von Abbildung 14. Die Transformatorblindreaktanz X_{Tr} ist die Blindreaktanz des Transformators während X_{11} der Blindanteil der Selbstreaktanz wiedergibt. R_{11} ist der Wirkanteil der Selbstreaktanz und R_{St} ist der Sternpunktwidestand dieses Netzes.

$$Z_{11} = Z^1(1 + k_0)$$

Formel 3-1

$$k_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{Z^0}{Z^1} - 1 \right)$$

Formel 3-2

$$U_{Rst} = \frac{R_{St}}{R_{St} + jX_{Tr} + jX_{11} + R_{11}}$$

$$\hookrightarrow \text{bei } k_0 := 1 \angle 0^\circ = \frac{R_{St}}{R_{St} + jX_{Tr} + jX^1(1 + 1) + R^1}$$

Formel 3-3

Bemerkung: Der k_0 -Faktor gibt das Verhältnis zwischen der Leiterimpedanz (Leiter-Leiter-Schleife) und der Erdimpedanz (3-Leiter-Erde-Schleife) an. [2]

Anhand eines Beispiels mit üblichen Werten wird die Sternpunktspannung für ein 20-kV-Mittelspannungsnetz berechnet.

Bei einem Transformator mit einem u_k von 15 % und einer Transformatornennleistung von 25 MVA ergibt sich eine Transformatorreaktanz von:

$$X_{Tr} = \frac{0,015 \cdot 400 \text{ V}^2}{25 \text{ MVA}} = 2,4 \Omega$$

Formel 3–4

Bei einer Leitungslänge von 10 km ergibt sich X_{11} bei einem Wert von 0,35 Ω pro km:

$$X_{11} = 0,35 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 10 \text{ km} = 3,5 \Omega$$

Formel 3–5

Daraus lässt sich der Widerstand R_{11} aus dem Widerstandsdreieck, bei einem angenommenen Winkel (erfahrungsgemäß) von 80° wie folgt berechnen:

$$R_{11} = \frac{X_{11}}{\sin 80^\circ} \cdot \cos 80^\circ = \frac{3,5 \Omega}{\sin 80^\circ} \cdot \cos 80^\circ = 0,617 \Omega$$

Formel 3–6

Bei einer Leitungslänge von 10 km ergibt sich für die Spannung U_{Rst} laut Formel 3-3:

$$U_{Rst} = \left| \frac{10 \Omega}{10 \Omega + j2,4 \Omega + j3,5 \Omega + 0,617 \Omega} \right| = 0,82 = 82 \%$$

Formel 3–7

Folglich ergibt sich für den Strom I bei einem 20 kV Mittelspannungsnetz:

$$I = \frac{U_{Rst} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}}}{R_{St}} = \frac{0,82 \cdot \frac{20000 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{10 \Omega} = 952 \text{ A}$$

Formel 3–8

Eine Darstellung der Werte für die Sternpunktspannung U_{Rst} beim Sternpunktwiderstand R_{St} für unterschiedliche Sternpunktwiderstandswerte und Längen ergibt folgendes Balkendiagramm:

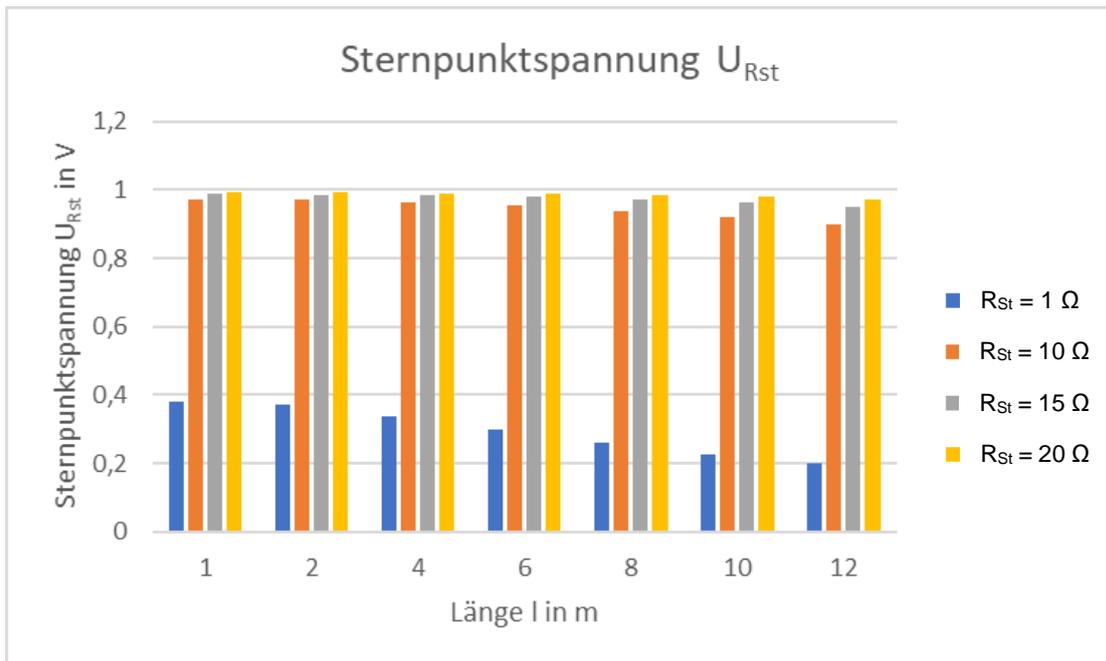


Abbildung 17: Sternpunktspannung U_{Rst} in Abhängigkeit von der Länge l

Man erkennt, dass die Sternpunktspannung mit steigender Entfernung abnimmt.

3.5 Sternpunktschaltung in einigen Ländern der Welt

Die Sternpunktbehandlung ist sehr wichtig für die Netzstabilisation. Deswegen werden Transformatoren weltweit (teilweise – direkt oder indirekt) geerdet. Nachfolgend ist eine Tabelle über die Verbreitung der Sternpunktbehandlung abgebildet.

Tabelle 1: Auszugsweise Übersicht über die Verbreitung der Sternpunktschaltungen [1]

ab 220 kV und höher	weltweit starr geerdet			
Österreich	110 kV und Mittelspannung gelöscht			
Norwegen	110 kV und Mittelspannung gelöscht			
Schweden	110 kV geerdet Mittelspannung gelöscht und Kurzerdung			
Nachfolgestaaten von Jugoslawien	Mittelspannung isoliert oder über Widerstand geerdet			
Australien	132 kV geerdet Mittelspannung über Widerstand geerdet			
Großbritannien	132 kV geerdet Mittelspannung über Widerstand geerdet bei 33 kV mit 15 Ohm geerdet			
Frankreich	150 kV und 63 kV geerdet Mittelspannung über Widerstand geerdet			
Deutschland	110 kV vorwiegend gelöscht; teilweise geerdet			
	Systemkilometer in Mittelspannungsnetzen:			
	110 kV	20 kV	30 kV	gesamt
isoliert.....	26 186	506	3 011	29 703
gelöscht.....	60 079	134 414	9 323	203 816
direkt oder über Widerstand geerdet.....	1 223	–	–	1 223
kurzzeitig geerdet.....	6 010	496	–	6 506
	davon werden betrieben als:			
Strahlennetz.....	81 56	51 653	3 011	136 170
Ringnetz einseitig.....	8 773	47 629	9 323	65 725
Ringnetz mehrseitig.....	2 219	36 134	–	38 353

In der abgebildeten Tabelle wird die Sternpunktbehandlung einiger Länder dargestellt. [1]

4 Untersuchung einer Netzbelastung mittels 1-Phasen- Transformator zwischen 2 Außenleitern

4.1 Grundlegende Überlegung und Aufgabenstellung

Ausgehend vom einen Dreiphasennetz mit einem Yy0 Transformator gilt folgende Überlegung:

Lässt man beim Dreiphasennetz den Außenleiter eines Verbrauchers weg, so fließt auf diesem Zweig kein Strom. Da kein Strom fließt, wird auf dem betroffenen Schenkel des Transformators keine Spannung induziert, da sich die Magnetfelder der bestromten Spulen (L_1 und L_2) gegenseitig aufheben und somit kein Magnetfluss in Spule L_3 ($\phi_3 = 0$) vorhanden ist. Somit gilt der in Abbildung 23 dargestellte Fall, des Einphasentransformators.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden wie folgt unterteilt:

4.4 Gesundes Netz

4.5 Stehender Erdschluss (regulär)

4.6 Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

4.7 Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

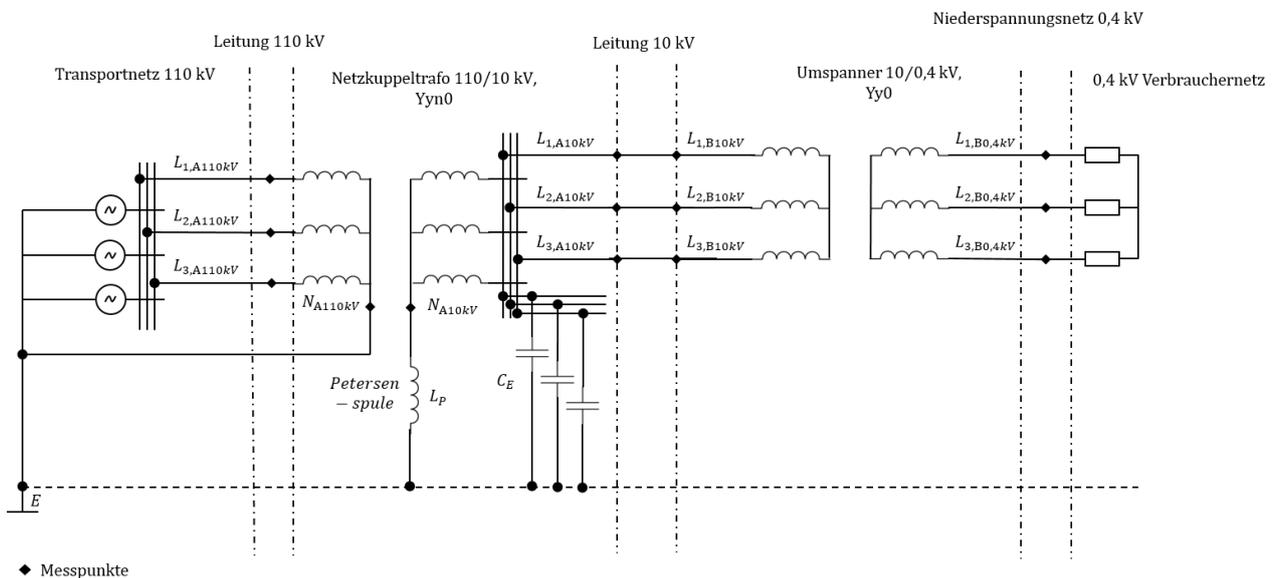
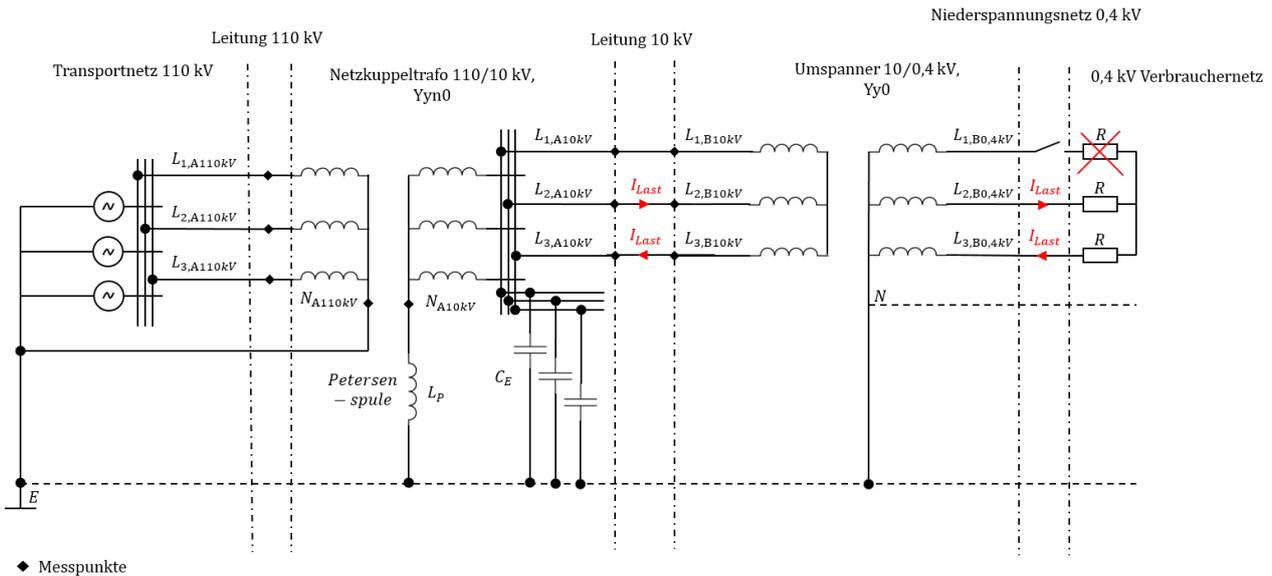


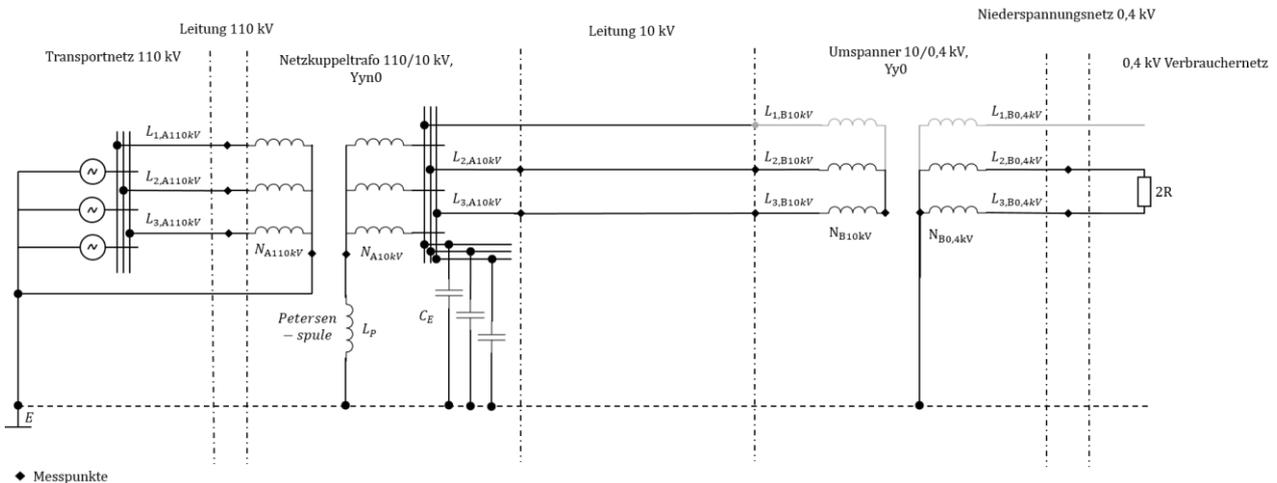
Abbildung 18: Dreiphasennetz mit einem Yy0 Transformator (Umspanner)



◆ Messpunkte

Abbildung 19: Dreiphasennetz mit einem Yy0 Transformator (Umspanner) – eine Phase ohne Verbraucher:
 $I_{L1} = 0$

Durch den Wegfall der Last bei Phase L1, wird dieser Pfad nicht mehr vom Strom durchflossen. Demgemäß ist die in Abbildung 20 dargestellte Netzform zulässig.



◆ Messpunkte

Abbildung 20: Umgewandelter Dreiphasentransformator in einen Einphasentransformator

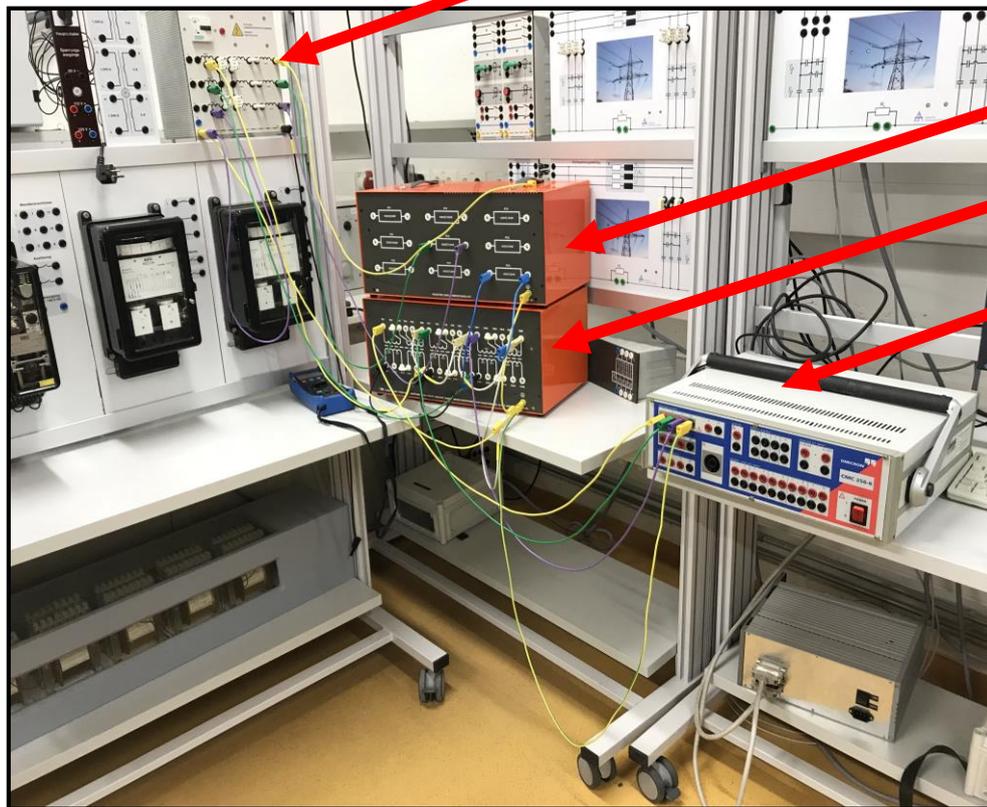
Das 1-Phasen-Netzmodell besteht aus dem Transportnetz, einem Netzkuppltransformator und einem 10/0,4kV-Umspanner. Das starr geredete Transportnetz speist den Netzkuppltransformator über eine 110-kV-Hochspannungsleitung. Der Sternpunkt des Netzkuppltransformators ist über eine Petersenspule geerdet und versorgt den 10/0,4kV-Umspanner über eine 10-kV-Leitung. Der 10/0,4kV-Umspanner versorgt die 1-phasige Last und der Sternpunkt des Transformators ist nicht ausgeführt.

Für alle weiteren Schaltungen in diesem Kapitel wird das Verbrauchernetz nicht mehr mit 2R gekennzeichnet und sekundärseitig wird der Sternpunkt des 10/0,4kV-Transformators nicht geerdet.

4.2 Messaufbau

Im Labor des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz wird eine solche Störung anhand des Netzmodelles nachgebildet (siehe Abbildung 21 bzw. Abbildung 22).

Trafo 2:
10/0,4 kV bzw. 230/230 kV



Last:
0,4-kV-

Trafo 1:
110/10 kV bzw.
400/400 kV

Quelle:
CMC 256-

Abbildung 21: Laboraufbau (Gesamtansicht)

Hier wird das das Netzmodell dargestellt. Ganz rechts im Bild wird die Quelle die den Transformator 1 (Netzkuppltransformator) mit einer Spannung von 100 V (verkettet) speist dargestellt. Dieser, mit der Schaltgruppe Yyn0, Transformator wird primärseitig (Oberspannungsseite) in Stern geschaltet und direkt mit Erde verbunden. Die Sekundärseite (Unterspannungsseite) wird ebenfalls in Stern geschaltet und über einen 1,5 k Ω Widerstand mit Erde verbunden. Unterspannungsseitig wird der Netzkuppltransformator über Messstrippen (entspricht der 10-kV-Leitung laut Messschaltung) mit dem Transformator 2 (Umspanner), welcher die Schaltgruppe Yy0 hat, verbunden. Bei diesem Transformator wird der Sternpunkt nicht ausgeführt. Der 10/0,4kV-Umspanner wird mit einer einphasigen Last (ein 680 Ω Widerstand bzw. ein 3000 Ω Widerstand) belastet.

Zwischen Trafo 1, US und Trafo 2, OS (also bei der 10-kV-Leitung – Strippen) werden die verschiedenen Fehlerfälle „eingebaut“ und alle Messungen werden an den gekennzeichneten Messpunkten durchgeführt.

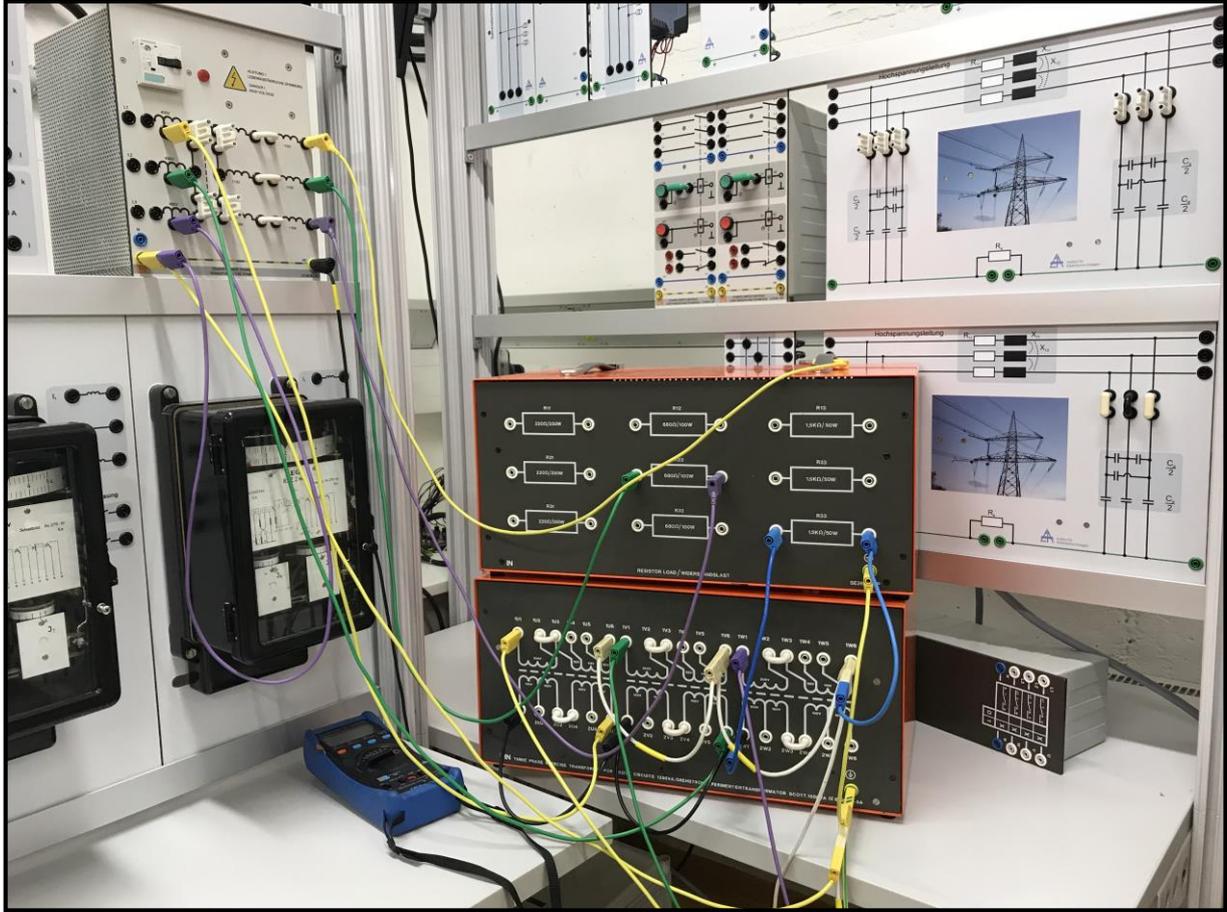


Abbildung 22: Laboraufbau (Detailansicht)

Als Quelle dient ein Prüfgerät der Fa. Omicron, das praktisch unabhängig von der Belastung eine konstante dreiphasige Spannung einspeist.

Bemerkung: Die Abbildungen entsprechen Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler.

4.3 Maßstabsfragen

Beim Netzmodell wird die Spannungen so gewählt, dass die Nennspannung (110 kV bzw. 10 kV) als 100 Volt/Modell wiedergegeben werden. Die Außenleiter-Nennspannung beträgt demnach 57,7 V – entspricht 100 V verkettet.

4.4 Gesundes Netz

Beim gesunden Netz handelt es sich um das fehlerfreie Netz.

4.4.1 Überblick – Gesundes Netz

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{Ks} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschpulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwiderstand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

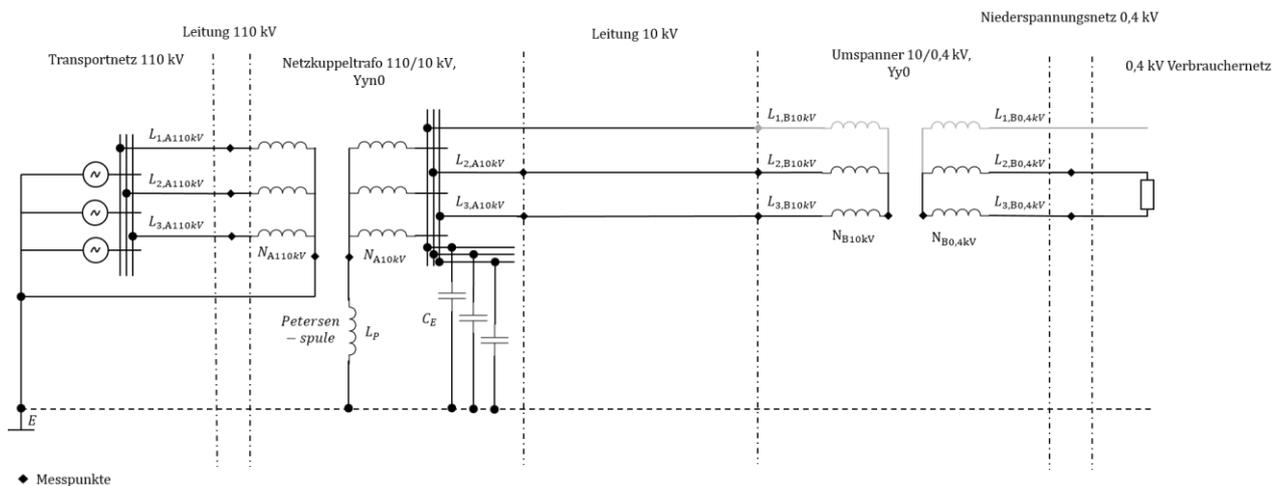


Abbildung 23: Netzsituation – Gesundes Netz

Hier handelt es sich um das gesunde (fehlerfreie) Netz. Die Last (Widerstand mit 680 Ω) wird über einen 1-Phasen-Transformator (Umspanner – Trafo 2) versorgt.

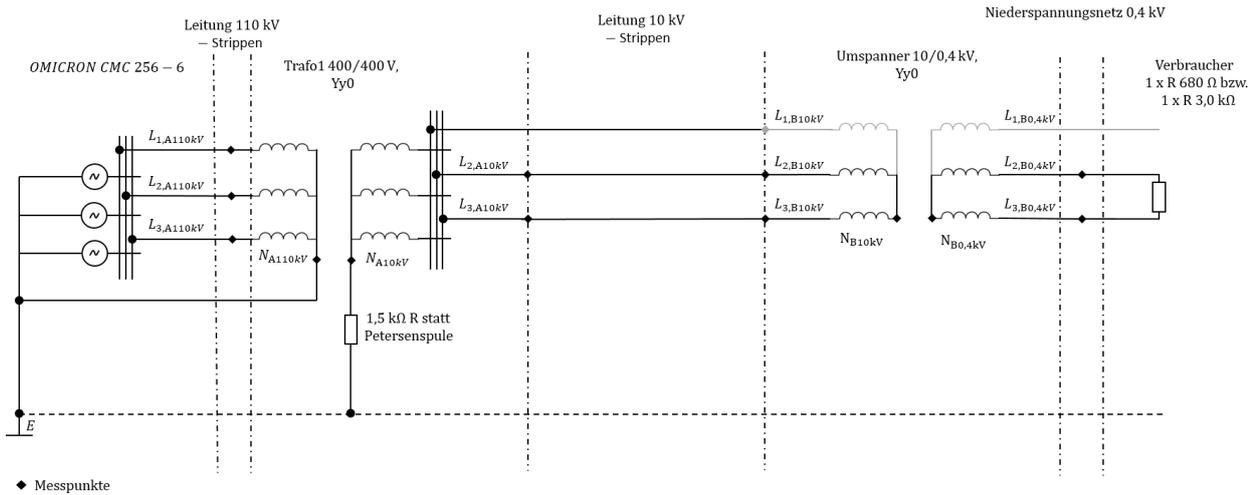


Abbildung 24: Laboruntersuchung – Gesundes Netz

Abbildung 24 zeigt den im Labor umgesetzten Aufbau des fehlerfreien Netzes. Die Last (ein $680\ \Omega$ Widerstand) wird über den 1-Phasen-Transformator versorgt. Die Strom- und Spannungsmessungen werden an den markierten Messpunkten vorgenommen.

4.4.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz

Sowohl das messtechnisch als auch das theoretisch hergeleitete Spannungsdreieck sehen wie folgt aus:

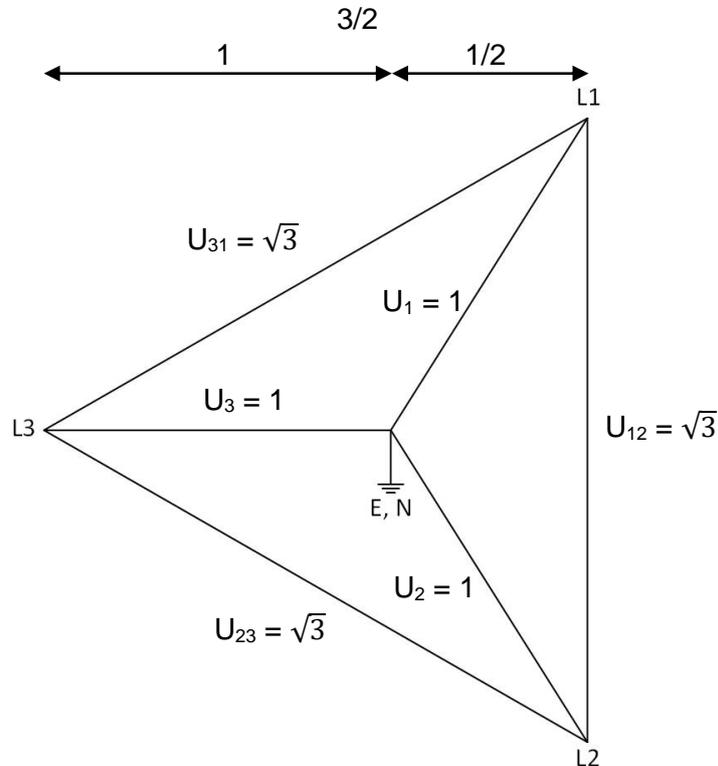


Abbildung 25: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck des gesunden Netzes, Theorie und Laboruntersuchung (Praxis)

Als verkettete Spannung (zwischen L1-L2, L2-L3 und L3-L1) wird eine Spannung in Höhe von 100 V angelegt. Die Leiter-Erde-Spannung U_{LE} entspricht somit $57,7 \text{ V} \left(\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}} \right)$ und die Leiter-Sternpunkt-Spannung entspricht ebenfalls $57,7 \text{ V}$. Zwischen Sternpunkt und Erde tritt keine Spannung auf.

4.4.3 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz

Hierbei handelt es sich um das gesunde (fehlerfreie) Netz. Somit gibt es in diesem Fall keine Leitungsunterbrechungen.

4.4.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz

Da es sich hierbei um den fehlerfreien Fall handelt, entsprechen die Spannungsverhältnisse an allen Messpunkten (siehe 4.4.6 Zeigerdiagramme – Gesundes Netz) den idealen Spannungsverhältnissen.

Anzumerken ist hierbei, dass es beim Verbraucher zu einer Abweichung vom idealen Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 30) kommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei den verwendeten Transformatoren im Labor der TU-Graz um nicht ideale Transformatoren handelt und diese gewisse Asymmetrien aufweisen.

4.4.5 Messungen – Gesundes Netz

Die auftretenden Strom- und Spannungspegel beim Laboraufbau sind wie erwartet kein Problem für die angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 23 und Abbildung 24), weshalb eine Spannung in Höhe von 100 V (verkettet) kein Problem für die Betriebsmittel darstellt. Der Außenleiter L1 wird nicht belastet (leerlaufende Leitung).

4.4.5.1 Spannungsmessung – Gesundes Netz

Mittels Einstellung der Quelle (Omicron CMC256-6) wird auf eine, bei Leerlauf annähernd der Nennspannung des zu untersuchenden 10-kV-Netzes (10-kV-Leitungen zwischen Trafo 1 und Trafo 2) entsprechende Ausgangsspannung geregelt. Nachfolgend sind die gemessenen Werte zu sehen.

Tabelle 2: Spannungsmessung im Leerlauf und in allen Fehlerfällen am Ausgang des OMICRON (Transportnetz), gültig für das gesunde Netz und alle anderen Fehlerfälle

(Transportnetz)	Gemessene Spannung (Gesund, ohne Last)
OMICRON	
-	U_G in V
L _{1,A400kV} - E	57,4
L _{2,A400kV} - E	57,4
L _{3,A400kV} - E	57,4
L _{1,A400kV} - L _{2,A400kV}	99,5
L _{2,A400kV} - L _{3,A400kV}	99,5
L _{3,A400kV} - L _{1,A400kV}	99,5
L _{1,A400kV} - N _{A400kV}	57,4
L _{2,A400kV} - N _{A400kV}	57,4
L _{3,A400kV} - N _{A400kV}	57,4
N _{A400kV} - E	< 0,01

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6; die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 gemessen.

Bemerkung: Die Quelle ist während der gesamten Versuchsdauer stabil und unabhängig von den jeweiligen Last- / Fehlersituationen im Netz gewesen.

4.4.5.2 Strommessung – Gesundes Netz

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 3: Messung des Stromes im gesunden Zustand bei Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 110 kV, OS)

(Netzkupfeltrafo 110 kV, OS) Trafo 1, OS	Gemessener Strom (Gesund)	
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA
-		
$L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$	31,0	31,0
$L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$	41,0	134
$L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$	43,0	150

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R$: 680 Ω . Die Stromaufnahme der Last (allein) ist etwa 100 mA. Zu diesem Laststrom überlagert sich der o.a. Magnetisierungsstrom des Trafo 2.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet (siehe Abbildung 19).

4.4.5.3 Weitere Strom- und Spannungsmessungen – Gesundes Netz

Tabelle 4: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – gesundes Netz

(Netzkuppeltrafo 10 kV, US)	Gemessene Spannung (Gesund)	
	Trafo 1, US	
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}^{\prime}$ in V
L _{1,A10kV} - E	58,9	58,9
L _{2,A10kV} - E	58,7	58,9
L _{3,A10kV} - E	58,3	55,1
L _{1,A10kV} - L _{2,A10kV}	102	104
L _{2,A10kV} - L _{3,A10kV}	102	97,4
L _{3,A10kV} - L _{1,A10kV}	102	98,4
L _{1,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	58,9
L _{2,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	58,7
L _{3,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	55,5
N _{A10kV} - E	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Die Auftretenden Spannungen entsprechen nahezu den idealen Spannungsverhältnissen was sich auch im Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28) wiedergibt.

Tabelle 5: Messung des Stromes im gesunden Zustand bei Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, OS)

(Netzkupfeltrafo 10 kV, US) Trafo 1, US	Gemessener Strom (Gesund)	
	I_{LL}^* in mA	$I_{L'}^*$ in mA
-	8,00	7,90
$L_{1,A10kV} - L_{1,A10kV}$	5,40	116
$L_{2,A10kV} - L_{2,A10kV}$	8,10	121

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R: 680 \Omega$.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 5 erkennt man eine Asymmetrie der Ströme da der Außenleiter L1 nicht am Verbraucher angeschlossen ist. Der Strom des Außenleiters L1 entspricht in etwa dem Magnetisierungsstrom von Trafo 1 und wird durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen.

Tabelle 6: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – gesundes Netz

(Verbraucher 0,4 kV)	Gemessene Spannung (Gesund)	
	Trafo 2, US	
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
$L_{1,B0,4kV} - E$	33,3	33,3
$L_{2,B0,4kV} - E$	28,2	28,4
$L_{3,B0,4kV} - E$	34,4	20,2
$L_{1,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	106	113
$L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	105	75,1
$L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	105	88,0
$L_{1,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	60,7	62,9
$L_{2,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	60,8	56,3
$L_{3,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	60,6	39,1
$N_{B0,4kV} - E$	3,40	0,34

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Tabelle 7: Messung des Stromes im gesunden Zustand bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV)

(Verbraucher 0,4 kV)	Gemessener Strom (Gesund)	
	Trafo 2, US	
-	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA
$L_{1,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	< 0,01	< 0,01
$L_{2,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	< 0,01	109
$L_{3,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	< 0,01	109

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 6 erkennt man eine Sternpunktverschiebung da die Last nicht symmetrisch ist, was sich auch in Tabelle 7 widergibt.

4.4.6 Zeigerdiagramme – Gesundes Netz

Nachfolgend wird das theoretische Zeigerdiagramm zu sehen.

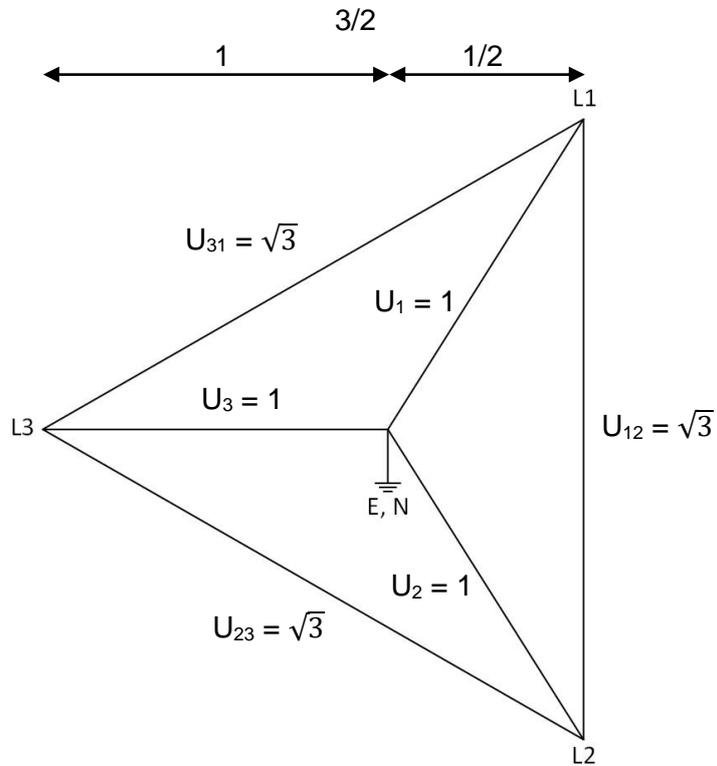


Abbildung 26: Spannungsdreieck im gesunden Netz, Theorie

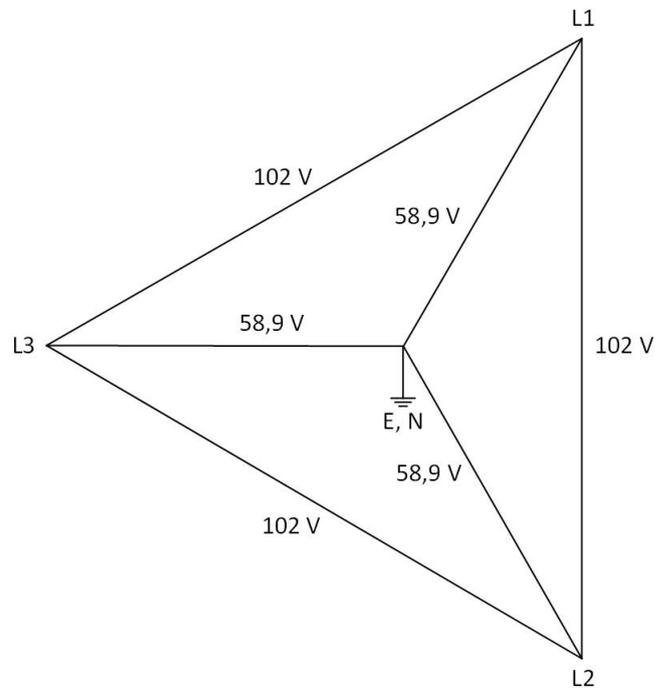


Abbildung 27: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – gesundes Netz – Leerlauf

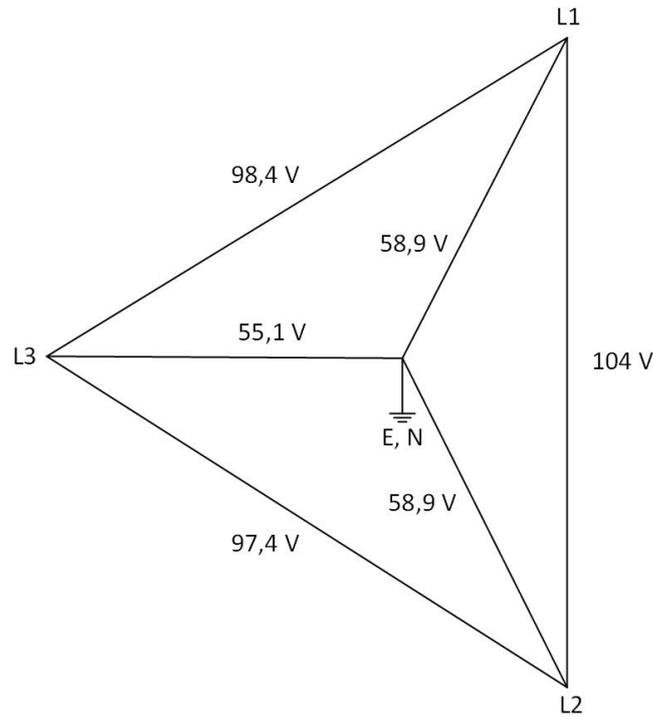


Abbildung 28: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupeutrafo 10 kV, US) – gesundes Netz – mit $R = 680 \Omega$ als Last

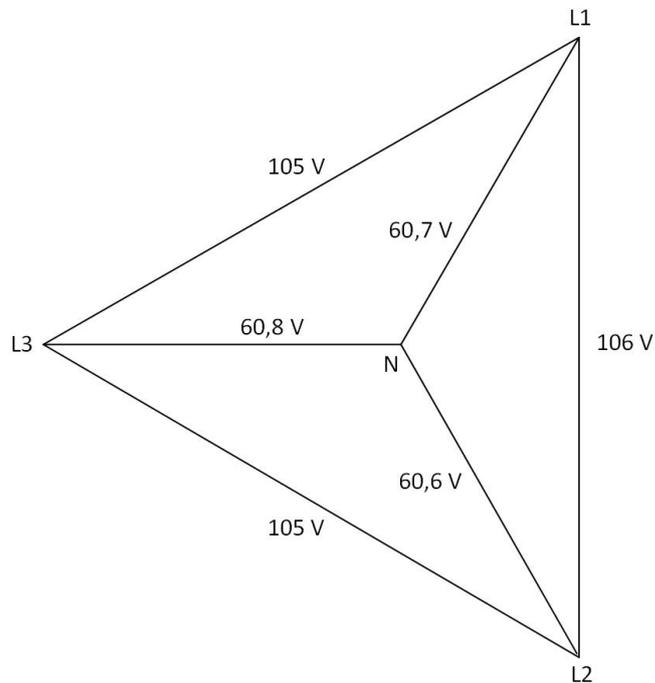


Abbildung 29: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – gesundes Netz – Leerlauf

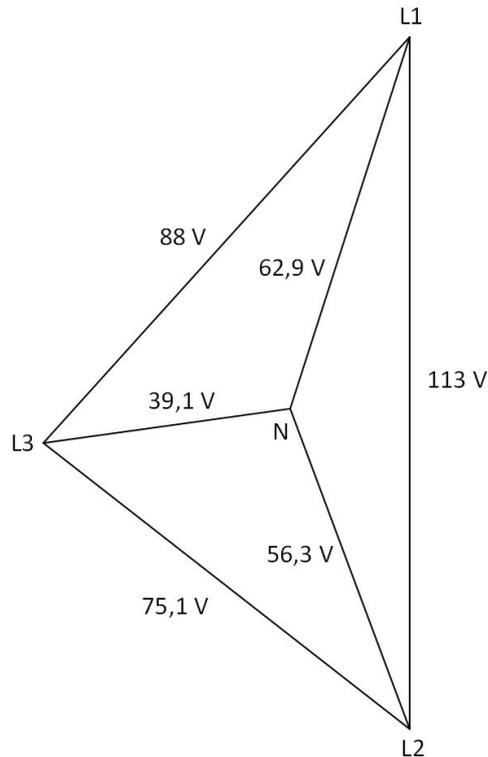


Abbildung 30: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – gesundes Netz – mit $R = 680 \Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse nahezu ident mit den idealen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 ist es nicht möglich, das Erdpotential einzuzeichnen, da der 10/0,4kV-Umspanner sekundärseitig nicht geerdet wird. Somit ist eine Spannungsmessung gegen Erde (L-E) nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden die Leiter-Erde-Spannungen nicht eingezeichnet.

Abbildung 30 zeigt die größte Abweichung vom theoretischen Zeigerdiagramm an, dies kommt durch Asymmetrien, welche die Transformatoren aufweisen, zustande.

4.5 Stehender Erdschluss (regulär)

Bei dieser Netzkonstellation wird der Außenleiter L3 mit Erde verbunden. Es handelt sich um den regulären Erdschluss.

4.5.1 Überblick – stehender Erdschluss

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{Ks} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwiderstand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

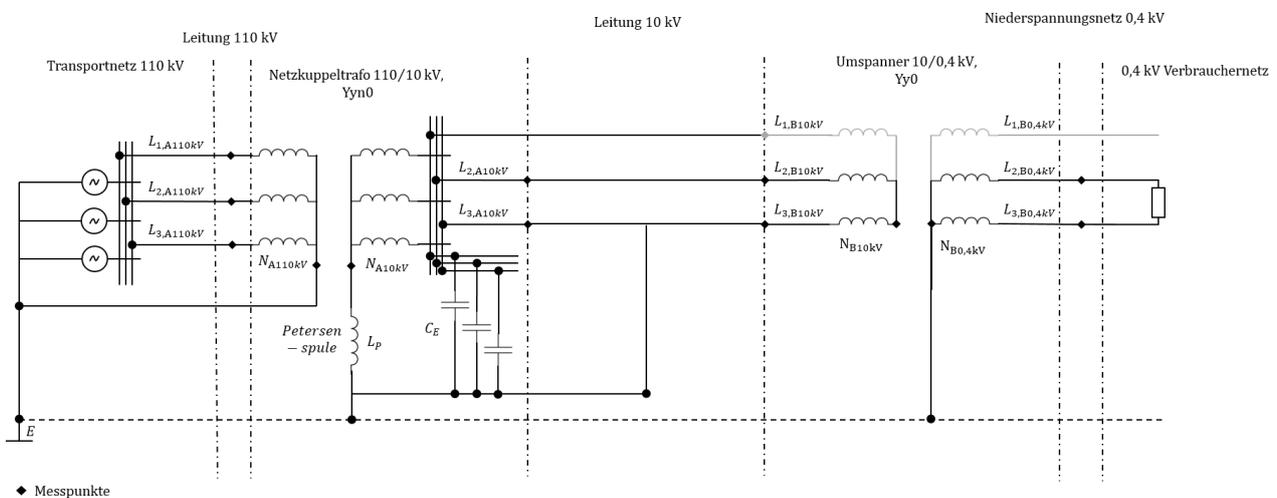


Abbildung 31: Netzsituation – stehender Erdschluss

In der obigen Darstellung wird die Netzsituation bei einem regulären Erdschluss abgebildet. Bei diesem Erdschluss wird der Außenleiter L3 auf der Unterspannungsseite des Netzkuppeltransformators (Trafo 1, US) mit Erde verbunden. Die Last wird über einen 1-Phasen-Transformator versorgt.

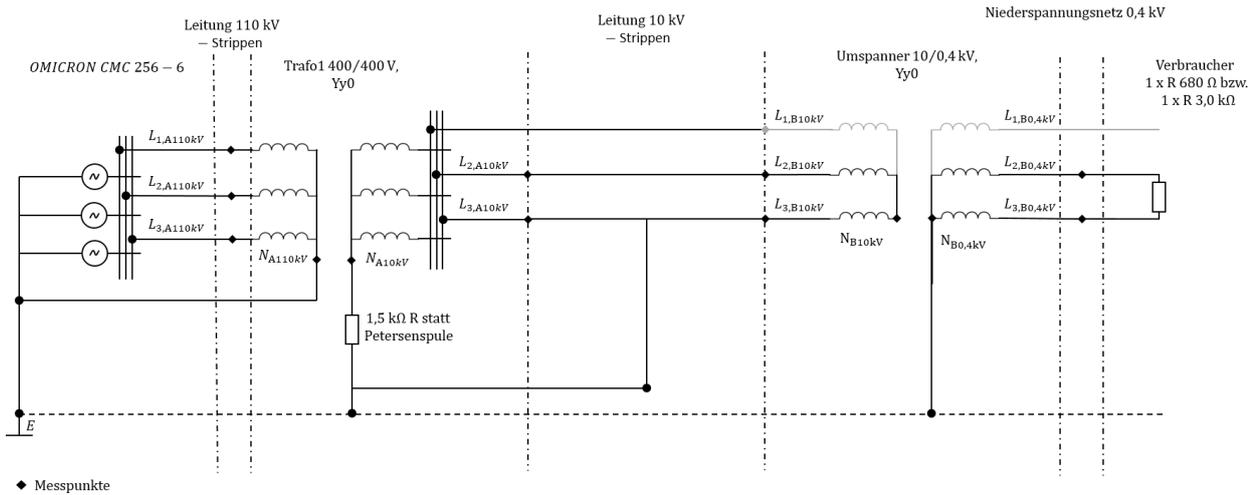


Abbildung 32: Laboruntersuchung – stehender Erdschluss

Abbildung 32 zeigt den im Labor umgesetzten Aufbau des Netzes mit Erdschluss auf der Unterspannungsseite von Trafo 1 (Phase L3). Die Last (einmal 680 Ω Widerstand und einmal 3000 Ω Widerstand) wird über den 1-Phasen-Transformator versorgt. Die Strom- und Spannungsmessung wird an den markierten Messpunkten vorgenommen.

4.5.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss

Das theoretische Spannungsdreieck sieht wie folgt aus:

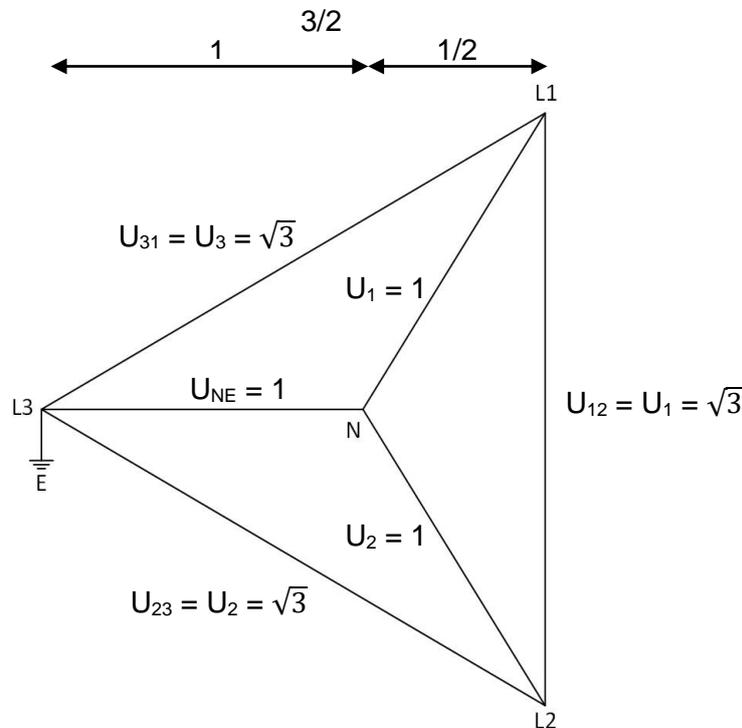


Abbildung 33: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim stehenden Erdschluss, Theorie

Als verkettete Spannung (zwischen L1-L2, L2-L3 und L3-L1) wird eine Spannung in Höhe von 100 V angelegt. Die vom Erdschluss nicht betroffenen Außenleiter (L1 und L2) erfahren eine Spannungserhöhung um den Faktor $\sqrt{3}$. Die Leiter-Erde-Spannungen U_{LE1} und U_{LE2} sind gleich 100 V ($57,7 \text{ V} \cdot \sqrt{3}$). Die Leiter-Sternpunkt-Spannungen bleiben unverändert ($57,7 \text{ V}$ bzw. $\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}}$). Zwischen Sternpunkt und Erde tritt eine Spannung in Höhe der Phasenspannung (57,7 V) auf.

4.5.3 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss

Beim stehenden Erdschluss gibt es keine Leitungsunterbrechung.

4.5.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss

Da es sich hierbei um das Netz mit Erdschluss handelt, entsprechen die Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung an allen Messpunkten (siehe Kapitel 4.5.6 Zeigerdiagramme – stehender Erdschluss) den idealen Spannungsverhältnissen.

Anzumerken ist hierbei, dass es beim Verbraucher zu einer Abweichung vom idealen Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 40) kommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei den verwendeten Transformatoren im Labor der TU-Graz um nicht ideale Transformatoren handelt und diese gewisse Asymmetrien aufweisen.

4.5.5 Messungen – stehender Erdschluss

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 31 und Abbildung 32) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten. Der Außenleiter L1 wird nicht belastet (leerlaufende Leitung).

4.5.5.1 Strommessung – stehender Erdschluss

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 8: Messung des Stromes bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 110 kV, OS) – stehender Erdschluss

(Netzkuppeltrafo 110 kV, OS) Trafo 1, OS	Gemessener Strom (Fall 1)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$	31,0	31,0	31,0
$L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$	41,0	136	55,5
$L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$	71,7	186	106

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet (siehe Abbildung 19).

Die Phasenströme des Außenleiters L1 bleiben unverändert. Der Phasenstrom I_{L2} steigt durch die vom Erdschluss hervorgerufene Flussaddition im zweiten Schenkel des Transformators an. Der hier in Phase L3 auftretende Strom I_{L3} ist der größte gemessene Strom verglichen mit den anderen, beim stehenden Erdschluss gemessenen Strömen.

4.5.5.2 Weitere Strom- und Spannungsmessungen – stehender Erdschluss

Tabelle 9: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 1, US (Netzkupplerauto 10 kV, US) – stehender Erdschluss

(Netzkupplerauto 10 kV, US)	Gemessene Spannung (Fall 1)		
Trafo 1, US			
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
L _{1,A10kV} - E	102	98,0	101
L _{2,A10kV} - E	103	98,8	102
L _{3,A10kV} - E	< 0,01	< 0,01	< 0,01
L _{1,A10kV} - L _{2,A10kV}	103	104	103
L _{2,A10kV} - L _{3,A10kV}	103	98,8	102
L _{3,A10kV} - L _{1,A10kV}	102	98,0	101
L _{1,A10kV} - N _{A10kV}	59,3	59,3	59,3
L _{2,A10kV} - N _{A10kV}	59,3	59,0	59,3
L _{3,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	55,5	58,0
N _{A10kV} - E	58,9	55,5	58,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 9 erkennt man, dass sich die Spannungswerte bei Leerlauf und Belastung nur minimal voneinander unterscheiden (max. um ca. 7 %). Es zeigen sich die bei einem Erdschluss auftretenden typischen Werte (Anhebung der vom Fehler nicht betroffenen Leiter-Erde-Spannungen auf das $\sqrt{3}$ -fache und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt). Die Leiter-Leiter-Spannungen bleiben unverändert.

Tabelle 10: Messung des Stromes bei Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, OS) – stehender Erdschluss

(Netzkupfeltrafo 10 kV, US)	Gemessener Strom (Fall 1)		
Trafo 1, US	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,A10kV} - L_{1,A10kV}$	8,20	8,00	8,10
$L_{2,A10kV} - L_{2,A10kV}$	5,60	118	36,2
$L_{3,A10kV} - L_{3,A10kV}$	45,8	150	77,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω .

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Tabelle 10 zeigt die gemessenen Ströme. Die Phasenströme des Außenleiters L1 weisen nur geringe Unterschiede bei Leerlauf und Belastung auf und werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen. I_{L2} steigt enorm an, dies lässt sich durch die vom Erdschluss hervorgerufene Flussaddition im zweiten Schenkel des Transformators erklären. Wie zu erwarten ist der Phasenstrom I_{L3} am größten (Maximum bei Belastung mit 680 Ω Widerstand).

Tabelle 11: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss

(Umspanner 10 kV)	Gemessene Spannung (Fall 1)		
Trafo 2, OS	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
-			
L _{1,B10kV} - E	102	98,0	101
L _{2,B10kV} - E	103	98,8	102
L _{3,B10kV} - E	< 0,01	< 0,01	< 0,01
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	103	104	103
L _{2,B10kV} - L _{3,B10kV}	103	98,8	102
L _{3,B10kV} - L _{1,B10kV}	102	98,0	101
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	58,8	58,5	58,7
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	59,6	59,4	59,8
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	59,0	55,9	58,2
N _{B10kV} - E	59,0	55,9	58,2

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Tabelle 11 zeigt, dass sich die Spannungswerte bei Leerlauf und Belastung nur minimal voneinander unterscheiden (max. um ca. 8 %). Es zeigen sich die, bei einem Erdschluss auftretenden typischen Werte (Anhebung der vom Fehler nicht betroffenen Leiter-Erde-Spannungen auf das $\sqrt{3}$ -fache und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt). Die Leiter-Leiter-Spannungen bleiben unverändert.

Tabelle 12: Messung des Stromes bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss

(Umspanner 10 kV, OS) Trafo 2, OS	Gemessener Strom (Fall 1)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,B10kV} - L_{1,B10kV}$	8,10	8,00	8,00
$L_{2,B10kV} - L_{2,B10kV}$	5,70	118	36,2
$L_{3,B10kV} - L_{3,B10kV}$	8,20	123	42,2

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω .

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Wie man aus Tabelle 12 entnehmen kann, sind die Phasenströme des Außenleiters L1 konstant und werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen. I_{L2} und I_{L3} nehmen unter Belastung enorm zu. Dies ist wiederum auf die vom Erdschluss verursachte Asymmetrie und dadurch verbundenen Flussaddition in den Schenkeln zurückzuführen.

Tabelle 13: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss

(Verbraucher 0,4 kV)	Gemessene Spannung (Fall 1)		
Trafo 2, US	$U_{F,LL}$ * in V	$U_{F,L'}$ in V	$U_{F,L''}$ in V
-			
$L_{1,B0,4kV} - E$	31,2	35,6	39,3
$L_{2,B0,4kV} - E$	33,8	29,0	34,1
$L_{3,B0,4kV} - E$	23,9	13,8	22,5
$L_{1,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	106	113	109
$L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	106	75,6	98,6
$L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	105	87,4	98,9
$L_{1,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	60,6	63,8	61,3
$L_{2,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	61,5	56,8	61,0
$L_{3,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	60,8	39,0	54,8
$N_{B0,4kV} - E$	6,60	6,00	7,90

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R$: 680 Ω .

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R$: 3000 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 13 erkennt man, dass sich die Spannungen sowohl im Leerlauf als auch unter Belastung stark verändern (im Vergleich zu den anderen gemessenen Spannungen). Die Leiter-Erde-Spannungen nehmen um mehr als 65 % ab. Die Außenleiterspannungen und die Phasenspannungen steigen um ca. 6 %, mit Ausnahme der Spannungen bei 680 Ω Last (Spannungsunterschiede im +- 30 % Bereich) an. Die Spannung zwischen Sternpunkt und Erde bricht jedoch völlig zusammen.

Da der 10/0,4kV-Umspanner sekundärseitig nicht geerdet wird folgt daraus, dass eine Spannungsmessung gegen Erde (L-E) nicht sinnvoll ist. Aus diesem Grund werden die Leiter-Erde-Spannungen nicht eingezeichnet.

Die Flüsse in den zugeordneten Schenkeln (Phase L1 bzw. L2) sind gegengleich. In Schenkel 3 fließt kein Magnetisierungsstrom, weshalb in L3-N keine (nennenswerte) Spannung aufgebaut wird.

Tabelle 14: Messung des Stromes bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss

(Verbraucher 0,4 kV) Trafo 2, US	Gemessener Strom (Fall 1)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-	$< 0,01$	$< 0,01$	$< 0,01$
$L_{1,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	$< 0,01$	111	33,1
$L_{2,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	$< 0,01$	111	33,1
$L_{3,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	$< 0,01$	111	33,1

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω .

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Vergleicht man die Ströme aus Tabelle 8 und Tabelle 14 erkennt man, dass die Ströme um ca. 55 % abnehmen.

4.5.6 Zeigerdiagramme – stehender Erdschluss

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

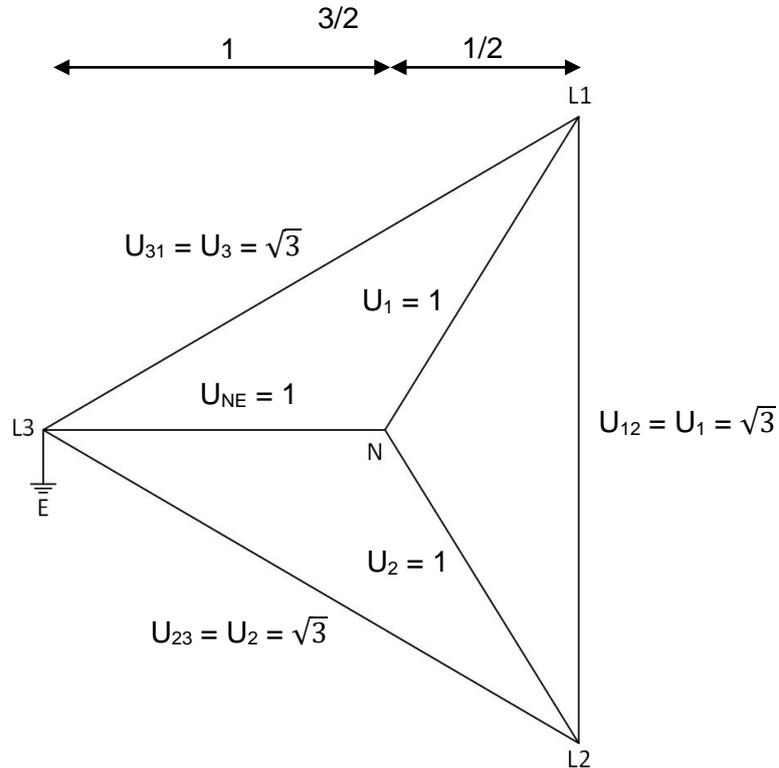


Abbildung 34: Spannungsdreieck – stehender Erdschluss, Theorie

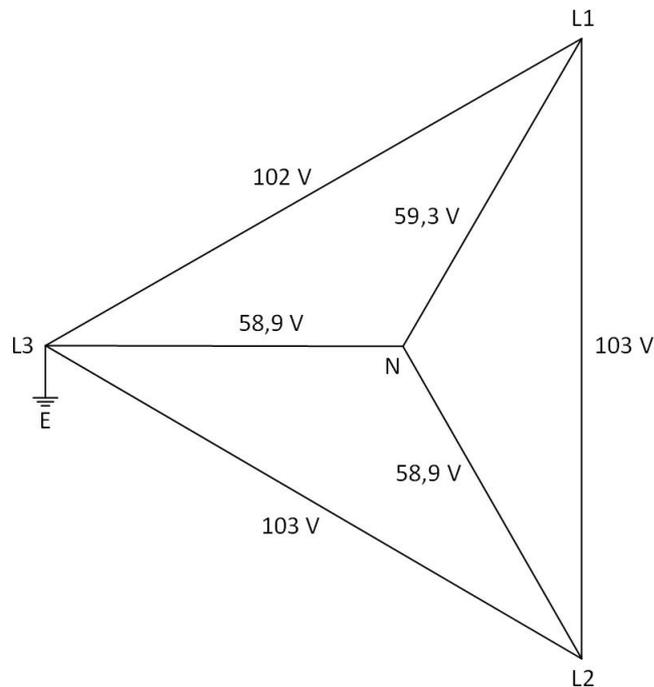


Abbildung 35: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last (+- 1%)

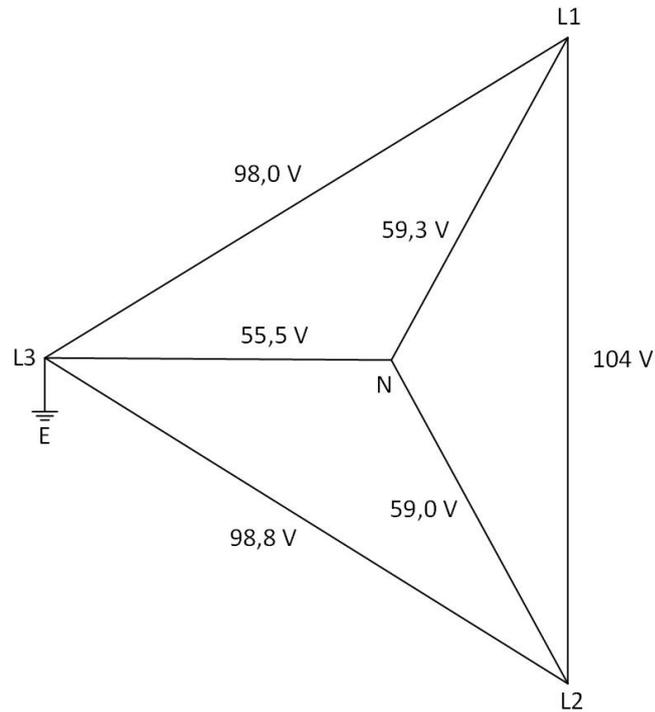


Abbildung 36: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupplertrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega$ als Last

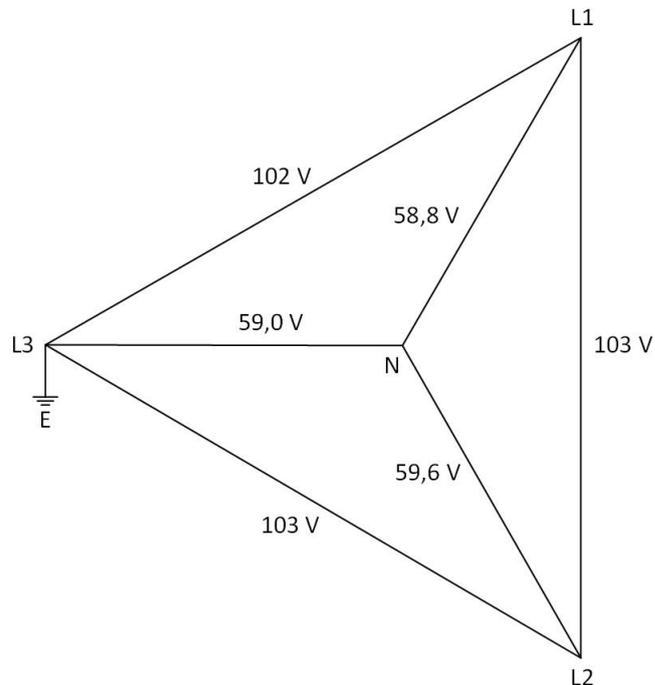


Abbildung 37: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last (+- 1%)

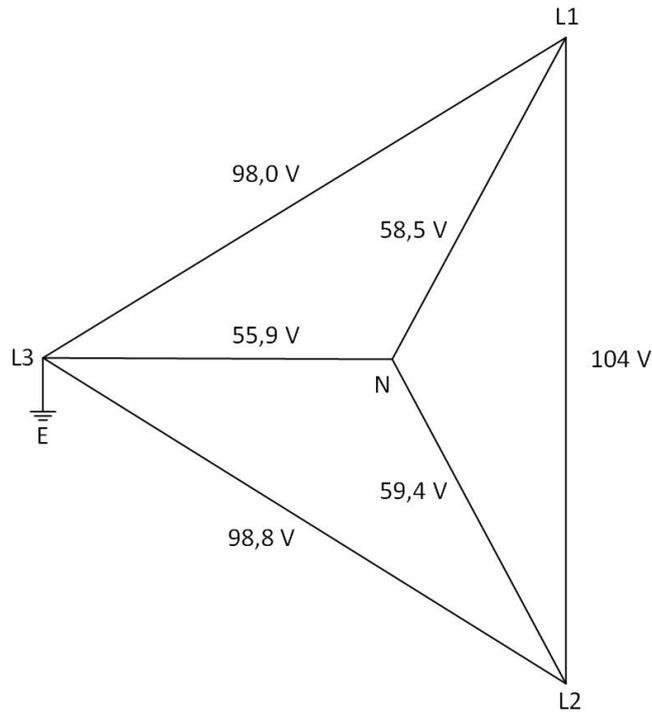


Abbildung 38: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega$ W als Last

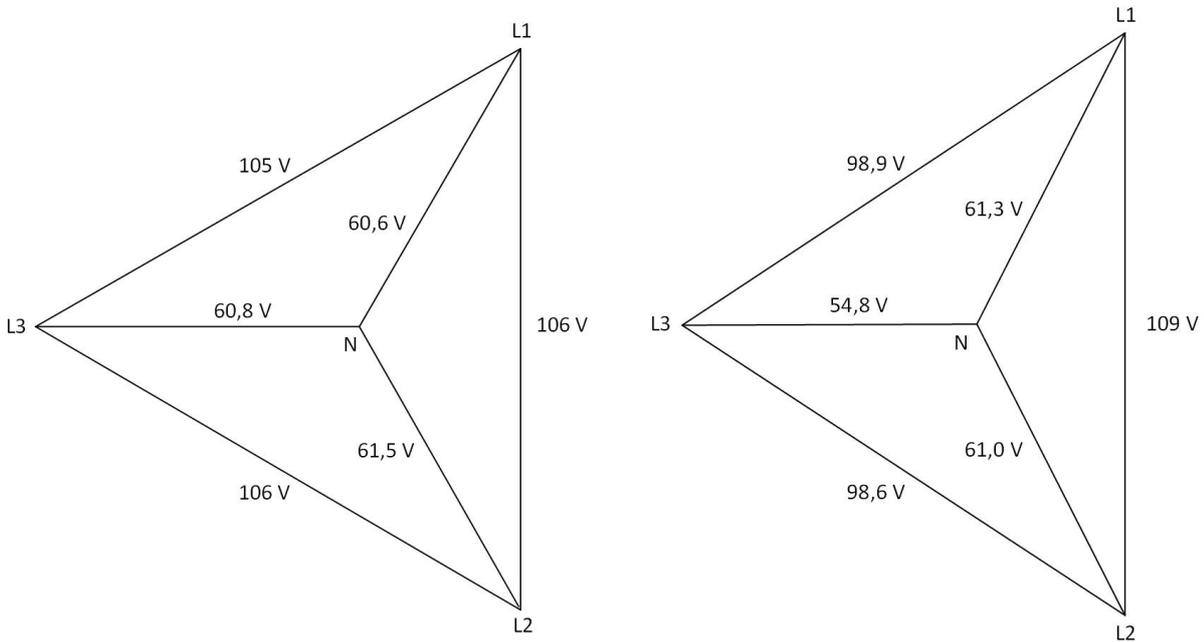


Abbildung 39: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss – links: Leerlauf; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last

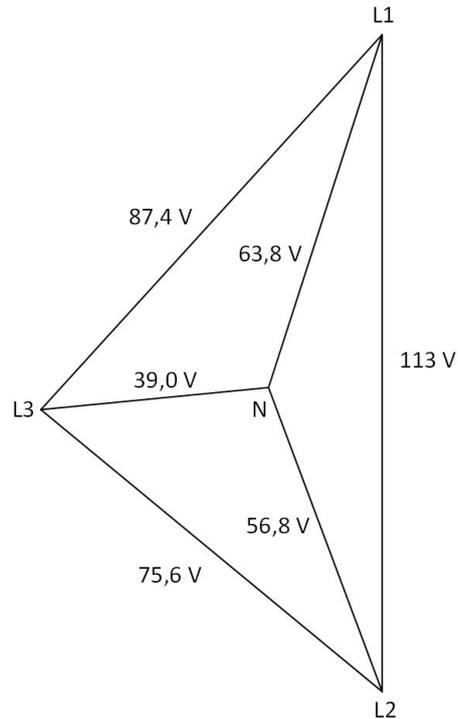


Abbildung 40: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse nahezu ident mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist es nicht möglich, das Erdpotential einzuzeichnen, da der 10/0,4kV-Umspanner sekundärseitig nicht geerdet wird. Somit ist eine Spannungsmessung gegen Erde (L-E) nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden die Leiter-Erde-Spannungen nicht eingezeichnet.

Abbildung 40 zeigt die größte Abweichung vom theoretischen Zeigerdiagramm an, dies kommt durch Asymmetrien die, die Transformatoren aufweisen, zustande.

4.6 Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

Beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite handelt es sich nicht um einen klassischen Erdschluss. Zusätzlich zum unterspannungsseitigen Erdschluss (beim Netzkuppeltrafo 10 kV, US bzw. Trafo 1, US) kommt es noch zu einer Leitungsunterbrechung, bzw. zu einem Leitungsriss auf der Oberspannungsseite vom Umspanner 10 kV, OS bzw. Trafo 2 OS (siehe Abbildung 41).

4.6.1 Überblick – Fall 1

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{KS} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschkulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwiderstand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

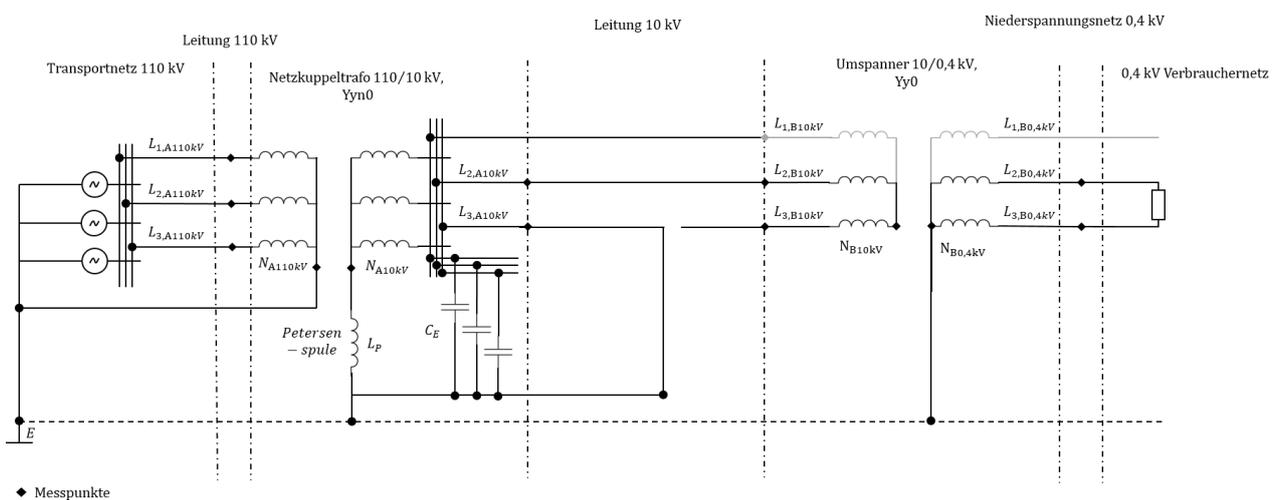


Abbildung 41: Netzsituation – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

Der hier dargestellte Fall stellt die Netzsituation bei einem versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung an der Oberspannungsseite des 10/0,4kV-Transformators dar.

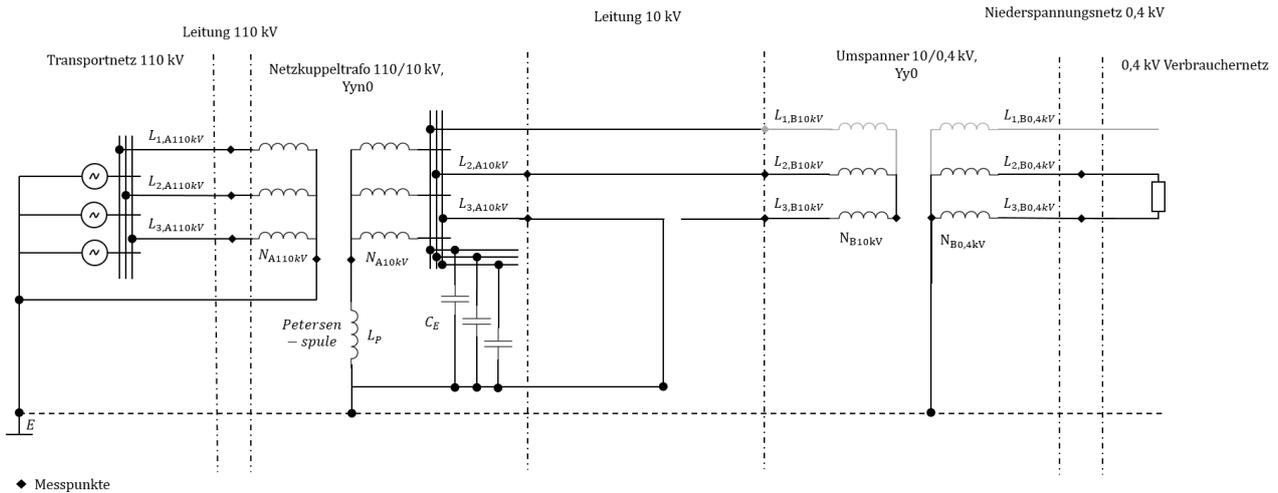


Abbildung 42: Laboruntersuchung – Fall1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

Auf Basis der Netzsituation wird die Laboruntersuchung an die vorhandenen Bauelemente angepasst. Statt der Petersenspule beim Sternpunkt des Netzkuppeltransformators wird ein $1,5 \text{ k}\Omega$ Widerstand verwendet. Als Last wird einmal ein $680 \text{ }\Omega$ Widerstand und einmal $3000 \text{ }\Omega$ Widerstand angeschlossen. Der versorgungsseitige Erdschluss mit Leitungsunterbrechung wird durch die Verbindung der Strippe von L_3 mit Erde realisiert.

4.6.3 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 1

Das Zeigerdiagramm nach der Leiterseilunterbrechung sieht wie folgt aus:

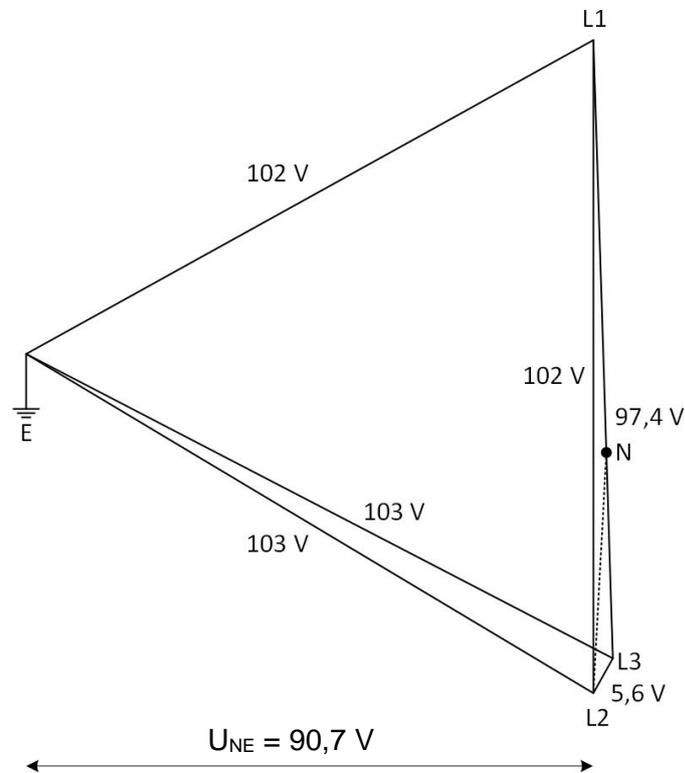


Abbildung 44: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 1
Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last

Man erkennt, dass die Laboruntersuchung (Praxis) sehr gut mit der Theorie übereinstimmt. Anzumerken ist hierbei, dass es beim Umspanner zu einer Abweichung vom theoretischen Zeigerdiagramm

(siehe Abbildung 43) kommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass hier bereits erste Sättigungserscheinungen auftreten und es sich bei den verwendeten Transformatoren im Labor der TU-Graz um nicht ideale Transformatoren handelt und diese gewisse Asymmetrien aufweisen.

4.6.1 Messungen – Fall 1

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 41 und Abbildung 42) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten. Der Außenleiter L1 wird nicht belastet (leerlaufende Leitung).

4.6.1.1 Strommessung – Fall 1

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 15: Messung des Stromes im Fall 1 bei Trafo 1, US (Netzkupeltrafo 110 kV, OS)

(Netzkupeltrafo 110 kV, OS)	Gemessener Strom (Fall 1)		
	Trafo 1, OS		
-	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
$L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$	27,1	29,8	29,2
$L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$	42,2	46,1	45,5
$L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$	64,1	64,1	64,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet (siehe Abbildung 19).

Die Phasenströme des Außenleiters L1 bleiben nahezu unverändert. Der Phasenstrom I_{L2} steigt durch die vom Erdschluss hervorgerufene Flussaddition im zweiten Schenkel des Transformators an. Der hier in Phase L3 auftretende Strom I_{L3} ist der größte gemessene Strom verglichen mit den anderen, im Fall 1 gemessenen Strömen.

4.6.1.2 Weitere Strom- und Spannungsmessungen – Fall 1

Tabelle 16: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 1, US (Netzkoppeltrafo 10 kV, US) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

(Netzkoppeltrafo 10 kV, US)	Gemessene Spannung (Fall 1)		
Trafo 1, US			
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
L _{1,A10kV} - E	102	102	102
L _{2,A10kV} - E	103	103	103
L _{3,A10kV} - E	< 0,01	< 0,01	< 0,01
L _{1,A10kV} - L _{2,A10kV}	102	102	102
L _{2,A10kV} - L _{3,A10kV}	103	103	103
L _{3,A10kV} - L _{1,A10kV}	102	102	102
L _{1,A10kV} - N _{A10kV}	59,0	59,0	59,0
L _{2,A10kV} - N _{A10kV}	58,8	58,8	58,8
L _{3,A10kV} - N _{A10kV}	58,7	58,7	58,7
N _{A10kV} - E	58,7	58,7	58,7

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 16 erkennt man, dass die Spannungswerte bei Leerlauf und Belastung exakt übereinstimmen. Es zeigen sich die, bei einem Erdschluss auftretenden typischen Werte (Anhebung der vom Fehler nicht betroffenen Leiter-Erde-Spannungen um $\sqrt{3}$ und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt). Die Leiter-Leiter-Spannungen bleiben unverändert.

Tabelle 17: Messung des Stromes im Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite, bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, OS)

(Netzkuppeltrafo 10 kV, US)	Gemessener Strom (Fall 1)		
Trafo 1, US	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,A10kV} - L_{1,A10kV}$	6,30	10,2	9,40
$L_{2,A10kV} - L_{2,A10kV}$	6,20	10,2	9,40
$L_{3,A10kV} - L_{3,A10kV}$	39,1	39,1	39,6

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Die Ströme in Tabelle 17 verringern wesentlich im Vergleich mit den Werten aus Tabelle 15 sich (ca. 25 %). Die Phasenströme des Außenleiters L1 werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen.

Tabelle 18: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

(Umspanner 10 kV)	Gemessene Spannung (Fall 1)		
Trafo 2, OS	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
-			
L _{1,B10kV} - E	102	102	102
L _{2,B10kV} - E	103	103	103
L _{3,B10kV} - E	85,6	103	106
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	102	102	102
L _{2,B10kV} - L _{3,B10kV}	5,60	5,60	18,4
L _{3,B10kV} - L _{1,B10kV}	45,7	97,4	88,1
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	49,2	66,4	63,2
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	52,8	35,4	38,9
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	4,22	30,9	25,3
N_{B10kV} - E	87,4	90,7	93,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Die vom Netzkuppeltrafo (Trafo 1 – siehe Abbildung 41 bzw. Abbildung 42) kommenden Spannungen entsprechen den Spannungsverhältnissen laut Abbildung 33: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim stehenden Erdschluss, Theorie. Die resultierenden Magnetisierungsströme in Leiter L1 und L2 müssen gegengleich sein, da weder über L3 noch über den 10-kV-Sternpunkt ein weiterer Strom die Primärseite von Trafo 1 verlassen kann.

Folglich sind die Flüsse in den der Phase L1 bzw. L2 zugeordneten Schenkeln gegengleich und in Schenkel 3 fließt kein Magnetisierungsstrom, weshalb in L3-N keine (nennenswerte) Spannung aufgebaut wird.

Der Sternpunkt nimmt im Sinne eines Spannungsteilers zwischen den extern vorgegebenen Phasenspannungen L1 und L2 die (geometrisch) halbe Spannung und damit die 1,5-fache Phasenspannung gegenüber Erde an.

Messung bestätigt $U_{NE} = 58,7 \text{ V} \cdot 1,5 = 88 \text{ V} !$

Tabelle 19: Messung des Stromes im Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite, bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS)

(Umspanner 10 kV, OS) Trafo 2, OS	Gemessener Strom (Fall 1)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,B10kV} - L_{1,B10kV}$	6,20	9,80	9,50
$L_{2,B10kV} - L_{2,B10kV}$	6,10	9,70	9,50
$L_{3,B10kV} - L_{3,B10kV}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 19 erkennt man, dass die Ströme im Fall unter Belastung um ca. 37 % zunehmen. Da hier die Leitungsunterbrechung vorliegt, fließt auf Phase L3 kein Strom. Die Phasenströme des Außenleiters L1 werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen.

Tabelle 20: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite

(Verbraucher 0,4 kV) Trafo 2, US	Gemessene Spannung (Fall 1)		
	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
-			
$L_{1,B0,4kV} - E$	30,5	36,0	36,1
$L_{2,B0,4kV} - E$	26,6	19,9	21,2
$L_{3,B0,4kV} - E$	8,90	19,2	18,0
$L_{1,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	105	104	104
$L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	58,1	4,47	17,8
$L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	47,3	101	91,5
$L_{1,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	50,8	68,3	65,1
$L_{2,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	54,4	35,5	39,2
$L_{3,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	4,19	32,6	27,0
$N_{B0,4kV} - E$	8,64	8,27	8,22

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

'' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 20 erkennt man, dass im Leerlauf nur die Spannung zwischen $L_{1,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$ gesund ist. Wird ein Verbraucher angeschlossen, steigt die verkettete Spannung zwischen $L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$ auf die gesunde verkettete Spannung an wohingegen die verkettete Spannung zwischen $L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$ zusammenbricht.

Die Flüsse in den der Außenleiter L1 bzw. L2 zugeordneten Schenkeln sind gegengleich. In Schenkel 3 fließt kein Magnetisierungsstrom, weshalb in L3-N keine (nennenswerte) Spannung aufgebaut wird.

Tabelle 21: Messung des Stromes im Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite, bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV)

(Verbraucher 0,4 kV) Trafo 2, US	Gemessener Strom (Fall 1)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-	< 0,01	< 0,01	< 0,01
$L_{1,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	< 0,01	6,60	6,00
$L_{2,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	< 0,01	6,70	6,00

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Vergleicht man die Ströme aus Tabelle 7 und Tabelle 21 erkennt man, dass im Fall 1 der Strom um ca. 94 % abnimmt.

4.6.2 Zeigerdiagramme – Fall 1

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

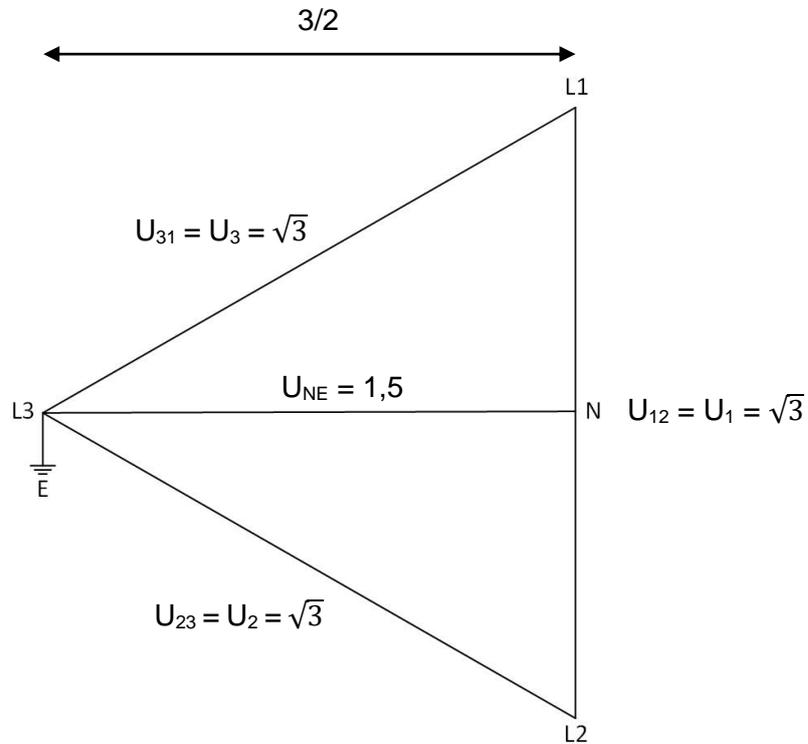


Abbildung 45: Spannungsdreieck – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite, Theorie

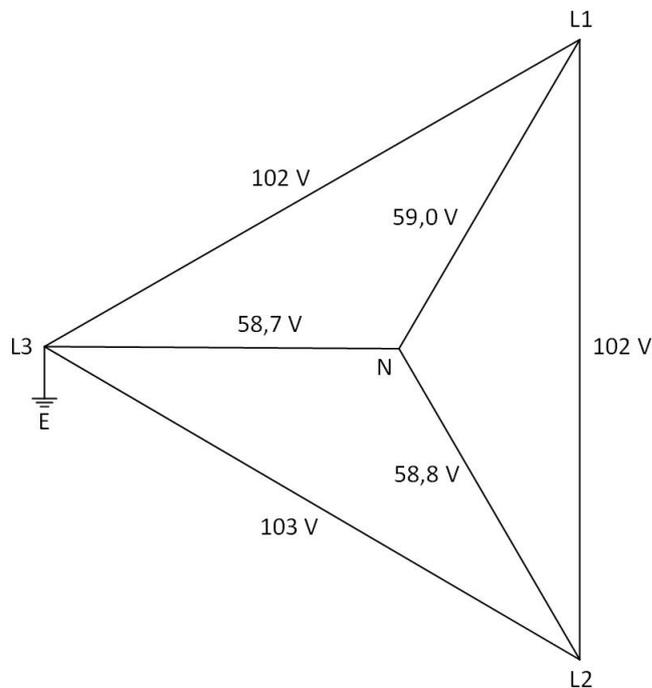


Abbildung 46: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – gilt für Leerlauf, mit $R = 680 \Omega$ als Last und mit $R = 3 k\Omega$ als Last

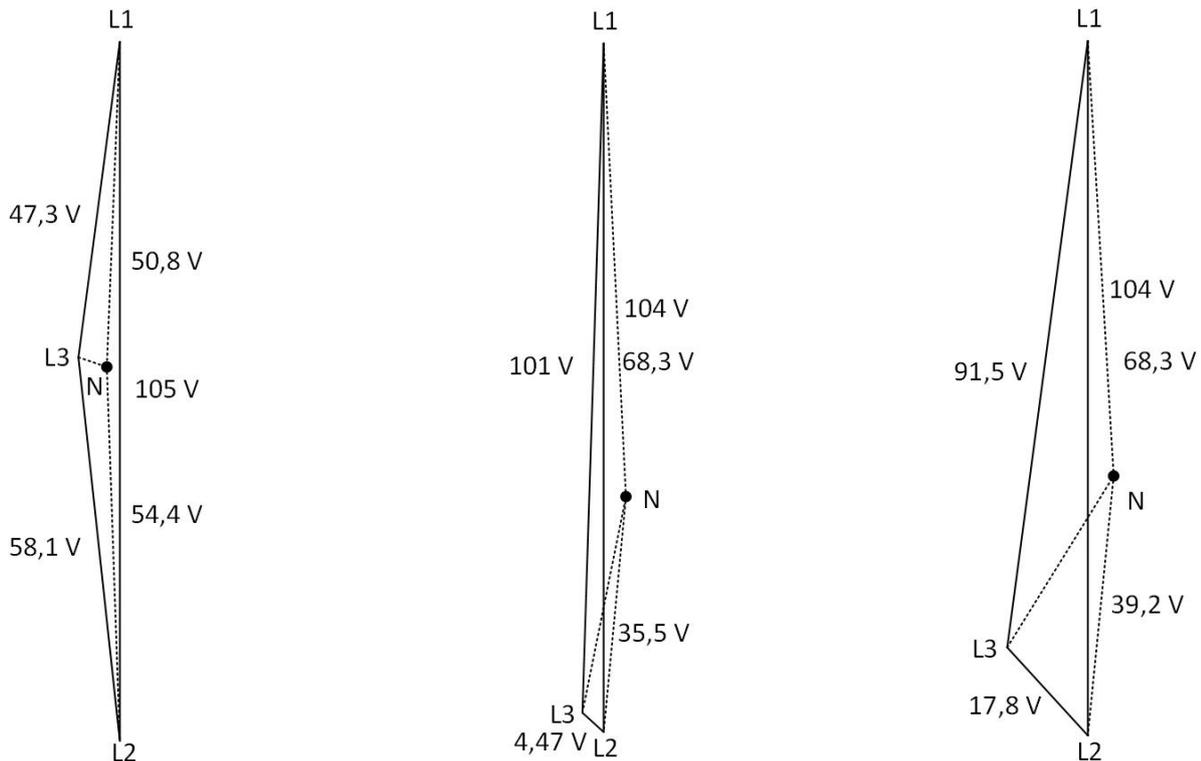


Abbildung 49: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse sehr gut mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 49 ist es nicht möglich, das Erdpotential einzuzeichnen, da der 10/0,4kV-Umspanner sekundärseitig nicht geerdet wird. Somit ist eine Spannungsmessung gegen Erde (L-E) nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden die Leiter-Erde-Spannungen nicht eingezeichnet.

Abbildung 49 zeigt die größte Abweichung vom theoretischen Zeigerdiagramm an, dies kommt durch den versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung. Weitere Abweichungen entstehen durch Asymmetrien welche durch die Transformatoren verursacht werden.

4.7 Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

Beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite kann man nicht mehr von der Theorie des klassischen Erdschlusses ausgehen. Zusätzlich zur Leitungsunterbrechung bzw. zu einem Leitungsriss auf der Versorgungsseite (Netzkuppeltrafo 10 kV, US bzw. Trafo 1, US) kommt es auf der Oberspannungsseite, beim Umspanner 10 kV, US bzw. Trafo 2, US zusätzlich zu einem Erdschluss (siehe Abbildung 50). Der verbraucherseitige Erdschluss wird auch als rückwärtiger Überschlag bezeichnet.

4.7.1 Überblick – Fall 2

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{Ks} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwiderstand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

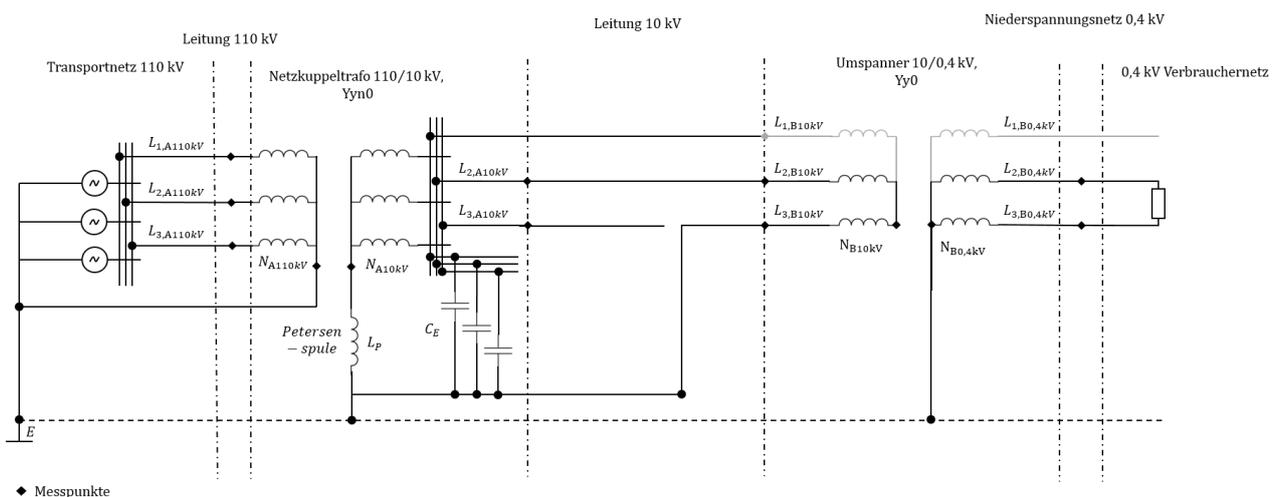


Abbildung 50: Netzsituation – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

Der hier dargestellte Fall stellt die Netzsituation bei einem verbraucherseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung an der Unterspannungsseite des Netzkupplerttransformators dar.

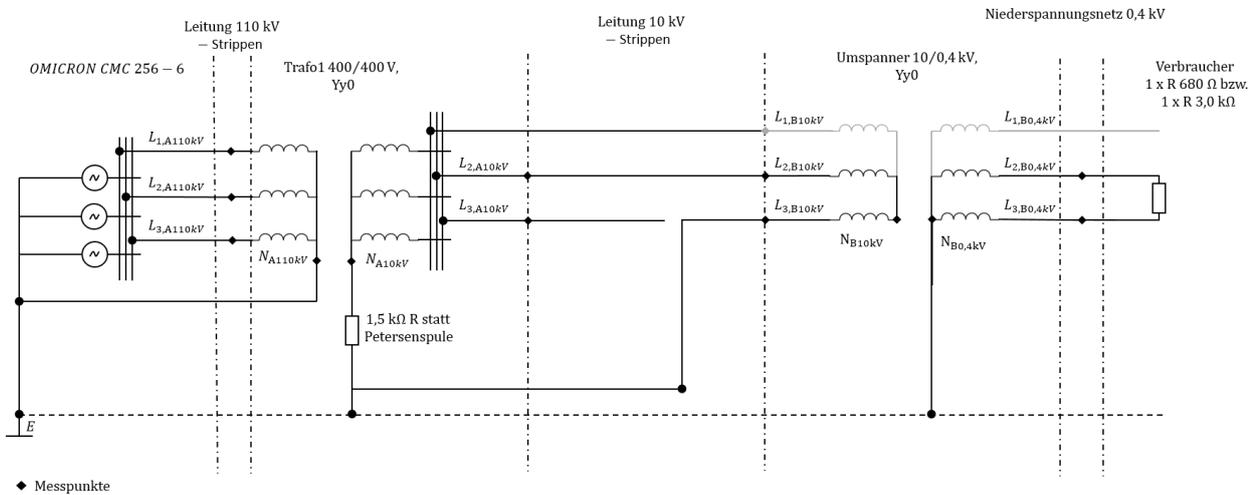


Abbildung 51: Laboruntersuchung – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

Auf Basis der Netzsituation des Erdschlusses mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite wird die Laboruntersuchung an, die vom Institut für Elektrische Anlagen und Netze bereitgestellten Bauelemente angepasst. Statt der Petersenspule beim Sternpunkt des Netzkupplerttransformators wird ein $1,5 \text{ k}\Omega$ Widerstand verwendet. Als Last wird einmal ein $680 \text{ }\Omega$ Widerstand und einmal $3000 \text{ }\Omega$ Widerstand angeschlossen. Der verbraucherseitige Erdschluss mit Leitungsunterbrechung wird durch die Verbindung der Strippe von L3 mit Erde realisiert.

4.7.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Fall 2

Das theoretische Spannungsdreieck für Fall 2 sieht wie folgt aus:

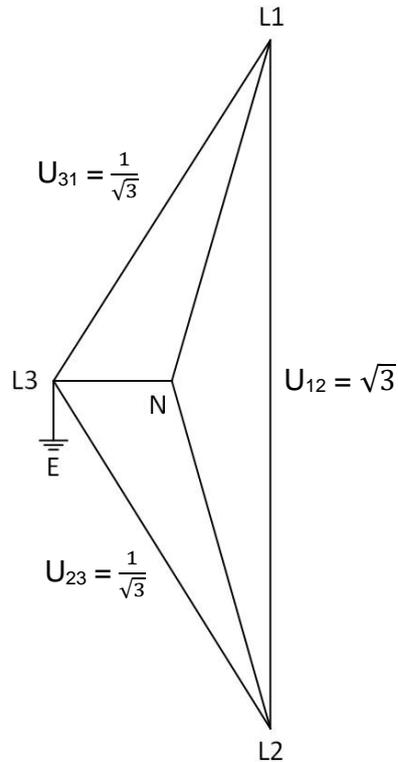


Abbildung 52: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite (Fall 2), Theorie

Als verkettete Spannung (zwischen L1-L2, L2-L3 und L3-L1) wird eine Spannung in Höhe von 100 V angelegt. Die vom Erdschluss nicht betroffenen Außenleiter (L1 und L2) erfahren eine Spannungsverminderung. Die verketteten Spannungen U_{31} und U_{23} verringern sich um das $\sqrt{3}$ -fache.

4.7.3 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Fall 2

Die Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung entsprechen in etwa den Spannungsverhältnissen des gesunden Netzes (siehe Kapitel 4.4.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz).

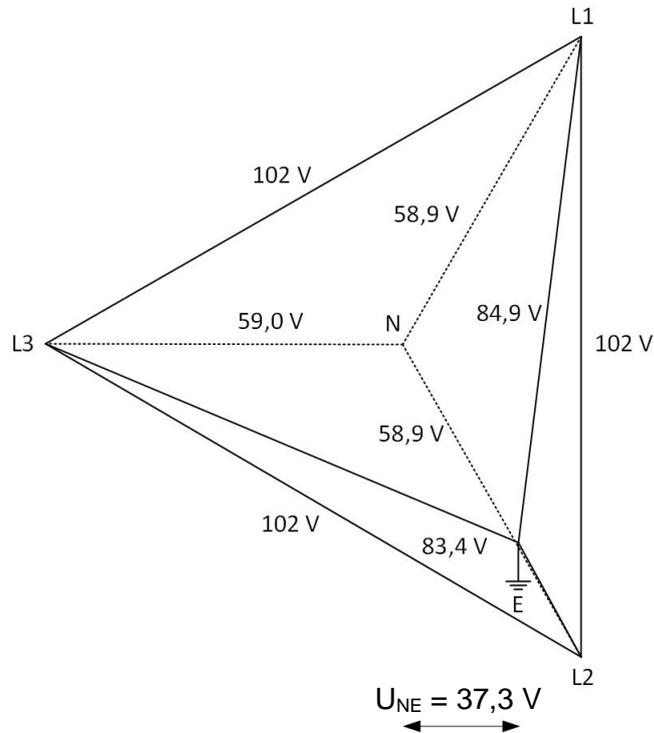


Abbildung 53: Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Fall 2
Trafo 1, US (Netzkupplertrafo 10 kV, US) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last

Man erkennt hier jedoch, dass der rückwärtige Überschlagn eine Erdpotentialverschiebung in Richtung der Phase L2 zufolge hat.

4.7.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 2

Das Zeigerdiagramm nach der Leiterseilunterbrechung sieht wie folgt aus:

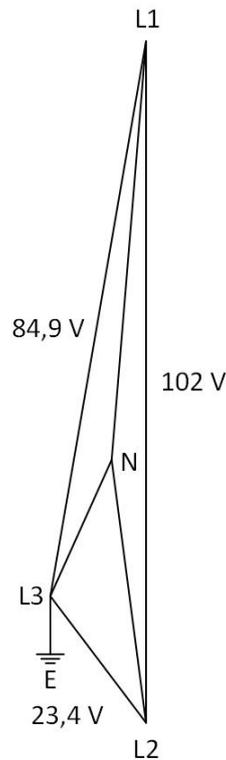


Abbildung 54: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 2
Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last

Man erkennt, dass die Laboruntersuchung (Praxis) sehr gut mit der und Theorie übereinstimmt. Anzumerken ist hierbei, dass es beim Umspanner zu einer Abweichung vom idealen Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 52) kommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei den verwendeten Transformatoren im Labor der TU-Graz um nicht ideale Transformatoren handelt und diese gewisse Asymmetrien aufweisen.

4.7.1 Messungen – Fall 2

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 50 und Abbildung 51) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten. Der Außenleiter L1 wird nicht belastet (leerlaufende Leitung).

4.7.1.1 Strommessung – Fall 2

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 22: Messung des Stromes im Fall 2 bei Trafo 1, US (Netzkupeltrafo 110 kV, OS)

(Netzkupeltrafo 110 kV, OS)	Gemessener Strom (Fall 2)		
	Trafo 1, OS		
-	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
$L_{1,A110kV} - L_{1,A110kV}$	29,2	30,3	29,7
$L_{2,A110kV} - L_{2,A110kV}$	42,4	59,9	49,7
$L_{3,A110kV} - L_{3,A110kV}$	35,1	35,1	35,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet (siehe Abbildung 19).

Die Phasenströme der Phase L1 bleiben nahezu unverändert. Der Phasenstrom I_{L2} steigt durch die vom Erdschluss hervorgerufene Flussaddition im zweiten Schenkel des Transformators an und ist zudem der der größte gemessene Strom verglichen mit den anderen, im Fall 2 gemessenen Strömen. Der Strom I_{L3} in Phase L3 ist um ca. 30 - 60 % kleiner als I_{L2} .

4.7.1.2 Weitere Strom- und Spannungsmessungen – Fall 2

Tabelle 23: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 1, US (Netzkupplerauto 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

(Netzkupplerauto 10 kV, US)	Gemessene Spannung (Fall 2)		
Trafo 1, US			
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	$U_{F,L}''$ in V
L _{1,A10kV} - E	60,8	84,9	70,0
L _{2,A10kV} - E	53,0	21,3	36,8
L _{3,A10kV} - E	64,2	83,4	74,5
L _{1,A10kV} - L _{2,A10kV}	102	102	102
L _{2,A10kV} - L _{3,A10kV}	102	102	102
L _{3,A10kV} - L _{1,A10kV}	102	102	102
L _{1,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	58,9	58,9
L _{2,A10kV} - N _{A10kV}	58,9	58,9	58,8
L _{3,A10kV} - N _{A10kV}	59,0	59,0	59,1
N _{A10kV} - E	6,30	37,3	22,2

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 23 erkennt man speiseseitig, dass die Leiter-Leiter-Spannungen und Phasenspannungen unverändert bleiben, es aber zu einer erheblichen Änderung der Leiter-Erde-Spannungen kommt. Des Weiteren kommt es zu einer (lastabhängigen) Verschiebung des Erdpotentials.

Tabelle 24: Messung des Stromes im Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler, bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, OS)

(Netzkuppeltrafo 10 kV, US)	Gemessener Strom (Fall 2)		
Trafo 1, US	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,A10kV} - L_{1,A10kV}$	7,00	9,30	8,30
$L_{2,A10kV} - L_{2,A10kV}$	5,90	26,8	22,2
$L_{3,A10kV} - L_{3,A10kV}$	< 0,01	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Durch den Fehler und die Last nimmt der Laststrom in Phase L2 um ca. 30 – 50 % ab verglichen mit den Werten aus Tabelle 22 (siehe Tabelle 24). Die Phasenströme des Außenleiters L1 weisen geringe Unterschiede bei Leerlauf und Belastung auf und werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen.

Tabelle 25: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

(Umspanner 10 kV)	Gemessene Spannung (Fall 2)		
Trafo 2, OS	$U_{F,LL}$ * in V	$U_{F,L'}$ in V	$U_{F,L''}$ in V
-			
L _{1,B10kV} - E	60,0	84,9	70,7
L _{2,B10kV} - E	53,1	21,2	36,8
L _{3,B10kV} - E	< 0,01	< 0,01	< 0,01
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	102	102	102
L _{2,B10kV} - L _{3,B10kV}	53,1	21,3	36,8
L _{3,B10kV} - L _{1,B10kV}	60,0	84,9	70,7
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	52,9	62,2	57,2
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	50,3	40,0	45,4
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	16,5	23,4	15,9
N _{B10kV} - E	16,5	23,4	15,9

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 25 erkennt man, dass die Spannung zwischen L_{1,B10kV} - L_{2,B10kV} der üblichen verketteten Spannung entspricht. Da ein Magnetisierungsstrom fließt wird in L₃-N eine Spannung induziert und es kommt zu einer Sternpunktverschiebung.

Tabelle 26: Messung des Stromes im Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler, bei Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS)

(Umspanner 10 kV, OS) Trafo 2, OS	Gemessener Strom (Fall 2)		
	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA	I_L'' in mA
-			
$L_{1,B10kV} - L_{1,B10kV}$	7,10	9,50	8,30
$L_{2,B10kV} - L_{2,B10kV}$	5,90	26,8	15,2
$L_{3,B10kV} - L_{3,B10kV}$	4,10	25,0	14,7

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 26 erkennt man, dass die Ströme im Fehlerfall unter Belastung um ca. 37 % zunehmen. Der Strom des Außenleiters L2 ist nahezu ident mit dem Strom des Außenleiters L3. Die Phasenströme des Außenleiters L1 werden durch die Magnetisierung des Transformators (siehe Abbildung 19) hervorgerufen.

Tabelle 27: Spannungsmessung im Leerlauf und mit Last bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler

(Verbraucher 0,4 kV) Trafo 2, US	Gemessene Spannung (Fall 2)		
	$U_{F,LL}$ * in V	$U_{F,L'}$ in V	$U_{F,L''}$ in V
-			
$L_{1,B0,4kV} - E$	31,6	36,9	34,5
$L_{2,B0,4kV} - E$	23,0	16,0	22,0
$L_{3,B0,4kV} - E$	8,00	8,08	5,55
$L_{1,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	105	104	105
$L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	54,6	16,4	35,5
$L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	61,8	88,6	73,0
$L_{1,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	54,6	64,3	59,1
$L_{2,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	51,9	39,8	46,1
$L_{3,B0,4kV} - N_{B0,4kV}$	16,8	24,4	15,5
$N_{B0,4kV} - E$	3,70	4,30	3,10

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R$: 680 Ω .

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – $1 \times R$: 3000 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 27 erkennt man, dass die Spannung zwischen $L_{1,B10kV} - L_{2,B10kV}$ der üblichen verketteten Spannung entspricht.

Wird ein Verbraucher angeschlossen, steigt die verkettete Spannung zwischen $L_{3,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$ nicht ganz auf die gesunde verkettete Spannung an wohingegen die verkettete Spannung zwischen $L_{2,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$ zusammenbricht und es zu einer Sternpunktverschiebung kommt.

Tabelle 28: Messung des Stromes im Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler, bei Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV)

(Verbraucher 0,4 kV) Trafo 2, US	Gemessener Strom (Fall 2)		
	I_{LL}^* in mA	$I_{L'}^*$ in mA	$I_{L''}^*$ in mA
-	< 0,01	< 0,01	< 0,01
$L_{1,B0,4kV} - L_{1,B0,4kV}$	< 0,01	23,7	11,8
$L_{2,B0,4kV} - L_{2,B0,4kV}$	< 0,01	23,7	11,8
$L_{3,B0,4kV} - L_{3,B0,4kV}$	< 0,01	23,7	11,8

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 680 Ω.

“ Index „L“ entspricht der Messung bei asymmetrischer-ohmscher Last (einphasig) – 1 x R: 3000 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 28 erkennt man, dass der lastabhängige Strom des Außenleiters L2 gleich dem Strom des Außenleiters L3 ist.

4.7.2 Zeigerdiagramme – Fall 2

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

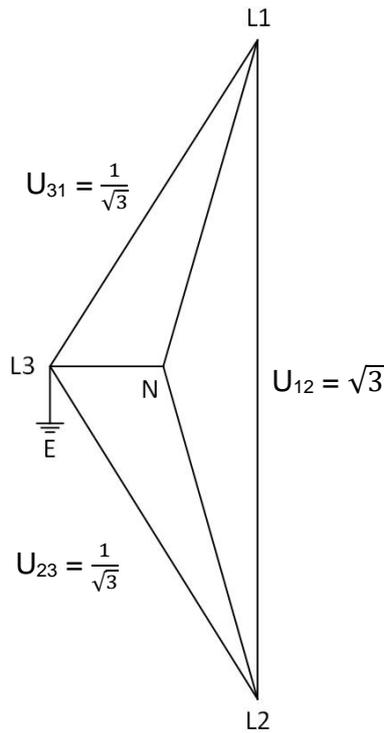


Abbildung 55: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler, Theorie

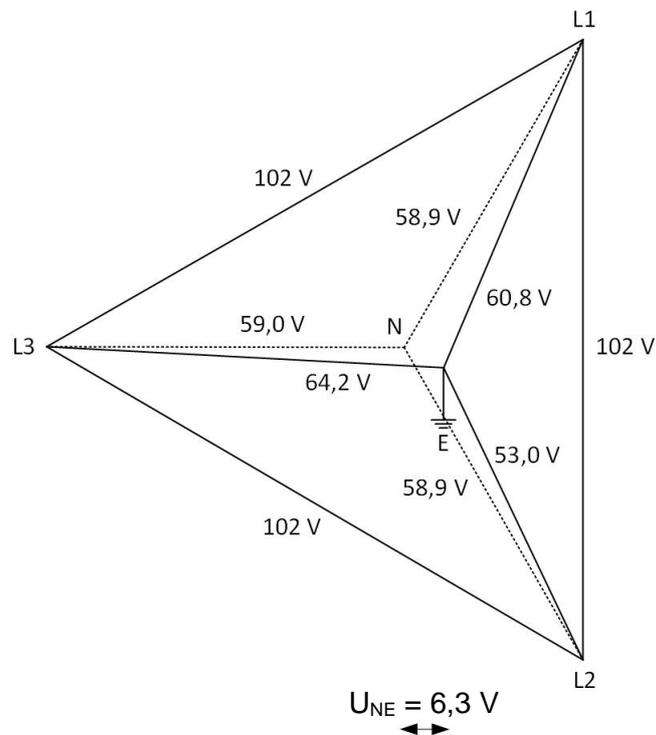


Abbildung 56: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – Leerlauf

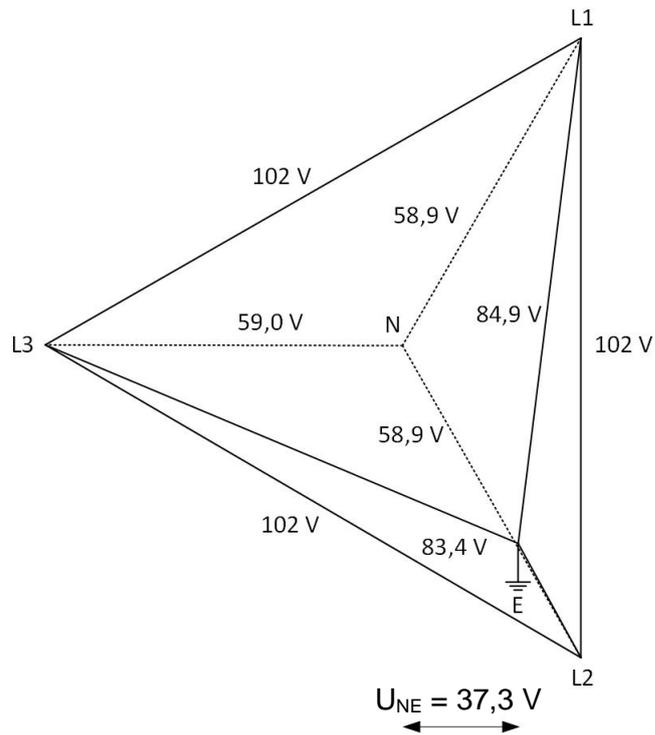


Abbildung 57: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupplutrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – mit $R = 680 \Omega$ als Last

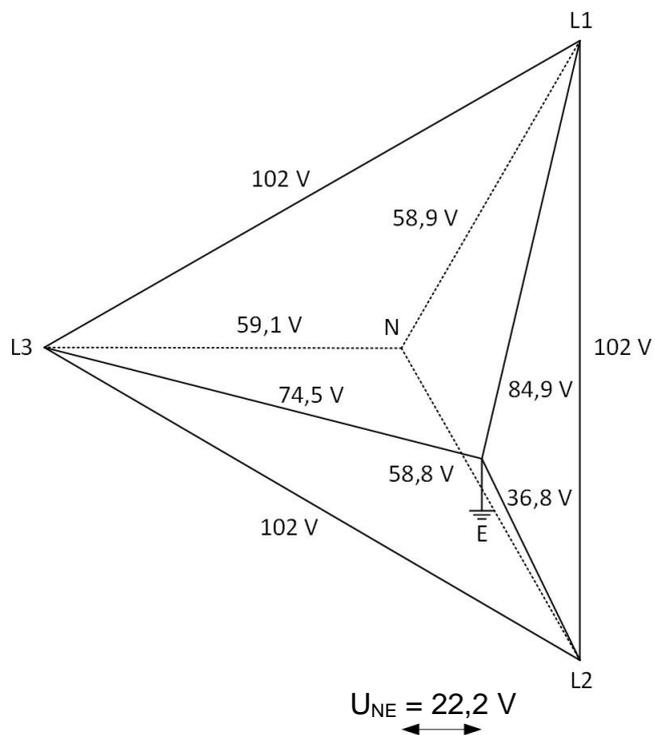


Abbildung 58: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupplutrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last

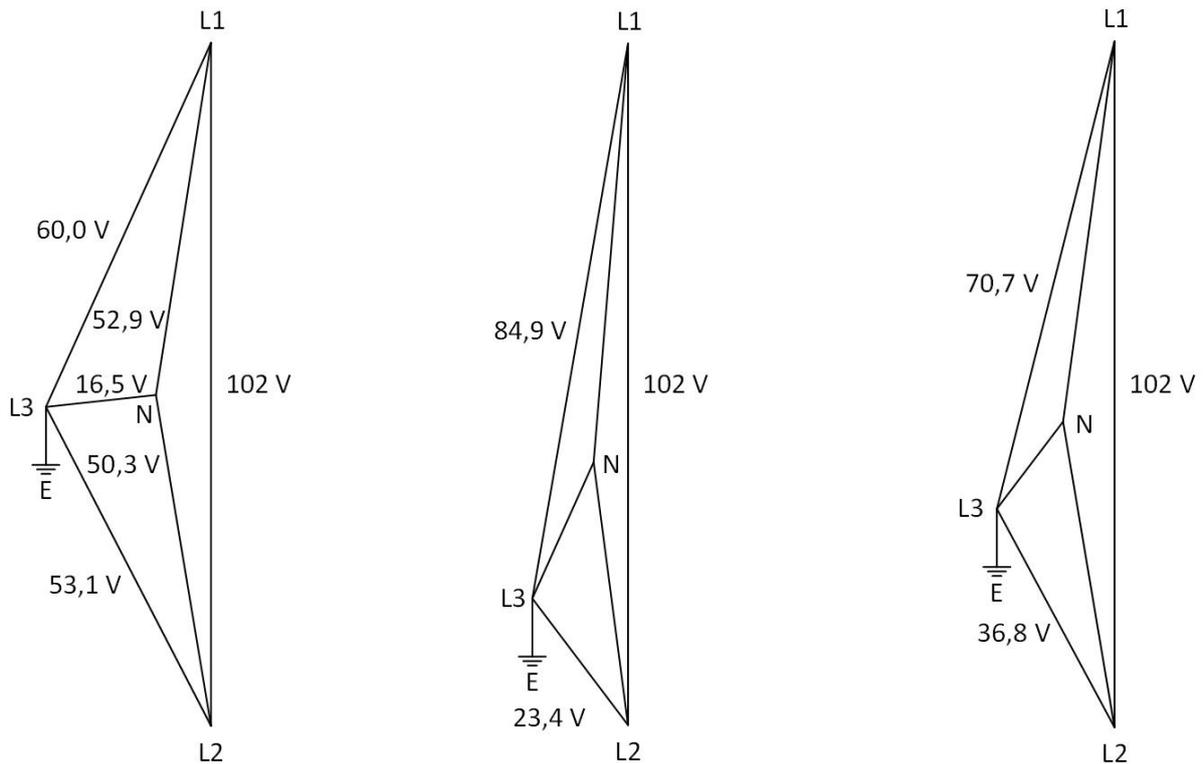


Abbildung 59: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last

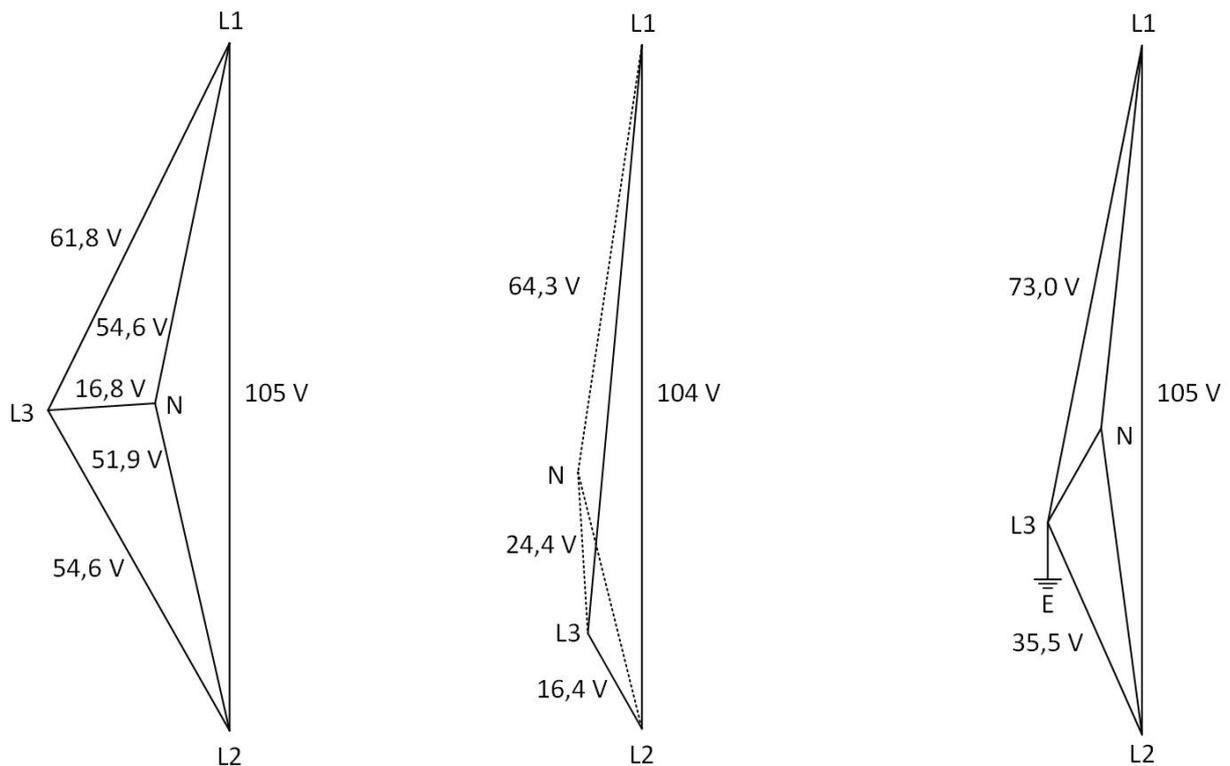


Abbildung 60: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse sehr ähnlich mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 60 ist es nicht möglich, das Erdpotential einzuzeichnen, da der 10/0,4kV-Umspanner sekundärseitig nicht geerdet wird. Somit ist eine Spannungsmessung gegen Erde (L-E) nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden die Leiter-Erde-Spannungen nicht eingezeichnet.

Abbildung 60 zeigt die größte Abweichung vom theoretischen Zeigerdiagramm an, dies kommt durch den Versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung. Weitere Abweichungen entstehen durch Asymmetrien verursacht durch die Transformatoren.

5 Untersuchung eines 3-Phasen-Transformators

5.1 Messaufbau

Im Labor des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze der TU-Graz wird die Störung anhand des Netzmodelles nachgebildet (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62).

Die nachfolgenden Untersuchungen werden in 4 Phasen unterteilt:

5.3 Gesundes Netz (Phase 0)

5.4 Stehender Erdschluss (regulär – Phase 1)

5.5 Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

5.6 Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

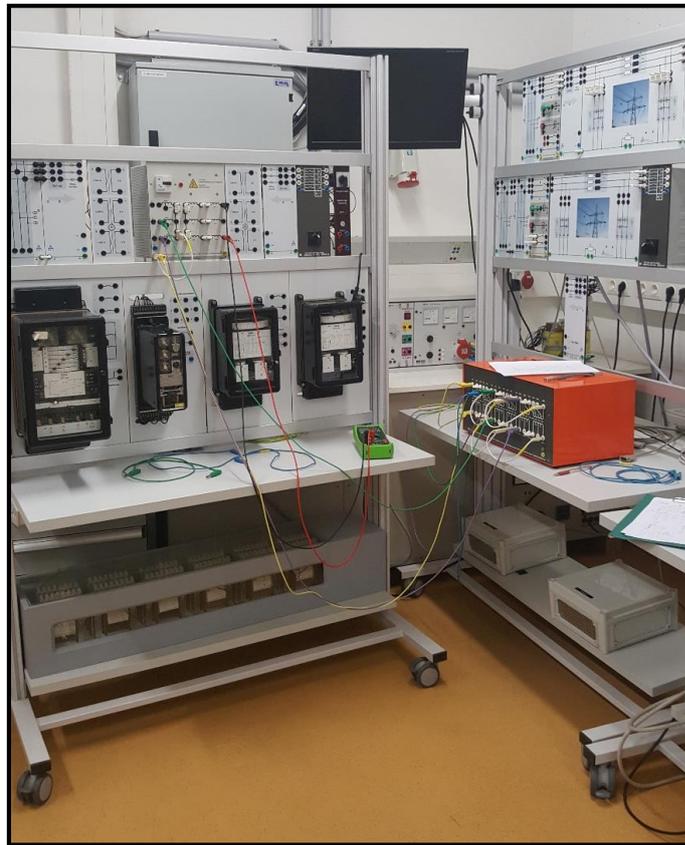


Abbildung 61: Laboraufbau (Gesamtansicht)

Als Quelle dient ein Prüfgerät der Fa. Omicron, das praktisch* unabhängig von der Belastung eine konstante dreiphasige Spannung einspeist.

* Eine Ausnahme ist die Phase 3 der Störung, bei der durch die massiv überhöhten Spannungen (Faktor 2,6 p.u.) die Modelltransformatoren in Sättigung gerieten und die Strombelastbarkeit der Quelle überschritten. Die Quelle hat daraufhin zurückgeregelt.

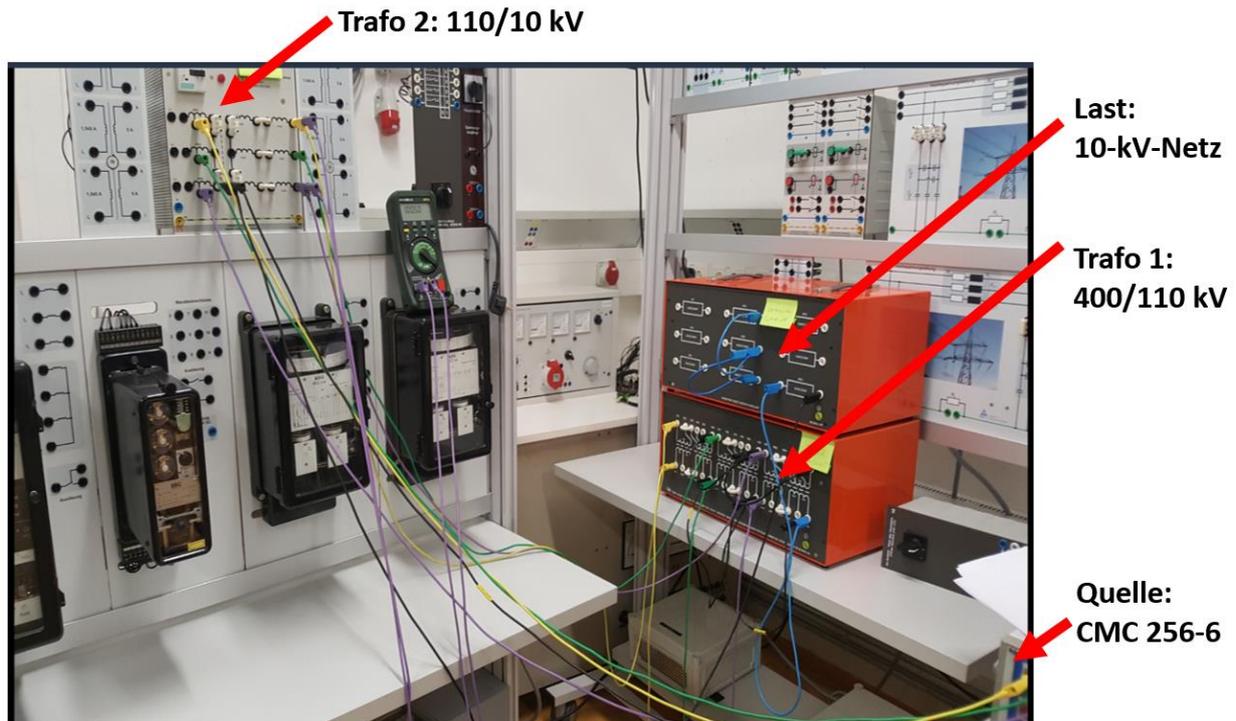


Abbildung 62: Laboraufbau (Detailansicht)

Ganz rechts im Bilde wird die Quelle, die den Transformator 1 (Netzkuppltransformator) mit einer Spannung von 100 V (verkettet) speist, dargestellt. Dieser, mit der Schaltgruppe YNyn0, Transformator wird primärseitig (Oberspannungsseite) in Stern geschaltet und direkt mit Erde verbunden. Die Sekundärseite (Unterspannungsseite) wird ebenfalls in Stern geschaltet, aber nicht mit Erde verbunden. Unterspannungsseitig wird der Netzkuppltransformator über Messstrippen (entspricht der 110-kV-Leitung laut Messschaltung) mit dem Transformator 2 (110/10kV-Umspanner), welcher die Schaltgruppe Yyn0 hat, verbunden. Bei diesem Transformator wird der Sternpunkt, um den Überspannungsableiter nachzustellen, nur dann mit Erde verbunden, wenn der Überspannungsableiter ausgelöst (ansonsten Leerlauf). Der Transformator 2 wird mit einem dreiphasigen ohmschen Verbraucher, welcher in Stern geschaltet wird (3 x 680 Ω Widerstand) belastet.

Zwischen Trafo 1, US und Trafo 2, OS (also bei der 10-kV-Leitung - Strippen) werden die verschiedenen Fehlerfälle geschaltet und alle Messungen an den Messpunkten durchgeführt.

5.2 Maßstabsfragen

Beim Netzmodell wird die Spannungen so gewählt, dass die Nennspannung (110 kV bzw. 10 kV) als 100 Volt/Modell wiedergegeben werden. Die Außenleiter-Nennspannung beträgt demnach 57,7 V – entspricht 100 V verkettet.

5.3 Gesundes Netz (Phase 0)

Beim gesunden Netz handelt es sich um das „fehlerfreie“ Netz.

5.3.1 Überblick – Gesundes Netz

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Statt YNyn0d5 wird eine Trafobank (YNyn0) verwendet dies ist zulässig, da wegen des offenen Sternpunktes bei Trafo 1 (siehe Abbildung 67) kein Nullsystem auftritt.
- Leerlauf statt der 110-kV-Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt 10-kV-Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist jeweils 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{KS} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwidestand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

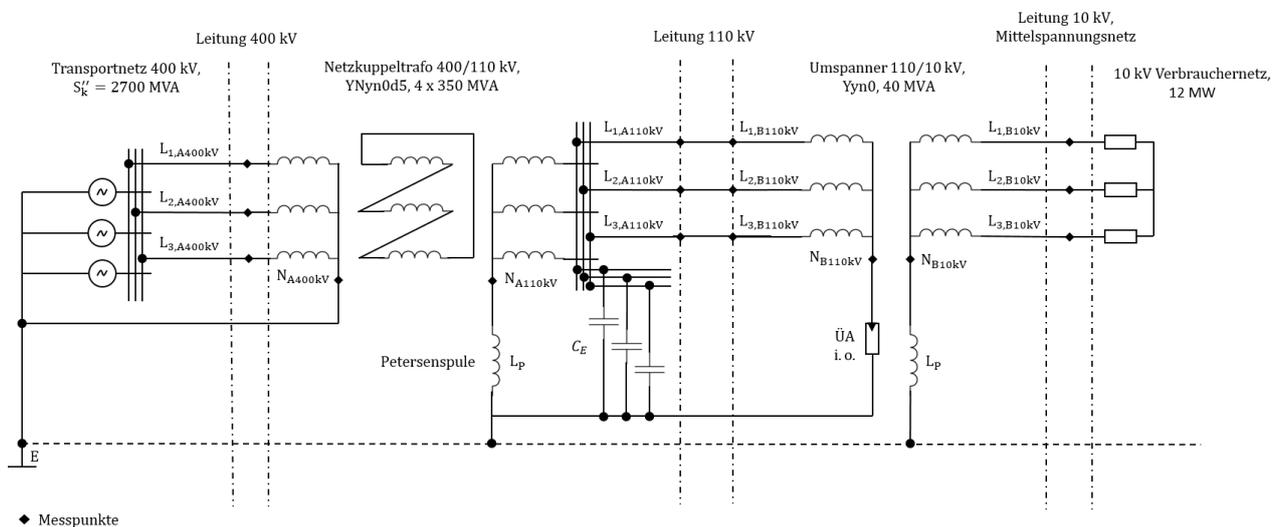


Abbildung 63: Netzsituation – Gesundes Netz (Phase 0)

Hier handelt es sich um das gesunde (fehlerfreie) Netz. Die Last (3 x 680 Ω Widerstand) wird über den 110/10kV-Umspanner (Umspanner – Trafo 2) versorgt.

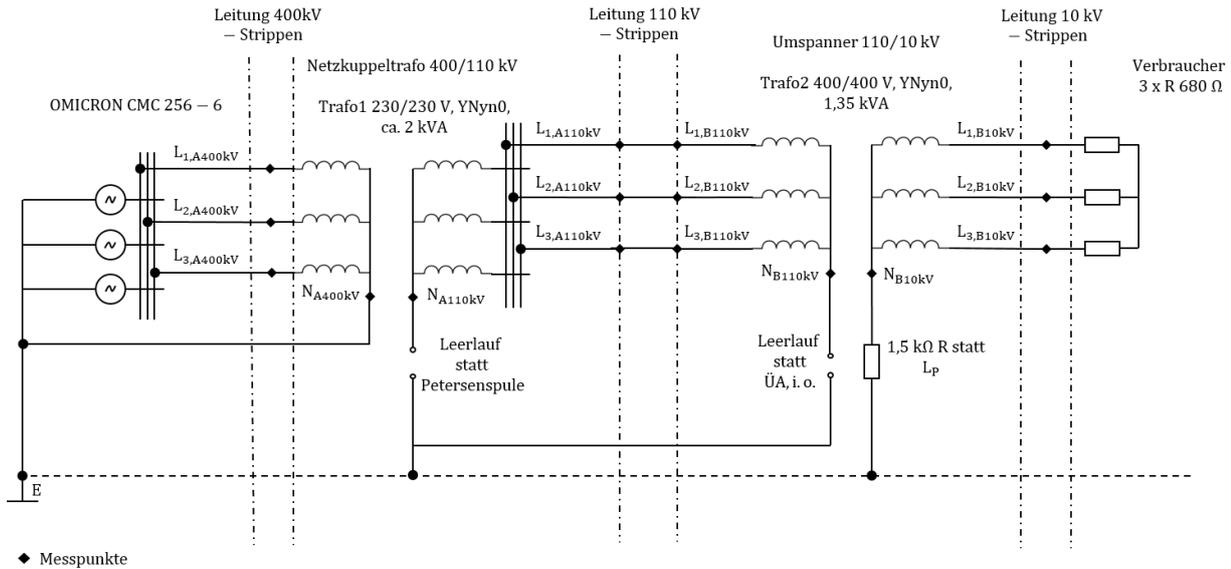


Abbildung 64: Laboruntersuchung – Gesundes Netz (Phase 0)

Abbildung 64 zeigt den im Labor umgesetzten Aufbau des fehlerfreien Netzes. Die Last (3 x 680 Ω Widerstand) wird über den 110/10kV-Umspanner (Umspanner – Trafo 2) versorgt. Die Strom- und Spannungsmessung wird an den markierten Messpunkten vorgenommen.

5.3.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz

Sowohl das messtechnisch als auch das theoretisch hergeleitete Spannungsdreieck sehen wie folgt aus:

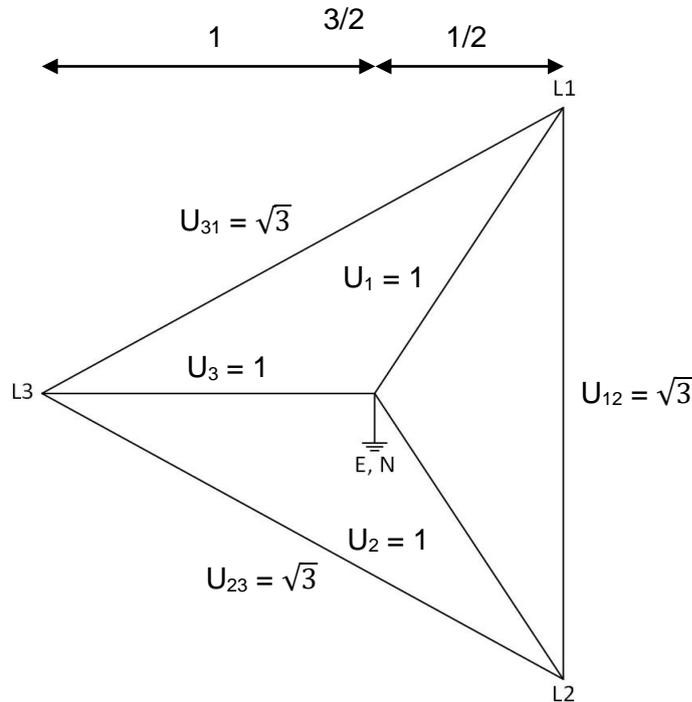


Abbildung 65: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck des gesunden Netzes (Phase 0), Theorie und Laboruntersuchung (Praxis)

Als verkettete Spannung (zwischen L1-L2, L2-L3 und L3-L1) wird eine Spannung in Höhe von 100 V angelegt. Die Leiter-Erde-Spannung U_{LE} entspricht somit $57,7 \text{ V} \left(\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}} \right)$ und die Leiter-Sternpunkt-Spannung entspricht ebenfalls 57,7 V. Zwischen Sternpunkt und Erde tritt keine Spannung auf.

5.3.3 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz

Hierbei handelt es sich um das gesunde (fehlerfreie) Netz. Somit gibt es hier keine Leitungsunterbrechung.

5.3.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Gesundes Netz

Da es sich hierbei um den fehlerfreien Fall handelt, entsprechen die Spannungsverhältnisse an allen Messpunkten (siehe 5.3.6 Zeigerdiagramme – Gesundes Netz) den idealen Spannungsverhältnissen.

5.3.5 Messungen – Gesundes Netz

Die auftretenden Strom- und Spannungspegel beim Laboraufbau sind wie erwartet kein Problem für die angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 63 und Abbildung 64), weshalb eine Spannung in Höhe von 100 V (verkettet) kein Problem für die Betriebsmittel darstellt.

5.3.5.1 Spannungsmessung – Gesundes Netz

Mittels Einstellung der Quelle (Omicron CMC256-6) wird auf eine bei Leerlauf annähernd der Nennspannung des zu untersuchenden „110-kV-Netzes“ (Leitungen zwischen Trafo 1 und Trafo 2) entsprechende Ausgangsspannung geregelt. Nachfolgend sind die gemessenen Werte zu sehen.

Tabelle 29: Spannungsmessung im Leerlauf und in allen Fehlerfällen am Ausgang des OMICRON (Transportnetz), gültig für das gesunde Netz und alle Fehlerfälle

(Transportnetz)	Gemessene Spannung (Gesund, ohne Last (nur Magnetisierungsströme))
OMICRON	
-	$U_{G,LL}^*$ in V
L _{1,A400kV} - E	56,9
L _{2,A400kV} - E	56,9
L _{3,A400kV} - E	56,9
L _{1,A400kV} - L _{2,A400kV}	98,9
L _{2,A400kV} - L _{3,A400kV}	98,9
L _{3,A400kV} - L _{1,A400kV}	98,9
L _{1,A400kV} - N _{A400kV}	56,9
L _{2,A400kV} - N _{A400kV}	56,9
L _{3,A400kV} - N _{A400kV}	56,9
N _{A400kV} - E	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6; die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 gemessen.

Bemerkung: Die Quelle ist während der gesamten Versuchsdauer stabil und unabhängig von den jeweiligen Last- / Fehlersituationen im Netz gewesen.

5.3.5.2 Strommessung – Gesundes Netz

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,B110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 30: Messung des Stromes im gesunden Zustand bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 110 kV, US)

(Netzkuppeltrafo 110 kV, US)	Gemessener Strom	
	Trafo 1, US	
-	I_{LL}^* in mA	I_L' in mA
$L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$	8,20	84,3
$L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$	5,60	82,2
$L_{3,A110kV} - L_{3,B110kV}$	8,00	82,6

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – $3 \times R$: 680 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6, die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme werden mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet.

5.3.6 Zeigerdiagramme – Gesundes Netz

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

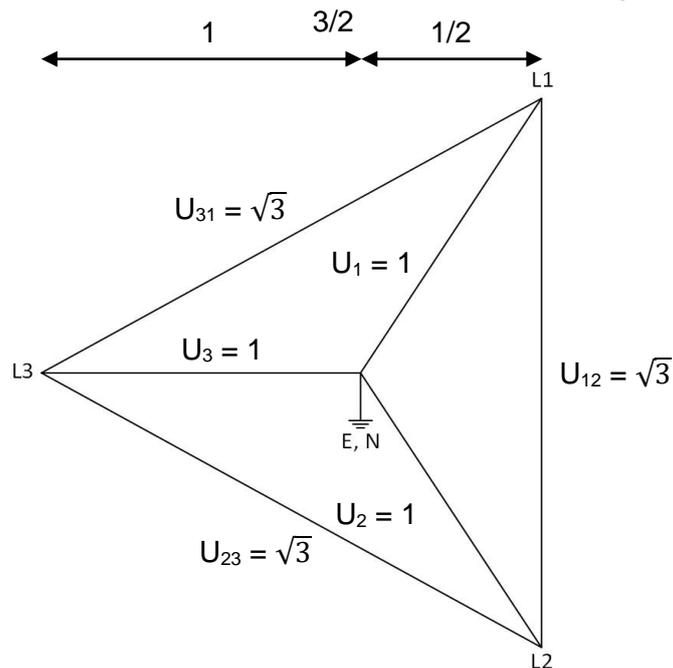


Abbildung 66: Spannungsdreieck im gesunden Netz (Phase 0), Theorie

5.4 Stehender Erdschluss (regulär – Phase 1)

Beim stehenden Erdschluss (regulär) handelt es sich um ein mit dem klassischen Erdschluss, fehlerbehaftetes Netz. Hier wird der Außenleiter L3 mit Erde verbunden.

5.4.1 Überblick – stehender Erdschluss

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Statt YNyn0d5 wird eine Trafobank (YNyn0) verwendet dies ist zulässig, da wegen des offenen Sternpunktes bei Trafo 1 (siehe Abbildung 67) kein Nullsystem auftritt.
- Leerlauf statt der 110-kV-Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt 10-kV-Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist jeweils 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{KS} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschkulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwidestand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

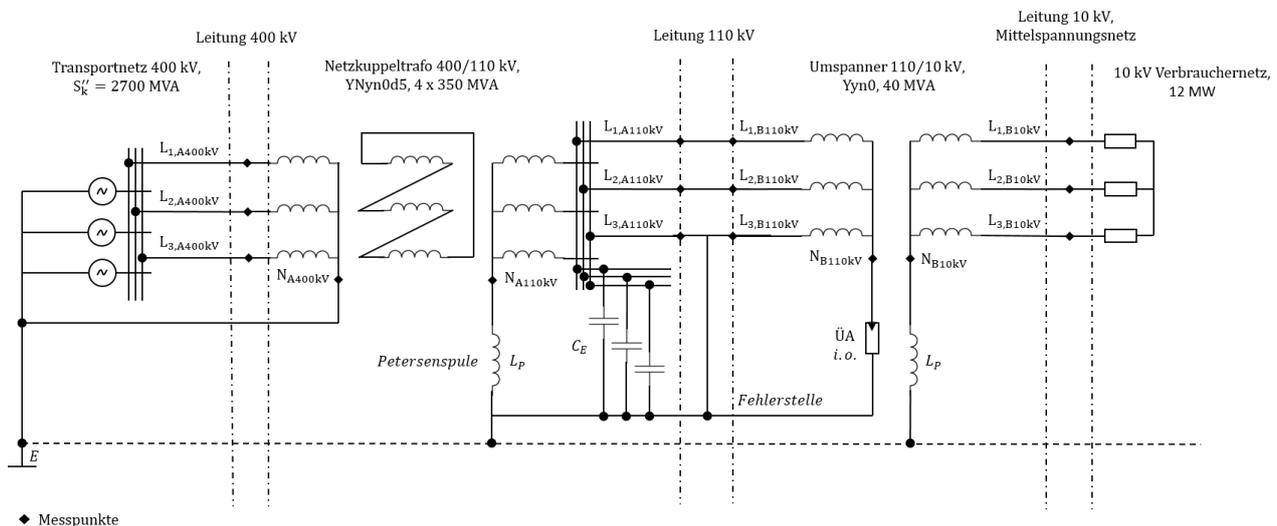


Abbildung 67: Netzsituation – stehender Erdschluss (Phase 1)

In Abbildung 67 wird die Netzsituation bei einem regulären Erdschluss für den Fall, dass der Außenleiter L3 auf der Unterspannungsseite des Netzkupplertrafos (Trafo 1, US) mit Erde verbunden wird dargestellt.

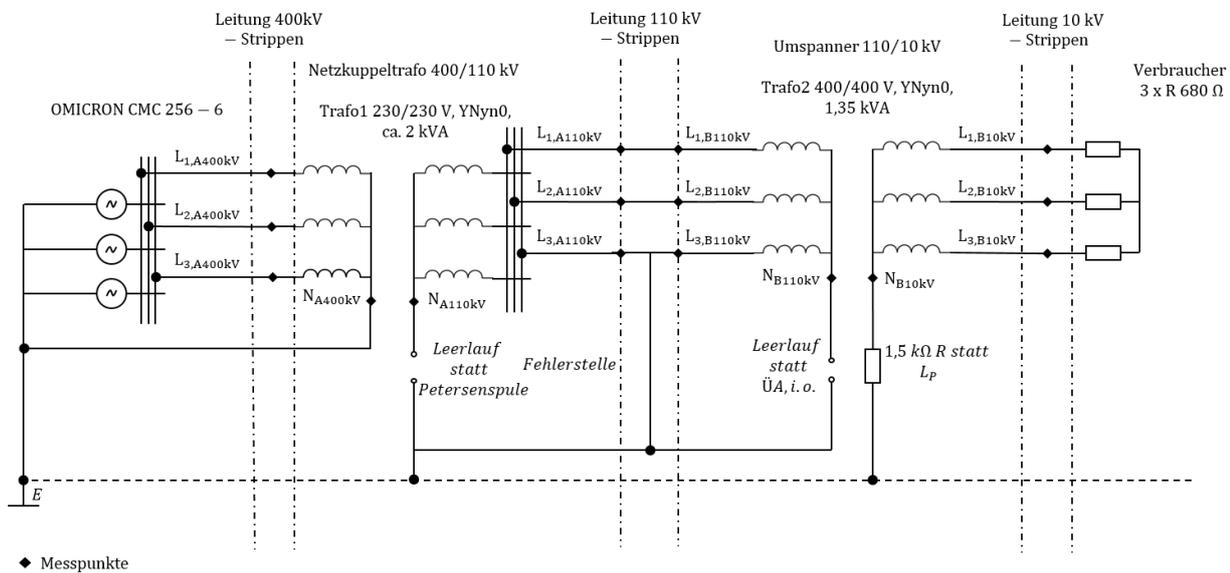


Abbildung 68: Laboruntersuchung – stehender Erdschluss (Phase 1)

Abbildung 68 zeigt den im Labor umgesetzten Aufbau des Netzes mit Erdschluss auf der Unterspannungsseite von Trafo 1 (Phase L3). Statt der Petersenspule beim Sternpunkt des Netzkupplertrafos wird der Sternpunkt nicht mit Erde verbunden (Leerlauf). Der überspannungsseitige Sternpunkt des 110/10kV-Transformators, der in der Netzsituation mit dem Überspannungsableiter verbunden wird, wird gleich wie der unterspannungsseitige Sternpunkt des Netzkupplertrafos nicht geredet. Unterspannungsseitig wird der 110/10kV-Transformatorsternpunkt über einen 1,5 kΩ Widerstand geerdet. Die dreipolige Last (3 x 680 Ω Widerstand) wird vom 110/10kV-Umspanner versorgt.

Der bei der 110-kV-Leitung auftretende Erdschluss zwischen der Unterspannungsseite des Netzkupplertrafos und der Oberspannungsseite des 110/10kV-Transformators wird durch die Verbindung der Strippe von L3 mit Erde realisiert.

Die Strom- und Spannungsmessungen werden an den markierten Messpunkten vorgenommen.

5.4.1 Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss

Das theoretische Spannungsdreieck sieht wie folgt aus:

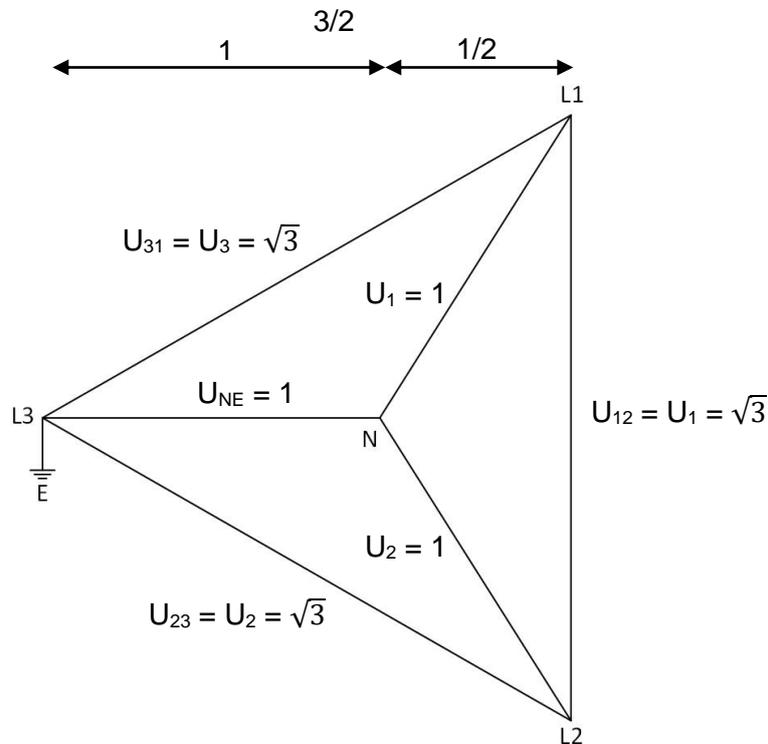


Abbildung 69: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim stehenden Erdschluss (Phase 1), Theorie

Als verkettete Spannung (zwischen L1-L2, L2-L3 und L3-L1) wird eine Spannung in Höhe von 100 V angelegt. Die vom Erdschluss nicht betroffenen Außenleiter (L1 und L2) erfahren eine Spannungserhöhung auf das $\sqrt{3}$ -fache. Die Leiter-Erde-Spannungen U_{LE1} und U_{LE2} sind gleich 100 V ($57,7 \text{ V} \cdot \sqrt{3}$). Die Leiter-Sternpunkt-Spannungen bleiben unverändert ($57,7 \text{ V}$ bzw. $\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}}$). Zwischen Sternpunkt und Erde tritt eine Spannung in Höhe der Phasenspannung (57,7 V) auf.

5.4.2 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss

Beim stehenden Erdschluss gibt es keine Leitungsunterbrechung.

5.4.3 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – stehender Erdschluss

Da es sich hierbei um das Netz mit Erdschluss handelt, entsprechen die Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung an allen Messpunkten (siehe Kapitel 5.4.1 Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss) den idealen Spannungsverhältnissen (siehe Kapitel 5.3.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz).

5.4.4 Messungen – stehender Erdschluss

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 67 und Abbildung 68) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten.

5.4.4.1 Spannungsmessungen – stehender Erdschluss

Tabelle 31: Spannungsmessung bei Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 110 kV, US), stehender Erdschluss (regulär – Phase 1). Die gemessenen Spannungen sind – bis auf die jeweiligen L-N-Spannungen die gleichen wie am Trafo 2, OS

(Netzkupfeltrafo 110 kV, US)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
Trafo 1, US		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
L _{1,A110kV} - E	101	100
L _{2,A110kV} - E	102	101
L _{3,A110kV} - E	< 0,01	< 0,01
L _{1,A110kV} - L _{2,A110kV}	102	101
L _{2,A110kV} - L _{3,A110kV}	102	101
L _{3,A110kV} - L _{1,A110kV}	101	100
L _{1,A110kV} - N _{A110kV}	58,1	57,6
L _{2,A110kV} - N _{A110kV}	58,8	58,5
L _{3,A110kV} - N _{A110kV}	58,3	58,1
N _{A110kV} - E	58,3	58,1

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 31 erkennt man das typische (verschobene) Spannungsdreieck bei Erdschluss mit unveränderten Leiter-Leiter-Spannungen und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt.

Durch die Last verringern sich die Spannungspegel unwesentlich (ca. -1%).

Tabelle 32: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – stehender Erdschluss (regulär – Phase 1)

(Verbrauchernetz 10 kV) Verbraucher	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
-		
L _{1,B10kV} - E	59,8	59,8
L _{2,B10kV} - E	60,6	60,6
L _{3,B10kV} - E	59,9	59,9
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	105	105
L _{2,B10kV} - L _{3,B10kV}	105	105
L _{3,B10kV} - L _{1,B10kV}	104	104
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	59,8	59,8
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	60,6	60,6
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	59,9	59,9
N _{B10kV} - E	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 32 erkennt man das typische (nicht verschobene) Spannungsdreieck auf der Verbraucherseite, das vom Erdschluss entkoppelt ist.

Durch die Last verringern sich die Spannungspegel de facto im Rahmen der Messgenauigkeit nicht.

5.4.4.2 Strommessung – stehender Erdschluss

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$ und $L_{3,A110kV} - L_{3,B110kV}$ durchgeführt.

Tabelle 33: Messung des Stromes bei Trafo 1, US (Netzkuppltrafo 110 kV, US) – stehender Erdschluss (regulär – Phase 1)

(Netzkuppltrafo 110 kV, US) Trafo 1, US	Gemessener Strom (Fehlerfall)	
	$I_{F,LL}^*$ in mA	$I_{F,L}'$ in mA
-		
$L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$	8,2	83,5
$L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$	5,6	82,2
$L_{3,A110kV} - L_{3,B110kV}$	39,2	120

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – $3 \times R$: 680 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Wie man aus Tabelle 33 entnehmen kann, steigen die Phasenströme unter Belastung enorm an. Dies ist wiederum auf die vom Erdschluss verursachte Asymmetrie und dadurch verbundenen Flussaddition in den Schenkeln zurückzuführen.

5.4.5 Zeigerdiagramme – stehender Erdschluss

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

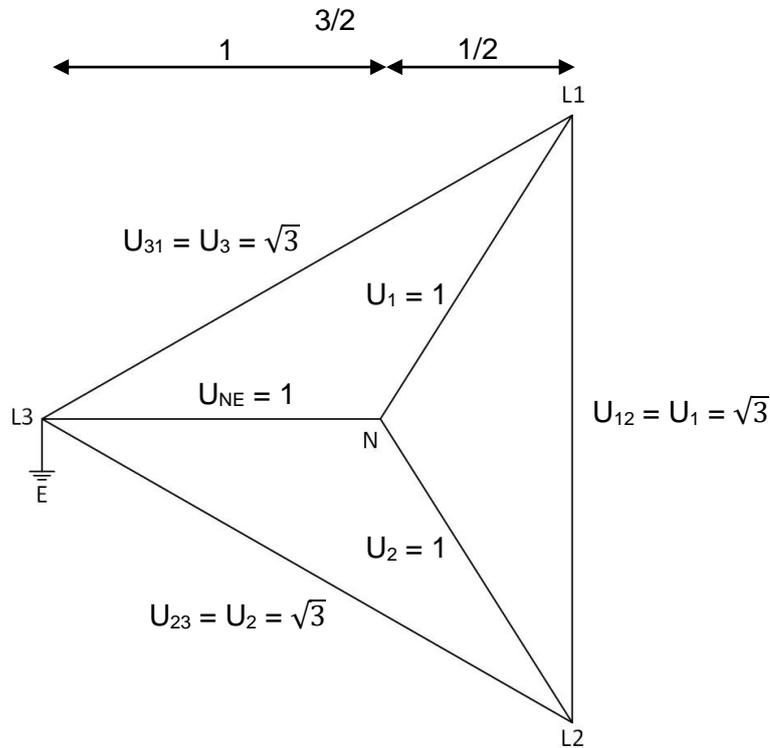


Abbildung 70: Spannungsdreieck – stehender Erdschluss (regulär – Phase 1), Theorie

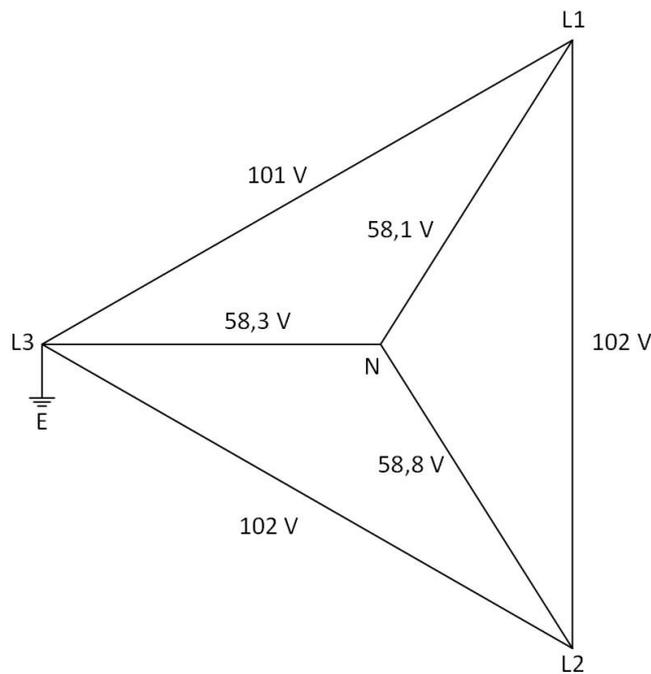


Abbildung 71: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last (+- 1%)

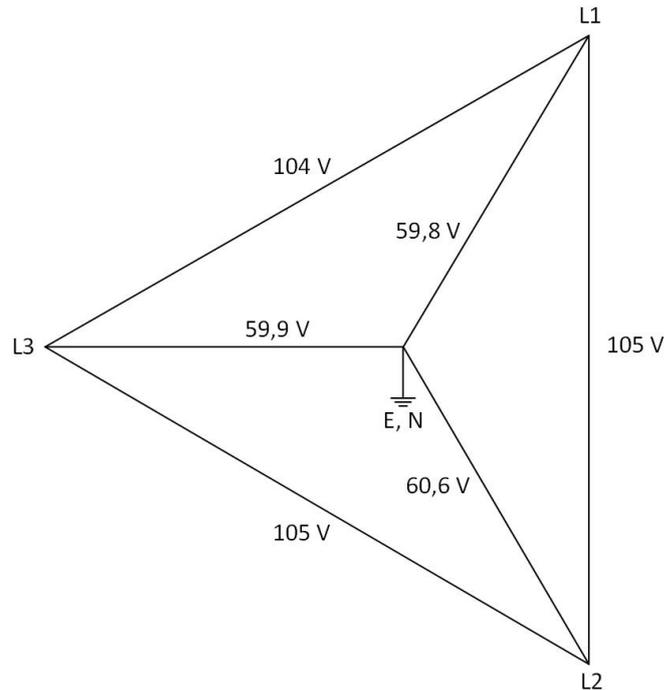


Abbildung 72: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse nahezu ident mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 72 sieht man, dass das Spannungsdreieck beim Verbraucher trotz versorgerseitigen Erdschlusses beim Außenleiter L3 praktisch den Spannungsverhältnissen des gesunden Netzes entsprechen (siehe Kapitel 5.3.2 Theoretische Spannungsverhältnisse – Gesundes Netz). Die unbelasteten Werte stimmen exakt mit den Werten überein, bei denen eine dreipolige Last angeschlossen wird.

5.5 Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

Beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite handelt es sich nicht mehr um einen klassischen Erdschluss. Zusätzlich zum unterspannungsseitigen Erdschluss (beim Netzkuppeltrafo 110 kV, US bzw. Trafo 1, US) kommt es noch zu einer Leitungsunterbrechung bzw. zu einem Leitungsriß (siehe Abbildung 73).

5.5.1 Überblick – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Statt YNyn0d5 wird eine Trafobank (YNyn0) verwendet dies ist zulässig, da wegen des offenen Sternpunktes bei Trafo 1 (siehe Abbildung 73) kein Nullsystem auftritt.
- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{Ks} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwiderstand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

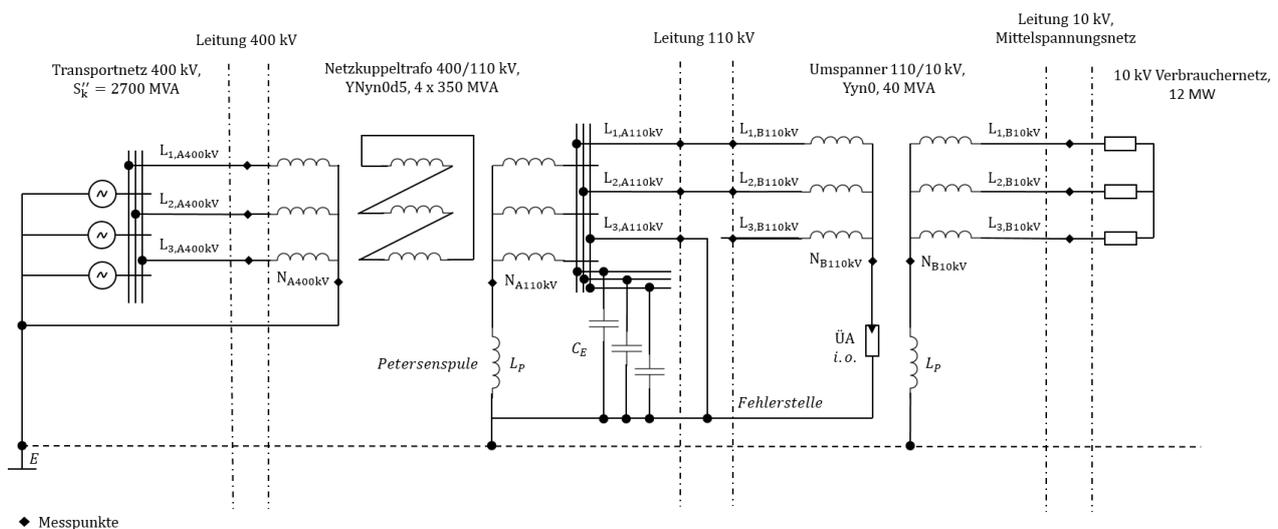


Abbildung 73: Netzsituation – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

Der in Abbildung 73 dargestellte Fall stellt die Netzsituation bei einem versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung an der Oberspannungsseite des 110/10kV-Transformators dar.

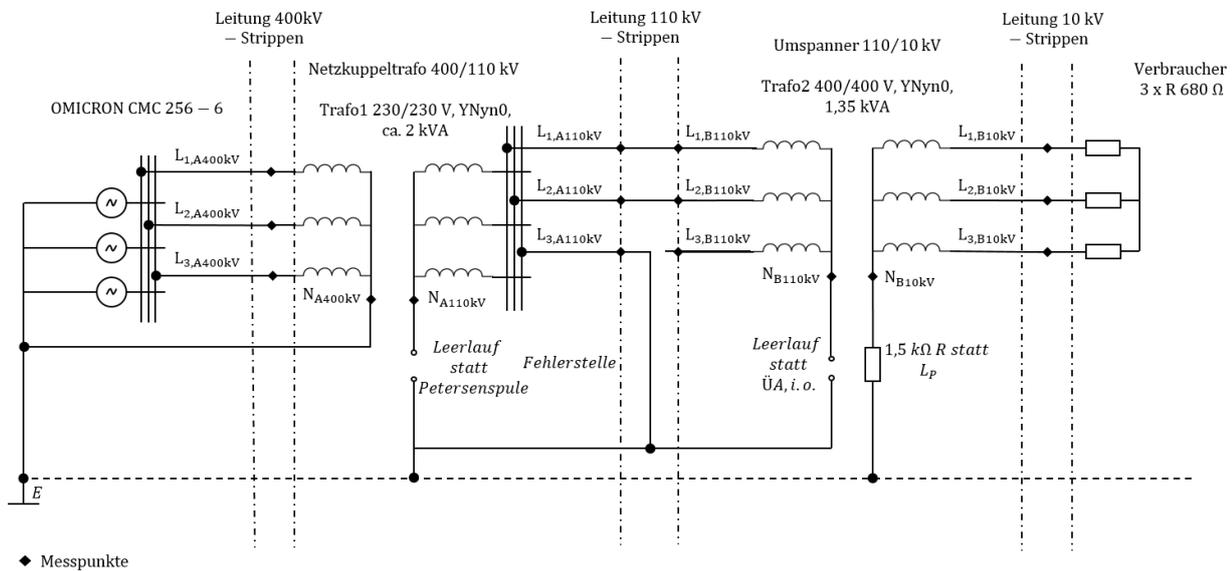


Abbildung 74: Laboruntersuchung – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

Auf Basis der Netzsituation wird die Laboruntersuchung an die vorhandenen Bauelemente angepasst. Statt der Petersenspule beim Sternpunkt des Netzkupplerttransformators wird der Sternpunkt nicht mit Erde verbunden (Leerlauf). Der oberspannungsseitige Sternpunkt des 110/10kV-Transformators, der in der Netzsituation mit dem Überspannungsableiter verbunden wird, wird gleich wie der Sternpunkt des Netzkupplerttransformators nicht geerdet. Unterspannungsseitig wird der Sternpunkt des 110/10kV-Transformators über einen 1,5 kΩ Widerstand geerdet. Die dreiphasige ohmsche Last (3 x 680 Ω Widerstand) wird vom 110/10kV-Umspanner versorgt.

Der versorgungsseitige Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der 110-kV-Leitung wird durch die Verbindung der Strippe von L3 auf der Unterspannungsseite des Netzkupplerttransformators mit Erde und Leerlauf der Oberspannungsseite des 110/10kV-Transformators realisiert.

Die Strom- und Spannungsmessungen werden an den markierten Messpunkten vorgenommen.

5.5.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 2

Das Zeigerdiagramm nach der Leiterseilunterbrechung sieht wie folgt aus:

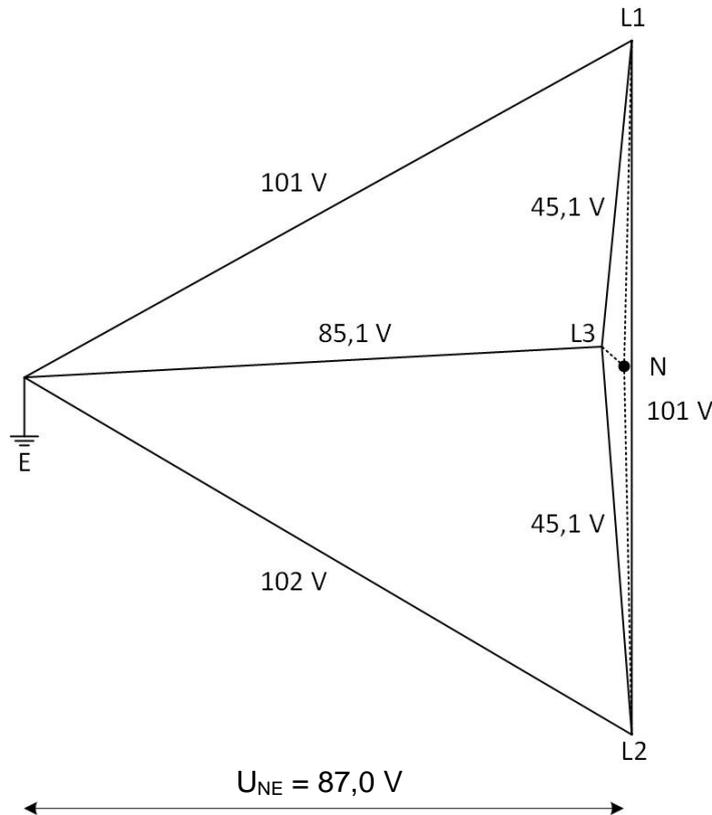


Abbildung 76: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 2
Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last

Man erkennt, dass die Laboruntersuchung (Praxis) sehr gut mit der Theorie übereinstimmt. Anzumerken ist hierbei, dass es beim Umspanner zu einer Abweichung vom idealen Zeigerdiagramm (siehe Abbildung 75) kommt. Dies ist dadurch zu erklären, dass hier bereits erste Sättigungserscheinungen auftreten und es sich bei den verwendeten Transformatoren im Labor der TU-Graz um nicht ideale Transformatoren handelt und diese gewisse Asymmetrien aufweisen.

5.5.5 Messungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 73 und Abbildung 74) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten.

5.5.5.1 Spannungsmessungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung

Tabelle 34: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall bei Trafo 1, US (Netzkupplertrafo 110 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

(Netzkupplertrafo 110 kV, US)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
Trafo 1, US		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}^{\prime}$ in V
L _{1,A110kV} - E	101	101
L _{2,A110kV} - E	102	102
L _{3,A110kV} - E	< 0,01	< 0,01
L _{1,A110kV} - L _{2,A110kV}	102	101
L _{2,A110kV} - L _{3,A110kV}	102	102
L _{3,A110kV} - L _{1,A110kV}	101	101
L _{1,A110kV} - N _{A110kV}	58,6	58,6
L _{2,A110kV} - N _{A110kV}	58,4	58,4
L _{3,A110kV} - N _{A110kV}	52,3	52,3
N _{A110kV} - E	58,3	58,3

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 34 erkennt man speiseseitig wie zuvor das typische (verschobene) Spannungsdreieck bei Erdschluss mit unveränderten Leiter-Leiter-Spannungen und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt.

Durch die Last verringern sich die Spannungspegel unwesentlich (nur L_{1,A110kV} - L_{2,A110kV}, um ca. -1 %).

Tabelle 35: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall bei Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV, OS) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

(Umspanner 110 kV)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
Trafo 2, OS		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
$L_{1,B110kV} - E$	101	101
$L_{2,B110kV} - E$	102	102
$L_{3,B110kV} - E$	85,1	85,1
$L_{1,B110kV} - L_{2,B110kV}$	101	101
$L_{2,B110kV} - L_{3,B110kV}$	56,4	56,4
$L_{3,B110kV} - L_{1,B110kV}$	45,1	45,1
$L_{1,B110kV} - N_{B110kV}$	48,8	48,8
$L_{2,B110kV} - N_{B110kV}$	52,6	52,6
$L_{3,B110kV} - N_{B110kV}$	4,40	4,40
$N_{B110kV} - E$	87,0	87,0

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – $3 \times R$: 680 Ω .

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Die vom Netzkuppeltrafo (Trafo 1 – siehe Abbildung 73 bzw. Abbildung 74) kommenden Spannungen sind die üblichen verketteten Spannungen. Die resultierenden Magnetisierungsströme in Leiter L1 und L2 müssen gegengleich sein, da weder über L3 noch über den 110-kV-Sternpunkt ein weiterer Strom die Primärseite von Trafo 1 verlassen kann.

Folglich sind die Flüsse in den der Außenleiter L1 bzw. L2 zugeordneten Schenkeln gegengleich und in Schenkel 3 fließt kein Magnetisierungsstrom, weshalb in L3-N keine (nennenswerte) Spannung aufgebaut wird.

Der Sternpunkt nimmt im Sinne eines Spannungsteilers zwischen den extern vorgegebenen Phasenspannungen L1 und L2 die (geometrisch) halbe Spannung und damit die 1,5-fache Phasenspannung gegenüber Erde an.

Die Belastung mit den Lastwiderständen wirkt sich nicht aus.

Messung bestätigt $U_{NE} = 58 \text{ V} \cdot 1,5 = 87 \text{ V} !$

Tabelle 36: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

(Verbrauchernetz 10 kV)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)		
	Verbraucher		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V	
L _{1,B10kV} - E	50,2	50,2	
L _{2,B10kV} - E	54,2	54,2	
L _{3,B10kV} - E	4,50	4,50	
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	105	105	
L _{2,B10kV} - L _{3,B10kV}	58,2	58,2	
L _{3,B10kV} - L _{1,B10kV}	46,5	46,5	
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	50,2	50,2	
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	54,2	54,2	
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	4,50	4,50	
N _{B10kV} - E	< 0,01	< 0,01	

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Aus Tabelle 36 erkennt man, dass die Verbraucher nur mit einer einzigen gesunden Spannung (L1 – L2) versorgt werden, und der verbraucherseitige Sternpunkt sich mittig einstellt. Er nimmt deswegen gegenüber Erde kein Potential an, weil 10-kV-seitig kein Erdfehlerstrom fließt (gesundes 10-kV-Netz).

5.5.5.2 Strommessung – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung

Die Strommessung wird an der 110-kV-Leitung zwischen den Messpunkten $L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$, $L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$ und $L_{3,A110kV} - E$ durchgeführt.

Tabelle 37: Messung des Stromes bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 110 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)

(Netzkuppeltrafo 110 kV, US)	Gemessener Strom (Fehlerfall)	
	Trafo 1, US	
-	$I_{F,LL}^*$ in mA	$I_{F,L}'$ in mA
$L_{1,A110kV} - L_{1,B110kV}$	6,10	71,0
$L_{2,A110kV} - L_{2,B110kV}$	6,20	71,0
$L_{3,A110kV} - E$	39,1	39,1

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

Bemerkung: Als Spannungsquelle dient das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen werden mit einem FLUKE 177 und die Ströme mit einem METRAHIT 29S gemessen.

Bei der Messung ohne Last wird die Quelle nur mit dem Magnetisierungsstrom des Trafo 2 belastet.

5.5.6 Zeigerdiagramme – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

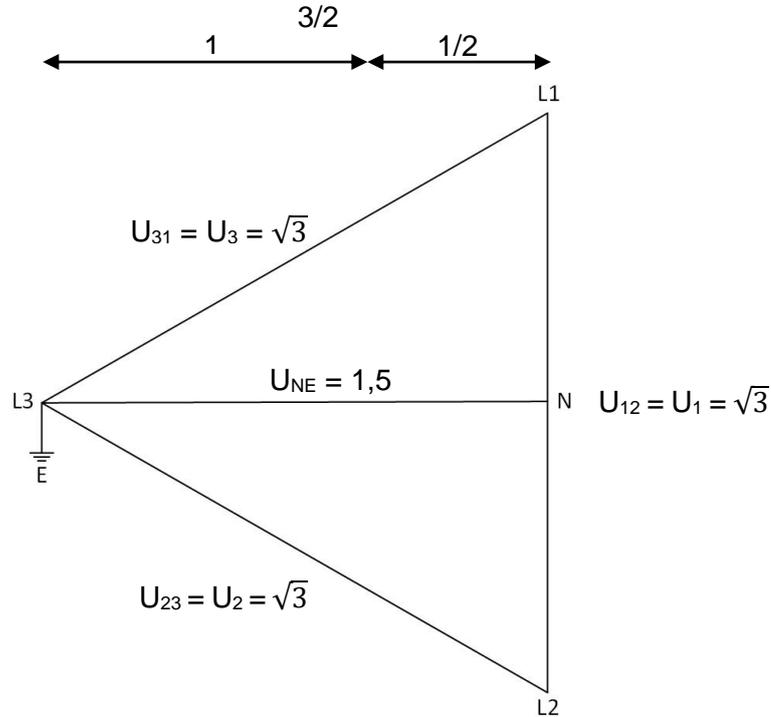


Abbildung 77: Spannungsdreieck – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2), Theorie

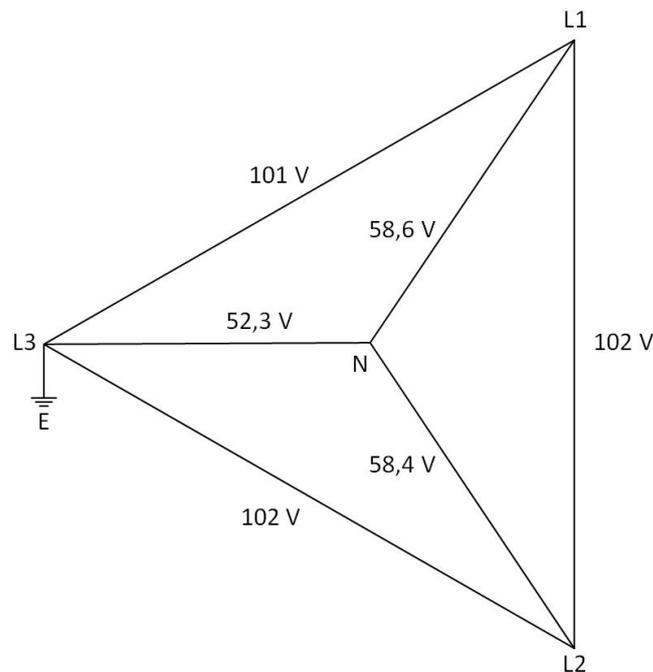


Abbildung 78: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

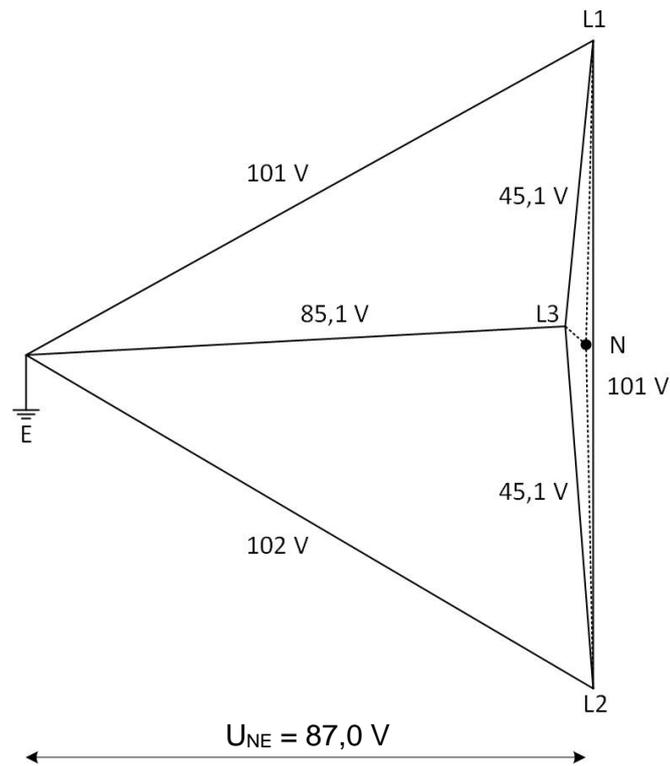


Abbildung 79: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

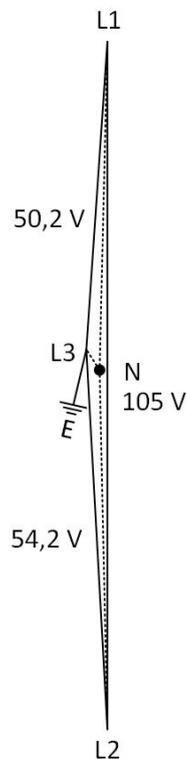


Abbildung 80: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse nahezu ident mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die geringen Abweichungen lassen sich durch Messfehler und nicht ideale Betriebsmittel und Messgeräte erklären.

In Abbildung 80 sieht man, dass die Spannung zwischen L2-L3 und L3-L1 bzw. zwischen L2-N und L3-N beim Verbraucher völlig zusammengebrochen ist. Dies ist auf den Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite zurückzuführen.

Die in Abbildung 78, Abbildung 79 und Abbildung 80 dargestellten Spannungsverhältnisse gelten sowohl für den Leerlauf als auch für Belastung ($3 \times R: 680 \Omega$).

5.6 Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

Ausgehend vom versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung und der dadurch auftretenden Überspannung (siehe Tabelle 35), wird der Einfluss des beschädigten (ausgelösten) Überspannungsableiters ÜA untersucht.

5.6.1 Überblick – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt

Unterschiede Netzmodell und Laboruntersuchung:

- Statt YNyn0d5 wird eine Trafobank (YNyn0) verwendet dies ist zulässig, da wegen des offenen Sternpunktes bei Trafo 1 (siehe Abbildung 81) kein Nullsystem auftritt.
- Leerlauf statt der Petersenspule bei Trafo 1
- 1,5 kΩ Widerstand statt Petersenspule bei Trafo 2
- Das Übersetzungsverhältnis von Trafo 1 und Trafo 2 ist 1:1

Im Falle des Fehlers treten kurzschlussartige Vorgänge auf, wobei der Kurzschlussstrom I_{KS} sehr viel größer als der Erdschlussstrom I_{CE} ist. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird nahezu komplett durch den Löschspulenstrom I_L kompensiert, da eine vollständige Kompensation allerdings nicht möglich ist, bleibt auf Grund der ohmschen Verluste ein nicht kompensierbarer (Wirk-)Reststrom übrig, der in der Ersatzschaltung durch den Sternpunktwidestand berücksichtigt wird.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messschaltungen für die Netzsituation und die Laboruntersuchung dargestellt.

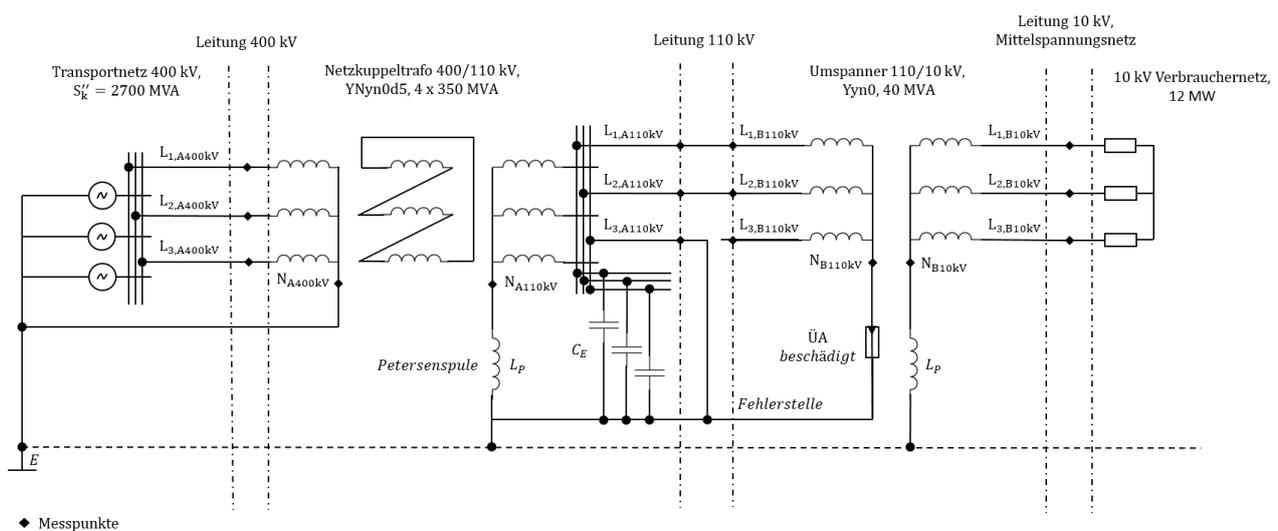


Abbildung 81: Netzsituation – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

Der in Abbildung 81 dargestellte Fall entspricht der Netzsituation bei einem versorgungsseitigen Erdschluss mit Leitungsunterbrechung an der Oberspannungsseite des 110/10kV-Transformators und zusätzlich ausgelöstem Überspannungsableiter beim oberspannungsseitigen Sternpunkt des 110/10kV-Transformators.

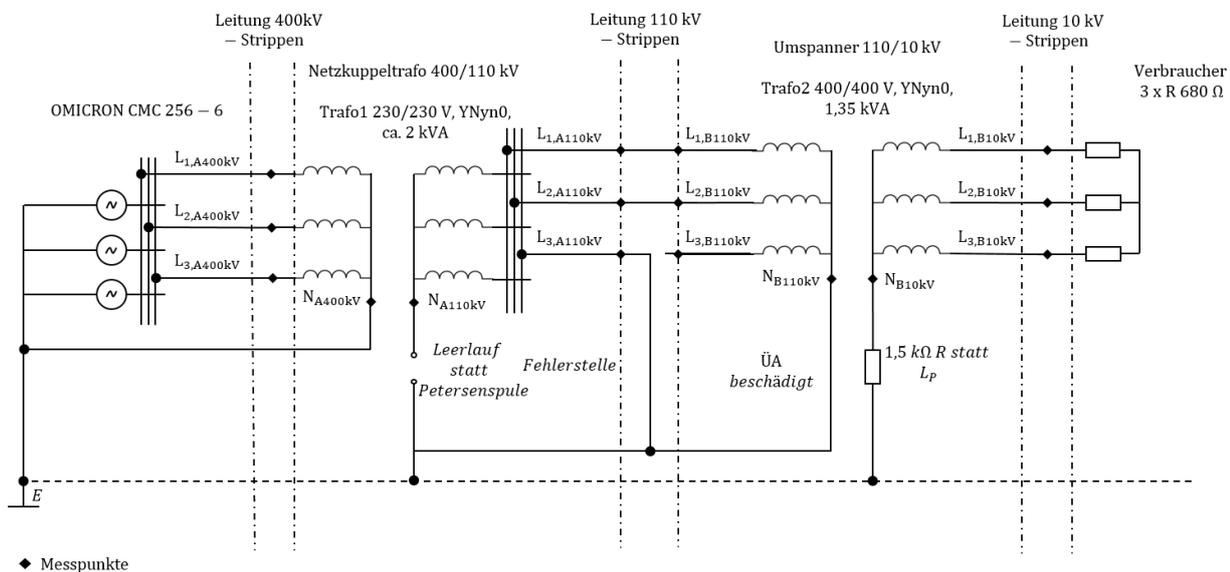


Abbildung 82: Laboruntersuchung – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

Abbildung 82 zeigt den im Labor umgesetzten Aufbau des Netzes mit Erdschluss auf der Unterspannungsseite von Trafo 1 (Außenleiter L3). Statt der Petersenspule beim Sternpunkt des Netzkupplerttransformators wird der Sternpunkt nicht mit Erde verbunden (Leerlauf). Der oberspannungsseitige Sternpunkt des 110/10kV-Transformators, der in der Netzsituation mit dem Überspannungsableiter verbunden wird, wird in diesem Fall (ÜA beschädigt) geredet. Unterspannungsseitig wird der Sternpunkt des 110/10kV-Transformators über einen 1,5 kΩ Widerstand geerdet. Die dreiphasige ohmsche Last (3 x 680 Ω Widerstand) wird vom 110/10kV-Umspanner versorgt.

Der bei der 110-kV-Leitung auftretende Erdschluss zwischen der Unterspannungsseite des Netzkupplerttransformators und der Oberspannungsseite des 110/10kV-Transformators wird durch die Verbindung der Strippe von L3 mit Erde realisiert.

Die Strom- und Spannungsmessungen werden an den markierten Messpunkten vorgenommen.

5.6.3 Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Phase 3

Die Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung entsprechen exakt den Spannungsverhältnissen wie sie beim Erdschluss auftreten (siehe Kapitel 5.4.1 Theoretische Spannungsverhältnisse – stehender Erdschluss bzw. Abbildung 69).

5.6.4 Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 3

Das Zeigerdiagramm nach der Leiterseilunterbrechung sieht wie folgt aus:

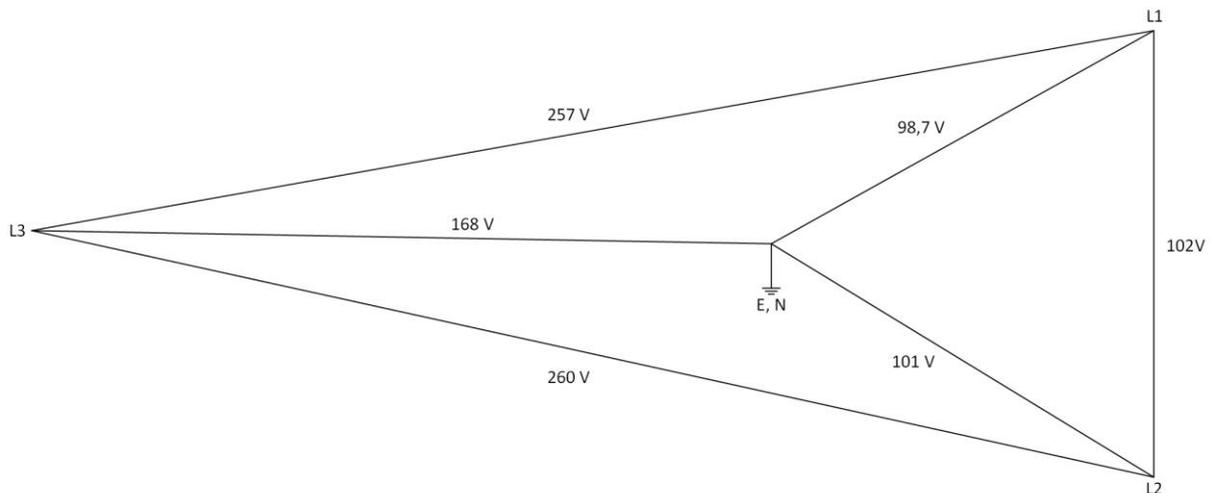


Abbildung 84: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung und beschädigtem Überspannungsableiter – Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – unbelastete Werte

Man erkennt, dass die Laboruntersuchung (Praxis) sehr gut mit der Theorie übereinstimmt. Geringe Abweichungen vom idealen Zeigerdiagramm lassen sich durch Sättigungserscheinungen und die nicht idealen Transformatoren bzw. die nicht ideale Quelle erklären.

Die Spannungsreduktion bei Belastung resultiert aus der Sättigung des Trafos 2 – sowohl im Modell als auch erwartungsgemäß in der Realität, welche unter Lasteinfluss besonders ausgeprägt ist.

5.6.5 Messungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt

Die Spannungspegel beim Laboraufbau werden wegen der zu erwartenden Überspannungen bewusst auf die Hälfte der angeschlossenen Betriebsmittel (Trafo 1 und Trafo 2, siehe Abbildung 81 und Abbildung 82) ausgelegt, um den Einfluss der Sättigung gering zu halten und so ein klareres Fehlerbild zu erhalten.

5.6.5.1 Spannungsmessungen – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt

Tabelle 38: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall bei Fehlerfall bei Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 110 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

(Netzkuppeltrafo 110 kV, US)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
Trafo 1, US		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
L _{1,A110kV} - E	101	101
L _{2,A110kV} - E	102	102
L _{3,A110kV} - E	< 0,01	< 0,01
L _{1,A110kV} - L _{2,A110kV}	102	101
L _{2,A110kV} - L _{3,A110kV}	102	102
L _{3,A110kV} - L _{1,A110kV}	101	101
L _{1,A110kV} - N _{A110kV}	58,6	58,6
L _{2,A110kV} - N _{A110kV}	58,4	58,4
L _{3,A110kV} - N _{A110kV}	52,3	52,3
N _{A110kV} - E	58,4	58,4

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

' Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle diente das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen wurden mit einem FLUKE 177 gemessen.

Aus Tabelle 38 erkennt man, dass sich die Spannungswerte bei Leerlauf und Belastung exakt übereinstimmen. Es zeigen sich die bei einem Erdschluss auftretenden typischen Werte (Anhebung der vom Fehler nicht betroffenen Leiter-Erde-Spannungen auf das $\sqrt{3}$ -fache und einem um die Phasenspannung verschobenen Sternpunkt). Die Leiter-Leiter-Spannungen bleiben unverändert.

Tabelle 39: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall bei Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV, OS) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

(Umspanner 110 kV)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
	Trafo 2, OS	
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
L _{1,B110kV} - E	98,7	78,5
L _{2,B110kV} - E	101	95,0
L_{3,B110kV} - E	168	108
L _{1,B110kV} - L _{2,B110kV}	102	99,6
L_{2,B110kV} - L_{3,B110kV}	260	200
L_{3,B110kV} - L_{1,B110kV}	257	166
L_{1,B110kV} - N_{B110kV}	98,7	78,5
L_{2,B110kV} - N_{B110kV}	101	95,0
L_{3,B110kV} - N_{B110kV}	168	108
N _{B110kV} - E	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last.

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle diente das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen wurden mit einem FLUKE 177 gemessen.

 ... mit „ROT“ sind alle

- Leiter-Erde-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= $U_{N,verkettet} = 100 \text{ V}$ im Modell)
- Leiter-Leiter-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= $U_{N,verkettet} = 100 \text{ V}$ im Modell)
- Leiter-Sternpunkt-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= $100 \text{ V} / \sqrt{3} = 57,7 \text{ V}$ im Modell)

deutlich überschreiten.

Durch die im Dreischenkel-Transformator (110/10 kV) auftretende Flussaddition der bereits um den Faktor $\sqrt{3}$ zu hohen Leiter-Erde- (= Leiter-Sternpunkt) -Spannungen im 110-kV-seitig leerlaufenden Schenkel tritt in diesem eine um den Faktor $\sqrt{3}$ abermals deutlich überhöhte Leiter-Sternpunkt-Spannung $U_{L3,B110kV} - E$ auf (siehe Abbildung 85).

Die Spannungsreduktion bei Belastung resultiert aus der Sättigung des Trafos 2 – sowohl im Modell als auch erwartungsgemäß in der Realität, welche unter Lasteinfluss besonders ausgeprägt ist.

Messung bestätigt (idealisierte Werte)

$$U_{L3,B110kV} - N = E =$$

$$(58 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) \cdot \sqrt{3} = 100 \text{ V} \cdot \sqrt{3} = 173 \text{ V} !$$

Tabelle 40: Spannungsmessung im Leerlauf und im Fehlerfall beim Verbraucher (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)

(Verbrauchernetz 10 kV)	Gemessene Spannung (Fehlerfall)	
Verbraucher		
-	$U_{F,LL}^*$ in V	$U_{F,L}'$ in V
L _{1,B10kV} - E	101	66,2
L _{2,B10kV} - E	103	75,8
L_{3,B10kV} - E	174	104
L _{1,B10kV} - L _{2,B10kV}	105	91,7
L_{2,B10kV} - L_{3,B10kV}	268	177
L_{3,B10kV} - L_{1,B10kV}	267	147
L _{1,B10kV} - N _{B10kV}	101	66,2
L _{2,B10kV} - N _{B10kV}	103	75,8
L _{3,B10kV} - N _{B10kV}	174	104
N _{B10kV} - E	< 0,01	< 0,01

* Index „LL“ entspricht der Messung ohne Last (nur Magnetisierungsströme).

‘ Index „L“ entspricht der Messung bei symmetrisch-ohmscher Last – 3 x R: 680 Ω.

Bemerkung: Als Spannungsquelle diente das OMICRON CMC 256-6 die Spannungen wurden mit einem FLUKE 177 gemessen.

 ... mit „ROT“ sind alle

- Leiter-Erde-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= $U_{N,verkettet} = 100$ V im Modell)
- Leiter-Leiter-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= $U_{N,verkettet} = 100$ V im Modell)
- Leiter-Sternpunkt-Spannungen gekennzeichnet, welche die im Regelbetrieb maximal auftretende Spannung (= 100 V / $\sqrt{3} = 57,7$ V im Modell)

deutlich überschreiten.

Durch die im Dreischenkel-Transformator (110/10 kV) auftretende Flussaddition der bereits um den Faktor $\sqrt{3}$ zu hohen Leiter-Erde- (= Leiter-Sternpunkt) -Spannungen im 110-kV-seitig leerlaufenden Schenkel tritt auch auf dessen Sekundärseite ($L_{3,B10kV} - N$) eine um diesen Faktor (= 3) abermals deutlich überhöhte Leiter-Sternpunkt-Spannung $L_{3,B10kV} - E$ auf (siehe Abbildung 83).

Auch die beiden anderen Leiter-Sternpunkt-Spannungen ($L_{1,B10kV} - N_{B10kV}$ bzw. $L_{2,B10kV} - N_{B10kV}$) sind bereits um den Faktor $\sqrt{3}$ zu groß.

Besonders hochgradig wirkt sich diese Spannungskonstellation bei der Differenzbildung, d.h. den verketteten Spannungen aus: Wie sich aus dem Spannungsdreieck ergibt, nehmen die verketteten Spannungen L2-L3 bzw. L1-L3 idealerweise den Wert 264 V (= $100 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{3}$) an, wobei der Nennwert der verketteten Spannungen nur 100 V betragen sollte.

Die Spannungsreduktion bei Belastung resultiert aus der Sättigung des Trafos 2, welche unter Lasteinfluss besonders ausgeprägt ist.

Durch die Weiter-Transformation in den Dyn-Trafos auf die Niederspannungsseite resultieren in zwei der drei Niederspannungs-Phasen um den Faktor 2,5 zu große Phasenspannungen (L-N).

Dieser Effekt wird in der Praxis durch die Sättigung und damit Spannungsabflachung gemildert, kann aber, je nach Auslegung aller Transformatoren hinsichtlich Sättigung beträchtliche Werte annehmen.

Messung bestätigt (idealisierte Werte)

$$U_{L2-3,B10kV} = U_{L3-1,B10kV} = 264 \text{ V} = 2,6 \cdot U_N !$$

5.6.6 Zeigerdiagramme – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt

Nachfolgend sind die theoretischen und messtechnisch ermittelten Zeigerdiagramme zu sehen.

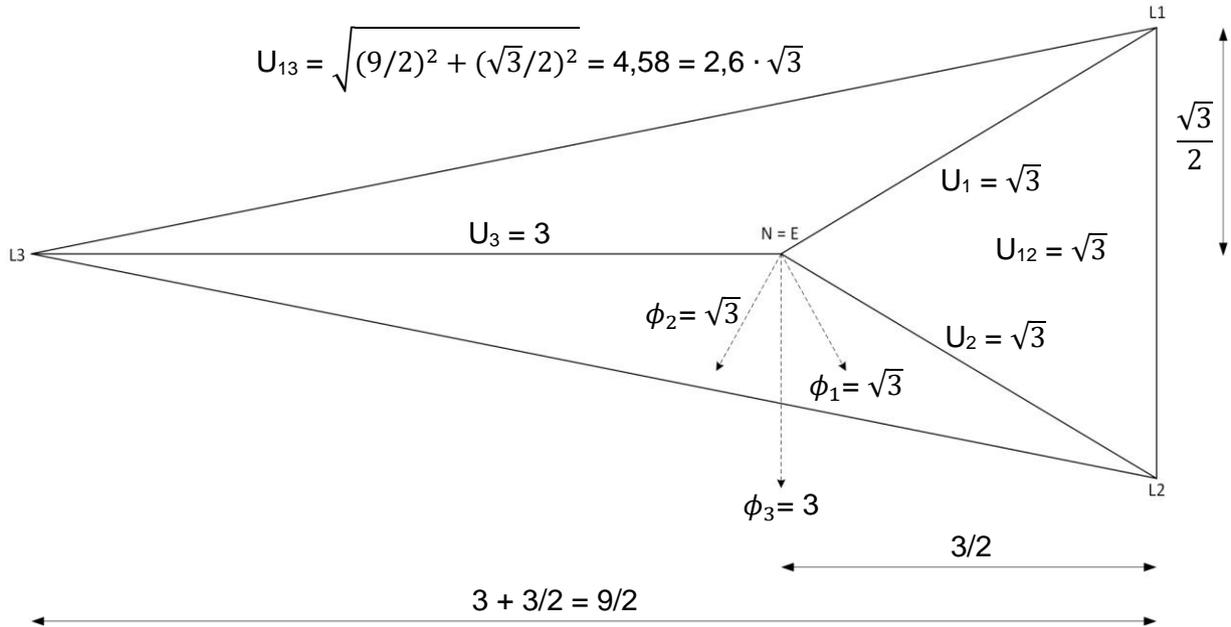


Abbildung 85: Spannungsdreieck bei einem Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – Theorie

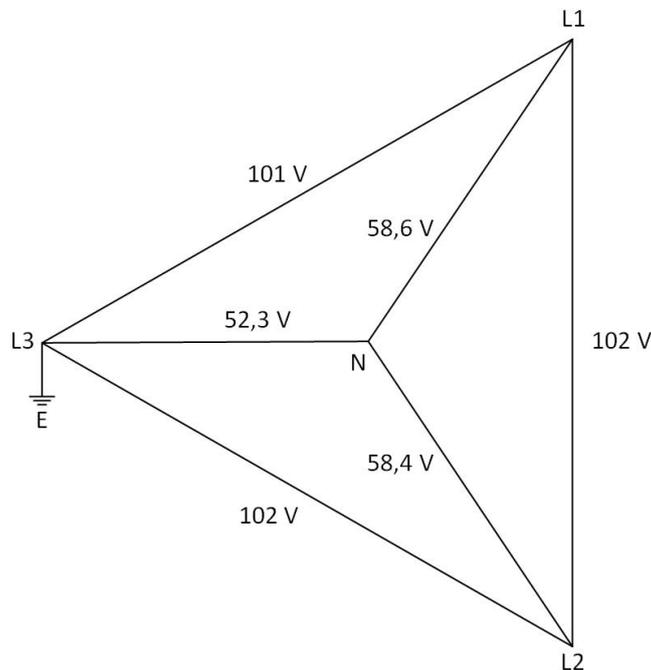


Abbildung 86: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

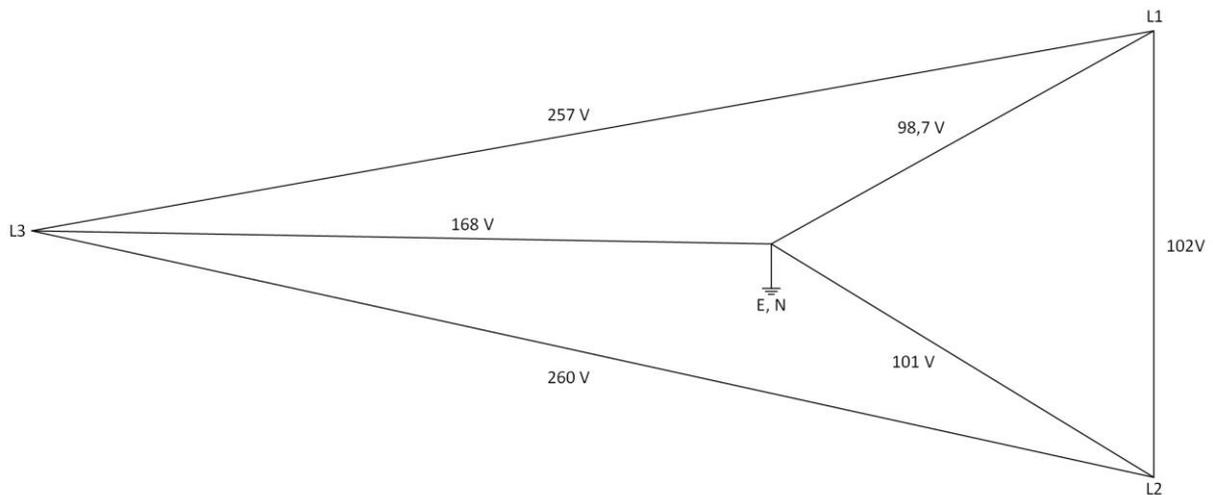


Abbildung 87: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – unbelastete Werte

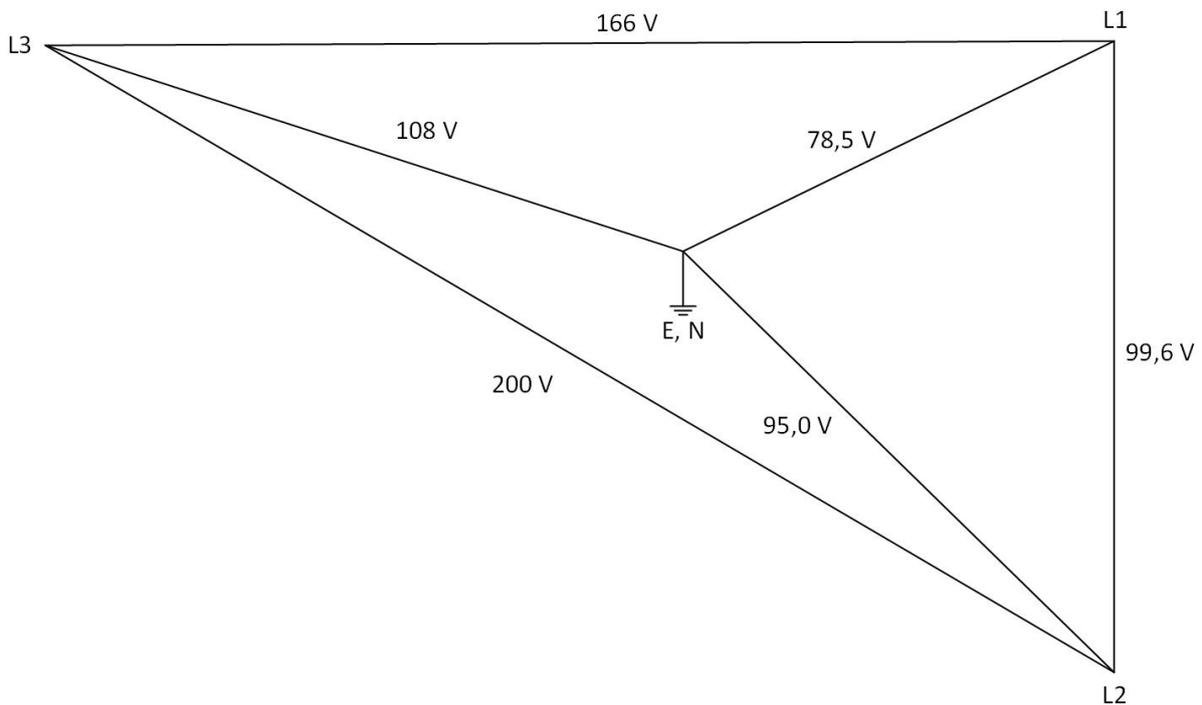


Abbildung 88: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

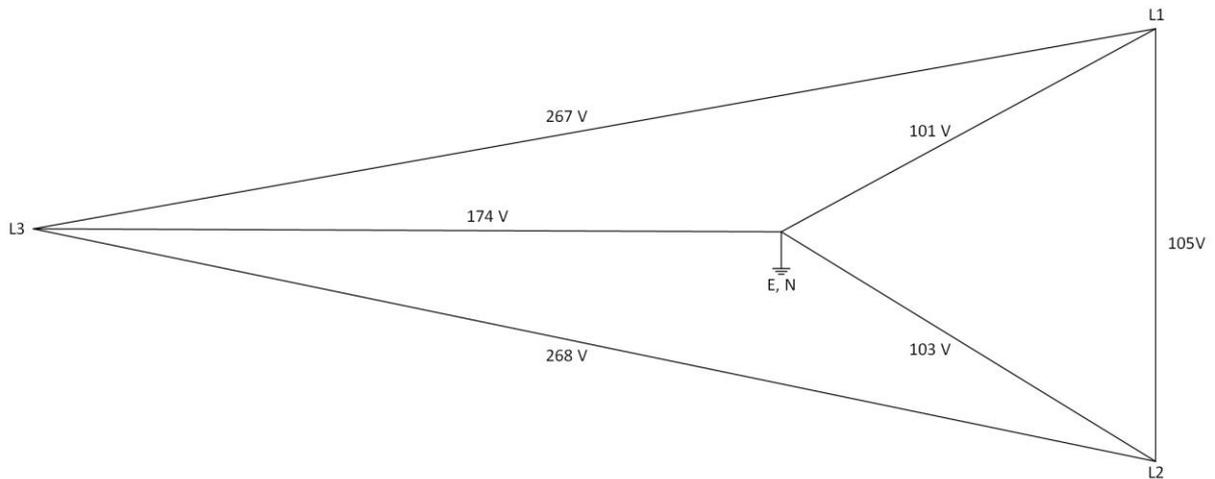


Abbildung 89: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – unbelastete Werte

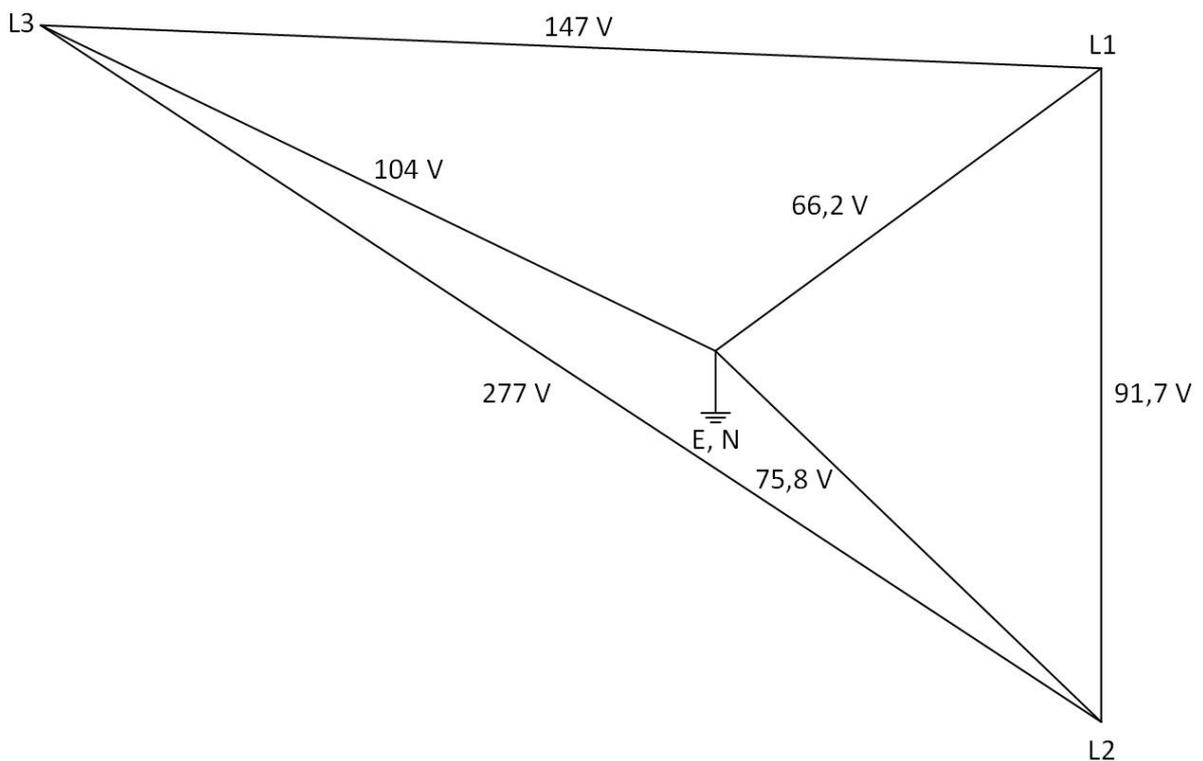


Abbildung 90: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last

Bei der Konstruktion der Zeigerdiagramme wird die Spannung zwischen L1 und L2 herangezogen, da diese Spannung in allen Fällen de facto konstant ist.

Man erkennt, dass die Spannungsverhältnisse nahezu ident mit den theoretischen Spannungsverhältnissen übereinstimmen. Die Abweichungen werden besonders durch die Sättigung der Transformatoren verursacht.

Besonders stark wirkt sich die Sättigung auf die Spannungsverhältnisse aus, wenn man die Last anschließt (siehe Abbildung 88 und Abbildung 90).

Die in Abbildung 86 dargestellten Spannungsverhältnisse gelten sowohl für den Leerlauf als auch für Belastung ($3 \times R: 680 \Omega$).

6 Literaturverzeichnis

- [1] H. Renner, K. Köck und A. Rainer, Elektrische Energiesysteme Labor, Laborskriptum, Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, Sommersemester 2016, pp. 40 - 47.
- [2] Wikimedia Foundation Inc., „Wikipedia,“ Wikimedia Foundation Inc., [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Lizenzbestimmungen_Creative_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_Unported. [Zugriff am 10 Mai 2018].

7 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Drehstromnetz mit isoliertem Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]</i>	15
<i>Abbildung 2: Erdschluss im isolierten Netz (L1-E) [1].....</i>	16
<i>Abbildung 3: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im isolierten Netz (L2-L3-E) [1].....</i>	17
<i>Abbildung 4: Drehstromnetz mit Erdlöschung – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1].....</i>	18
<i>Abbildung 5: Erdschluss im gelöschten Netz (L1-E) [1].....</i>	19
<i>Abbildung 6: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im gelöschten Netz (L2-L3-E) [1].....</i>	20
<i>Abbildung 7: Drehstromnetz mit starr geerdeten Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1]</i>	21
<i>Abbildung 8: Erdschluss im starr geerdeten Netz (L1-E) [1].....</i>	22
<i>Abbildung 9: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im niederohmig geerdeten Netz (L2-L3-E) [1]</i>	23
<i>Abbildung 10: Drehstromnetz mit niederohmig geerdeten Sternpunkt – Erdschluss beim Außenleiter L1 [1].....</i>	24
<i>Abbildung 11: Mit-, Gegen- und Nullsystem</i>	24
<i>Abbildung 12: Erdschluss im niederohmig geerdeten Netz (L1-E) [1].....</i>	25
<i>Abbildung 13: Leiter-Leiter-Fehler mit Erdberührung im niederohmig geerdeten Netz (L2-L3-E) [1]</i>	26
<i>Abbildung 14: Niederohmig geerdetes Netz und zugehöriges Mit-, Gegen- und Nullsystem</i>	27
<i>Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung des niederohmig geerdeten Netzes</i>	27
<i>Abbildung 16: Aufteilung von Z_{11} in X_{11} und R_{11}</i>	28
<i>Abbildung 17: Sternpunktspannung U_{Rst} in Abhängigkeit von der Länge l.....</i>	30
<i>Abbildung 18: Dreiphasennetz mit einem Yy0 Transformator (Umspanner).....</i>	32
<i>Abbildung 19: Dreiphasennetz mit einem Yy0 Transformator (Umspanner) – eine Phase ohne Verbraucher: $I_{L1} = 0$.....</i>	33
<i>Abbildung 20: Umgewandelter Dreiphasentransformator in einen Einphasentransformator</i>	33
<i>Abbildung 21: Laboraufbau (Gesamtansicht)</i>	34
<i>Abbildung 22: Laboraufbau (Detailansicht).....</i>	35
<i>Abbildung 23: Netzsituation – Gesundes Netz</i>	36
<i>Abbildung 24: Laboruntersuchung – Gesundes Netz</i>	37

<i>Abbildung 25: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck des gesunden Netzes, Theorie und Laboruntersuchung (Praxis).....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 26: Spannungsdreieck im gesunden Netz, Theorie</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 27: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – gesundes Netz – Leerlauf.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 28: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – gesundes Netz – mit $R = 680 \Omega$ als Last</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 29: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – gesundes Netz – Leerlauf</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 30: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – gesundes Netz – mit $R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 31: Netzsituation – stehender Erdschluss.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 32: Laboruntersuchung – stehender Erdschluss.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 33: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim stehenden Erdschluss, Theorie</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 34: Spannungsdreieck – stehender Erdschluss, Theorie.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 35: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $R = 3 k\Omega$ als Last (+- 1%).....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 36: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega W$ als Last.....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 37: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $R = 3 k\Omega$ als Last (+- 1%).....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 38: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega W$ als Last</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 39: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss – links: Leerlauf; rechts: mit $R = 3 k\Omega$ als Last</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 40: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – stehender Erdschluss – mit $R = 680 \Omega$ als Last</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 41: Netzsituation –Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 42: Laboruntersuchung – Fall1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite.....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 43: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite (Fall 1), Theorie.....</i>	<i>65</i>

Abbildung 44: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 1 Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last.....	66
Abbildung 45: Spannungsdreieck – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite, Theorie.....	74
Abbildung 46: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – gilt für Leerlauf, mit $R = 680 \Omega$ als Last und mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last.....	74
Abbildung 47: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 1: Erdschluss mit	75
Abbildung 48: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last	75
Abbildung 49: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – Fall 1: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last	76
Abbildung 50: Netzsituation – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler	77
Abbildung 51: Laboruntersuchung – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler	78
Abbildung 52: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite (Fall 2), Theorie.....	79
Abbildung 53: Spannungsverhältnisse vor der Leitungsunterbrechung – Fall 2 Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last	80
Abbildung 54: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Fall 2 Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ W als Last.....	81
Abbildung 55: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler, Theorie	89
Abbildung 56: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – Leerlauf.....	89
Abbildung 57: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – mit $R = 680 \Omega$ als Last.....	90
Abbildung 58: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkupfeltrafo 10 kV, US) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last.....	90

Abbildung 59: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last	91
Abbildung 60: Spannungsdreieck beim Trafo 2, US (Verbraucher 0,4 kV) – Fall 2: Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Verbraucherseite – rückwärtiger Fehler – links: Leerlauf; Mitte mit $R = 680 \Omega$ als Last; rechts: mit $R = 3 \text{ k}\Omega$ als Last	91
Abbildung 61: Laboraufbau (Gesamtansicht)	93
Abbildung 62: Laboraufbau (Detailansicht).....	94
Abbildung 63: Netzsituation – Gesundes Netz (Phase 0).....	95
Abbildung 64: Laboruntersuchung – Gesundes Netz (Phase 0).....	96
Abbildung 65: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck des gesunden Netzes (Phase 0), Theorie und Laboruntersuchung (Praxis).....	97
Abbildung 66: Spannungsdreieck im gesunden Netz (Phase 0), Theorie	99
Abbildung 67: Netzsituation – stehender Erdschluss (Phase 1)	100
Abbildung 68: Laboruntersuchung – stehender Erdschluss (Phase 1)	101
Abbildung 69: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim stehenden Erdschluss (Phase 1), Theorie.....	102
Abbildung 70: Spannungsdreieck – stehender Erdschluss (regulär – Phase 1), Theorie.....	106
Abbildung 71: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last (+- 1%).....	106
Abbildung 72: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – stehender Erdschluss – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....	107
Abbildung 73: Netzsituation – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2).....	108
Abbildung 74: Laboruntersuchung – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2)	109
Abbildung 75: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite (Phase 2), Theorie.....	110
Abbildung 76: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung – Phase 2 Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – mit $R = 680 \Omega$ als Last.....	111
Abbildung 77: Spannungsdreieck – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2), Theorie	116
Abbildung 78: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppeltrafo 10 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....	116

<i>Abbildung 79: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung 80: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA in Ordnung (Phase 2) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung 81: Netzsituation – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3)</i>	<i>119</i>
<i>Abbildung 82: Laboruntersuchung – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3).....</i>	<i>120</i>
<i>Abbildung 83: Ideales Spannungsverhältnis bzw. ideales Spannungsdreieck beim Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite und beschädigtem Überspannungsableiter (Phase 3), Theorie</i>	<i>121</i>
<i>Abbildung 84: Spannungsverhältnisse nach der Leitungsunterbrechung und beschädigtem Überspannungsableiter – Trafo 2, OS (Umspanner 10 kV, OS) – unbelastete Werte.....</i>	<i>122</i>
<i>Abbildung 85: Spannungsdreieck bei einem Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – Theorie</i>	<i>128</i>
<i>Abbildung 86: Spannungsdreieck beim Trafo 1, US (Netzkuppltrafo 10 kV, US) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – gilt für Leerlauf und mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>128</i>
<i>Abbildung 87: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – unbelastete Werte.....</i>	<i>129</i>
<i>Abbildung 88: Spannungsdreieck beim Trafo 2, OS (Umspanner 110 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>129</i>
<i>Abbildung 89: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – unbelastete Werte.....</i>	<i>130</i>
<i>Abbildung 90: Spannungsdreieck bei Trafo 2, US (Verbrauchernetz 10 kV) – Erdschluss mit Leitungsunterbrechung auf der Versorgungsseite – nach Leiterriss, ÜA beschädigt (Phase 3) – mit $3 \times R = 680 \Omega$ als Last.....</i>	<i>130</i>