

Auswirkungen der dritten Oberschwingung in Niederspannungsnetzen mit dezentralen Erzeugungsanlagen

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Vorgelegt von
Lukas Schneider, BSc

Betreuer
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

Co-Betreuerin
DI Maria Aigner

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober – 2013



Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert und DI Maria Aigner. Ich konnte stets all meine Anliegen an sie herantragen und wurde zu jeder Zeit tatkräftig unterstützt.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Institutes für Elektrische Anlagen, die stets ein offenes Ohr für meine Fragen hatten.

Ein weiterer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium an der technischen Universität Graz ermöglichten, meiner Schwester für ihre Unterstützung und meiner Freundin für das Verständnis und die Geduld während des Verfassens dieser Arbeit.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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.

Graz, am 30.10.2013

Lukas Schneider, BSc

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit werden die Verteilung und das Verhalten der dritten Oberschwingung bei vermehrter Einspeisung über dezentrale Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz untersucht. Im Speziellen wird aufgrund normativer Vorgaben auf die Ströme der dritten Oberschwingung im Sternpunkt dieser dezentralen Erzeugungsanlagen eingegangen.

Dazu werden ein realer Notstromgenerator, sowie ein Synchrongenerator und Inselnetzwechselrichter im Labor analysiert. In den Labormessungen wird neben dem normalen Betriebszustand auch das Verhalten der dritten Oberschwingung unter Variation der Last und im Falle eines 1-poligen Fehlers gegen Erde untersucht.

Anhand der Messungen mit dem Labor-Synchrongenerator wird der Verursacher der dritten Oberschwingung im gemessenen Netzmodell ermittelt.

Begleitend wird ein Modell einer dezentralen Einspeisung erstellt, mit Hilfe dessen die dritte Oberschwingung beliebiger Synchrongeneratoren berechnet und die Messungen validiert werden können.

Die Messergebnisse werden hinsichtlich der Vorgaben bestehender Normen für den Sternpunktanschluss dezentraler Erzeugungsanlagen überprüft.

Schlüsselwörter: dezentrale Energieerzeugungsanlagen, Sternpunktbehandlung, dritte Oberschwingung, Synchrongenerator, Wechselrichter

Abstract

This master thesis investigates the distribution and the behaviour of the third harmonic in decentralized power supplies, which operate in low voltage networks. Based on normative specifications the research especially concentrates on the influence of the third harmonic in the neutral point of the decentralized power supplies.

To reach this goal an emergency generator, a synchronous generator and an island power inverter in the laboratory are measured. The laboratory measurements proof under normal operating conditions the influence of the third harmonic under variation of loads and in the case of a single phase to earth fault.

Through the measurements with the synchronous generator in the laboratory the causer of the third harmonic is determined.

Accompanying to the measurements the third harmonic of a synchronous generator is calculated with a model of a decentralized injection.

The measurement results are compared with the standard specifications for the neutral point treatment of decentralized power supplies.

Keywords: decentralized power supply, neutral point treatment, third harmonic, synchronous generator, power inverter

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
1 Executive Summary	9
1.1 Ziel	9
1.2 Methode	9
1.3 Ergebnisse	9
1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick	9
2 Hintergrund und Aufgabenstellung	10
3 Dezentrale Energieversorgung – Grid Codes	12
3.1 Einleitung.....	12
3.2 Grid Codes	13
3.2.1 Österreich (TOR)	14
3.2.2 Europa.....	16
3.2.3 International.....	19
3.2.4 Vergleich	20
3.3 Inselnetzbetrieb	22
4 Sternpunktbehandlung.....	23
4.1 Einleitung.....	23
4.2 Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen.....	24
4.3 Symmetrische Komponenten.....	26
4.4 1-poliger Fehler gegen Erde	28
4.4.1 Niederohmig geerdeter Sternpunkt.....	29
4.4.2 Isolierter Sternpunkt.....	31
4.4.3 Erdschlusskompensation.....	32
5 Oberschwingungen	34
5.1 Ursachen	34
5.2 Auswirkungen	35
5.3 Verhalten und Einfluss der dritten Oberschwingung.....	36

5.4	Fast-Fourier-Transformation	39
5.4.1	Fensterung	40
5.4.2	Leckeffekt	41
5.5	Synchrongenerator	41
5.6	Wechselrichter	41
6	Begleitende Berechnungen.....	42
7	Messung	44
7.1	Einleitung.....	44
7.2	Messung Notstromgenerator-Einspeisung	45
7.2.1	Messkonzept	45
7.2.2	Messaufbau	48
7.2.3	Messauswertung	48
7.2.4	Ergebnisse - Netzparallelbetrieb	50
7.3	Messung Labor-Synchrongenerator	54
7.3.1	Messkonzept	54
7.3.2	Messaufbau	56
7.3.3	Messauswertung	56
7.3.4	Ergebnisse – Netzparallelbetrieb	58
7.3.5	Ergebnisse – Inselnetzbetrieb.....	70
7.3.6	Verursacher der dritten Oberschwingung.....	83
7.4	Messung im Labor – Inselnetzwechselrichter.....	87
7.4.1	Messkonzept	87
7.4.2	Messaufbau	88
7.4.3	Messauswertung	88
7.4.4	Ergebnisse - Inselnetzwechselrichter.....	89
8	Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse	99
8.1	Einfluss des Typs der dezentralen Energieerzeugungsanlage auf die dritte Oberschwingung	99
8.2	Einfluss der Last auf die dritte Oberschwingung	100
8.3	Auswirkung des 1-poligen Fehlers gegen Erde auf die dritte Oberschwingung	101

9 Zusammenfassung	102
10 Ausblick.....	103
11 Literatur	104
12 Anhang.....	107
12.1 Messung Notstromgenerator	107
12.1.1 Zeitsynchronisation – Phasenkorrektur	108
12.2 Messung Labor-Synchrongenerator.....	109
12.3 Messung Labor Inselnetzwechselrichter	110

Abkürzungsverzeichnis

DEA	<u>D</u>ezentrale <u>E</u>rzeugungs<u>a</u>nlage
GS	<u>G</u>ru<u>n</u>d<u>s</u>chwingung
HR	<u>H</u>armonic <u>R</u>atio
IWR	<u>I</u>nselnetz<u>w</u>echsel<u>r</u>ichter
KS	<u>K</u>urz<u>s</u>chluss
LSG	<u>L</u>abor-<u>S</u>ynchro<u>n</u>generator
MP	<u>M</u>ess<u>p</u>unkt
NTP	<u>N</u>etwork <u>T</u>ime <u>P</u>rotokoll
OS	<u>O</u>ber<u>s</u>chwingung
SS	<u>S</u>ammels<u>s</u>chiene
SWR	<u>S</u>olar<u>w</u>echsel<u>r</u>ichter
THD	<u>T</u>otal <u>H</u>armonic <u>D</u>istortion
THF	<u>T</u>otal <u>H</u>armonic <u>F</u>actor
TOR	<u>T</u>echnische und <u>O</u>rganisatorische <u>R</u>egeln für Betreiber und Benutzer von Netzen

1 Executive Summary

1.1 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist, einen Synchrongenerator und einen Inselnetzwechselrichter im Hinblick auf dessen Sternpunktverhalten zu untersuchen. Im Speziellen wird auf die Größe und Ausbreitung der dritten Oberschwingung und auf die Sternpunktbehandlung der dezentralen Erzeugungsanlage eingegangen.

1.2 Methode

Es wird die Einspeisung eines Notstromgenerators in einer Feldmessung messtechnisch erfasst und das Verhalten der dritten Oberschwingung in Strom & Spannung ermittelt. Im Labor werden in einem Netzmodell der Einfluss der Last und der Einfluss eines 1-poligen Fehlers gegen Erde auf die Ausbreitung der dritten Oberschwingung im Sternpunkt der Erzeugungsanlage gemessen. Abschließend wird das Verhalten der dritten Oberschwingung bei Einspeisung über einen Inselnetzwechselrichter untersucht.

1.3 Ergebnisse

Der dritte Oberschwingungsstrom fließt über den Sternpunkt. Nichtlineare Bauelemente erzeugen diese Oberschwingungen und diese steigen mit zunehmender Last. Die gemessenen Erzeugungsanlagen halten die in den Normen spezifizierten Grenzen für die dritte Oberschwingung im Sternpunkt ein.

1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in den Normen angeführten Werte für den dritten Oberschwingungsstrom über den Sternpunkt der dezentralen Erzeugungsanlage werden bei niederohmiger Sternpunktterdung eingehalten.

Für den Anschluss des Sternpunktes der gemessenen dezentralen Erzeugungsanlagen kann die niederohmige Sternpunktterdung gewählt werden.

2 Hintergrund und Aufgabenstellung

Ressourcenverknappung, Energiewende, Klimaziele, Versorgungssicherheit, erneuerbare Energieträger sind die schlagenden Worte unseres Jahrzehnts. Auch die Elektrizitätswirtschaft ist von dieser „Umbruchstimmung“ betroffen. Die Energieversorgung ist im Wandel. Wo früher große Kraftwerke Gebiete zentral versorgt haben, werden heute viele dezentrale Energieerzeugungsanlagen in Verbrauchernähe in Betrieb genommen. Mögliche Netzausfälle sollen durch Inselnetzbildung einzelne Gebiete ausfallssicher und unabhängig machen.

Die Einbindung dezentraler Anlagen erfolgt primär im Niederspannungsverteilernetz. Als stromerzeugende Einheit werden Synchrongeneratoren und Wechselrichter verwendet. Somit läuft Erzeugung und Verbrauch sozusagen „Hand in Hand“ und es ergeben sich besondere Herausforderungen in Bezug auf den Anschluss dezentraler Erzeugungsanlagen. Besonders der Anschluss des Sternpunktes der dezentralen Erzeugungsanlagen ist von zentralem Interesse.

Diese Sternpunktbehandlung ist in den bestehenden Normen und Richtlinien näher spezifiziert. Als Grundaussage der Normen gilt derzeit, den Sternpunkt im Zweifelsfall hochohmig bzw. nicht anzuschließen. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, diese Normen betreffend Sternpunktbehandlung zu verifizieren. Im Speziellen zeigt sich, dass im Rahmen der Sternpunktbehandlung die dritte Oberschwingung von besonderem Interesse ist. Damit einhergehend ergeben sich für den Anschlusspunkt der dezentralen Erzeugungsanlage folgende Fragestellungen, welche im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden sollen:

- Wie beeinflusst der Typ der dezentralen Energieerzeugungsanlage die dritte Oberschwingung?
- Welchen Einfluss haben Lasten auf die dritte Oberschwingung?
- Welche Auswirkungen hat ein 1-poliger Fehler gegen Erde auf die dritte Oberschwingung?

Die zuvor angeführten Fragestellungen sollen mit Hilfe von Messungen und begleitenden Berechnungen beantwortet werden. Dazu wird die Einspeisung eines Notstromgenerators gemessen. Außerdem werden ein Synchrongenerator-Netzmodell und ein Inselnetzwechselrichter-Netzmodell als dezentrale Erzeugungsanlage im Labor analysiert. Sämtliche Messungen werden im Hinblick auf die Ausbreitung der dritten Oberschwingung, im Besonderen auf die Ausbreitung dieser im Neutralleiter untersucht und ausgewertet.

Bei den folgenden Kapiteln 3, 4 und 5 handelt es sich um die theoretische Einführung in die zu behandelnde Aufgabenstellung. In dieser Einführung werden unter anderem Sätze und Absätze aus der bestehenden Literatur in diese Arbeit übernommen. An jeder Stelle an der in dieser Arbeit eine solche Übernahme stattgefunden hat, ist diese Stelle kursiv markiert und eingerückt. Abgeschlossen wird die übernommene Literaturstelle mit einem Zitat.

3 Dezentrale Energieversorgung – Grid Codes

3.1 Einleitung

Historisch betrachtet handelt es sich beim Netzaufbau um eine zentrale Versorgungsstruktur. Mehrere große Erzeuger beliefern, via Übertragungs- und Verteilernetze, leistungsstarke und schwache Verbraucher. Die Erzeuger speisen im Hochspannungsnetz ein, die Verbraucher entnehmen aus dem Niederspannungsnetz. Dabei gibt es ausschließlich eine Energieflussrichtung vom Hochspannungsnetz über das Mittelspannungsnetz hin zum Niederspannungsnetz. Die linke Seite der Abbildung 3.1 verdeutlicht die zentrale Versorgungsstruktur [1].

Im Vergleich zur zentralen Versorgungsstruktur wird die dezentrale Versorgungsstruktur u.a. im Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz 2010 (ELWOG 2010) behandelt. Der §7 Abs. 7 definiert den Begriff „dezentrale Erzeugungsanlage“, als

„eine Erzeugungsanlage, die an ein öffentliches Mittel- oder Niederspannungs-Verteilernetz (Bezugspunkt Übergabestelle) angeschlossen ist und somit Verbrauchernähe aufweist oder eine Erzeugungsanlage, die der Eigenversorgung dient; [2]“

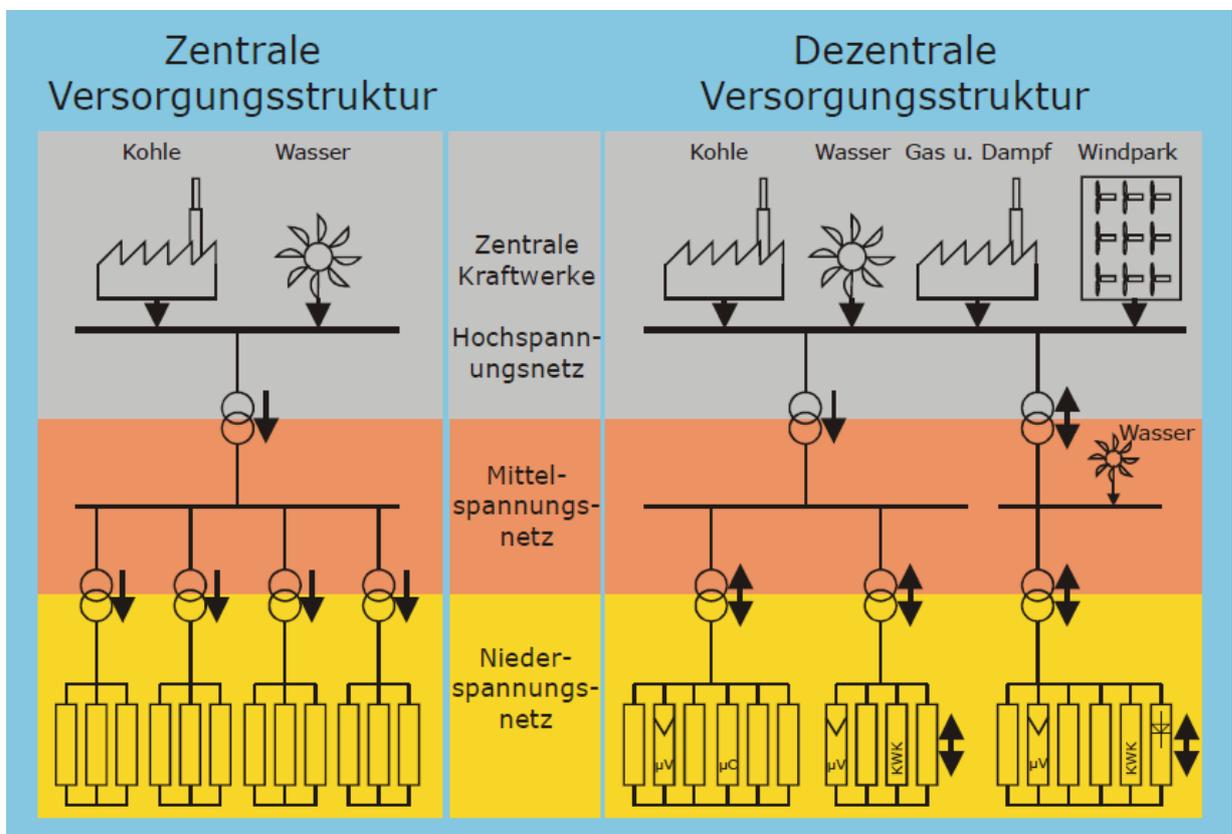


Abbildung 3.1: Vergleich Zentrale vs. Dezentrale Versorgungsstruktur [1]

Die rechte Seite der Abbildung 3.1 zeigt, dass sowohl von der Hochspannungsebene in die Niederspannungsebene geliefert wird, aber auch der umgekehrte Weg möglich ist. Zusammengefasst kann die dezentrale Versorgungsstruktur mit folgenden Merkmalen beschrieben werden:

- Einspeisung in die Netzebenen 5,6,7 [2] (Verteilernetzebenen)
- Viele leistungsschwache Erzeuger
- Nähe zu den Verbrauchern
- Nutzung erneuerbarer Energien

Durch die Einführung dezentraler Erzeugungsanlagen in die bestehende zentrale Versorgungsstruktur und der damit einhergehenden Wandlung hin zur dezentralen Struktur ergeben sich sowohl Vor- als auch Nachteile.

Vorteile der dezentralen Stromerzeugung sind die lokale Verteilung der Erzeugungsanlagen und die damit verbundenen kurzen Distanzen zwischen dem Erzeuger und dem Verbraucher hinsichtlich der Übertragungsverluste. Ein Großteil des dezentral erzeugten Stromes kann in derselben Netzebene genutzt werden, in welcher er erzeugt wird. D.h. überlagerte Netzebenen werden nur gering belastet. Voraussetzung, Erzeugung & Verbrauch sind annähernd zeitgleich. Zusätzlich werden durch den Ausbau der dezentralen Stromerzeugung vermehrt erneuerbare Energien genutzt. Als Nachteil erweist sich hingegen die geringe Energiedichte bzw. die spezifische Energie der einzelnen genutzten erneuerbaren Energien, wie beispielsweise Sonne, Wind, Biomasse, etc. Die lokale Verteilung der Erzeugungsanlagen bedingt lokal verteilte Schadstoffemissionen. Auch die Investitionskosten dezentraler Erzeugungsanlagen sind erheblich höher als die von zentralen Kraftwerken [3].

Damit die Einspeisung dezentraler Erzeugungsanlagen in den unteren Netzebenen ermöglicht wird, müssen deren Konzepte (wie etwa Überschusseinspeisung), Anschlüsse, Verhalten bei Abweichung vom Normalbetrieb des Netzes, etc. durch geeignete Bestimmungen reglementiert werden. Diese Reglementierung erfolgt in den sogenannten Grid Codes.

3.2 Grid Codes

Als Grid Code werden jene Regeln, Bestimmungen und Vorschriften bezeichnet, die den Zugang zum Netz für die einzelnen Strommarktteilnehmer festlegen. Grid Codes umfassen die Planung, die Errichtung und den Betrieb von Erzeugungsanlagen. Sämtliche Marktteilnehmer, der Errichter, der Erzeuger und der Netzbetreiber werden erfasst.

In dieser Arbeit werden ausschließlich jene Regelwerke aus den Grid Codes behandelt, welche den Anschluss und Betrieb von Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz regeln. Dies ist z. B. in Österreich die TOR, Hauptabschnitt D4, Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen [4].

Ausgehend von den Österreichischen Bestimmungen werden Grid Codes auf europäischer und internationaler Ebene betrachtet und gegenübergestellt.

3.2.1 Österreich (TOR)

„Technische und Organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR)“ spezifizieren unter anderem Grid Codes in Österreich. Speziell im Teil D, Hauptabschnitt D4 wird der „Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen“ behandelt [4].

In diesem Hauptabschnitt sind verschiedene Empfehlungen betreffend der Entkopplungsstelle dezentraler Erzeugungsanlagen vorzufinden.

Der Netzanschluss einer Erzeugungsanlage im Niederspannungsnetz kann bis zu einer Nennleistung von 4,6 kVA einphasig erfolgen, darüber hinaus ist er dreiphasig auszuführen. Damit werden Spannungsunsymmetrien eingedämmt.

Bis zu einer Anlagengesamtleistung von 30 kVA (dreiphasig) darf die Anlage ohne gemeinsamen Entkopplungsschalter betrieben werden, ein dauerhafter Zugang zum Entkopplungsschalter ist für den Verteilernetzbetreiber nicht notwendig. Eine automatische Freischaltstelle muss jedoch vorhanden sein. Geschützt wird die Erzeugungsanlage über den Entkopplungsschutz. Dieser überwacht sowohl die Netzseite, als auch die Seite der Erzeugungsanlage. Verschiedene Spannungsschutzfunktionen wie der Frequenzschutz und der Blindleistungs-Unterspannungsschutz werden erfüllt. Je nach Art der Erzeugereinheit (Synchrongenerator, Asynchrongenerator, Wechselrichter) muss der Entkopplungsschutz spezifisch ausgeführt und eingestellt werden [4].

Laut TOR D4 ist die Sternpunktbehandlung von der Höhe des Oberschwingungsstromes über den Sternpunkt der dezentralen Erzeugungsanlage abhängig. Der Anschluss des Sternpunktes der Erzeugungsanlage wird im Kapitel 4 dieser Arbeit näher beschrieben.

Die Zuschaltung von Erzeugungsanlagen an das Netz erfolgt über eine Synchronisierereinrichtung. Die Spannung und die Frequenz müssen auf beiden Seiten synchron sein und die Schutzeinrichtung darf nicht angesprochen haben, damit die Zuschaltung erfolgen kann. Bei der Zuschaltung dezentraler Erzeugungsanlagen muss zusätzlich auf Netzurückwirkungen geachtet werden. Wird ein Wechselrichter verwendet, darf die Synchronisation auch über eine integrierte Frequenz- und Spannungsangleichung erfolgen (keine getrennte Synchronisationseinrichtung erforderlich) [5].

Netzurückwirkungen, die durch das Zuschalten der Erzeugungsanlage entstehen, müssen die für sie geltenden Grenzwerte [6] einhalten.

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die Netzanschlüsse eines Generators sowie eines einphasig einspeisenden Wechselrichters mit ihren zugehörigen Schutzeinrichtungen, wie sie nach der TOR D4 auszuführen sind.

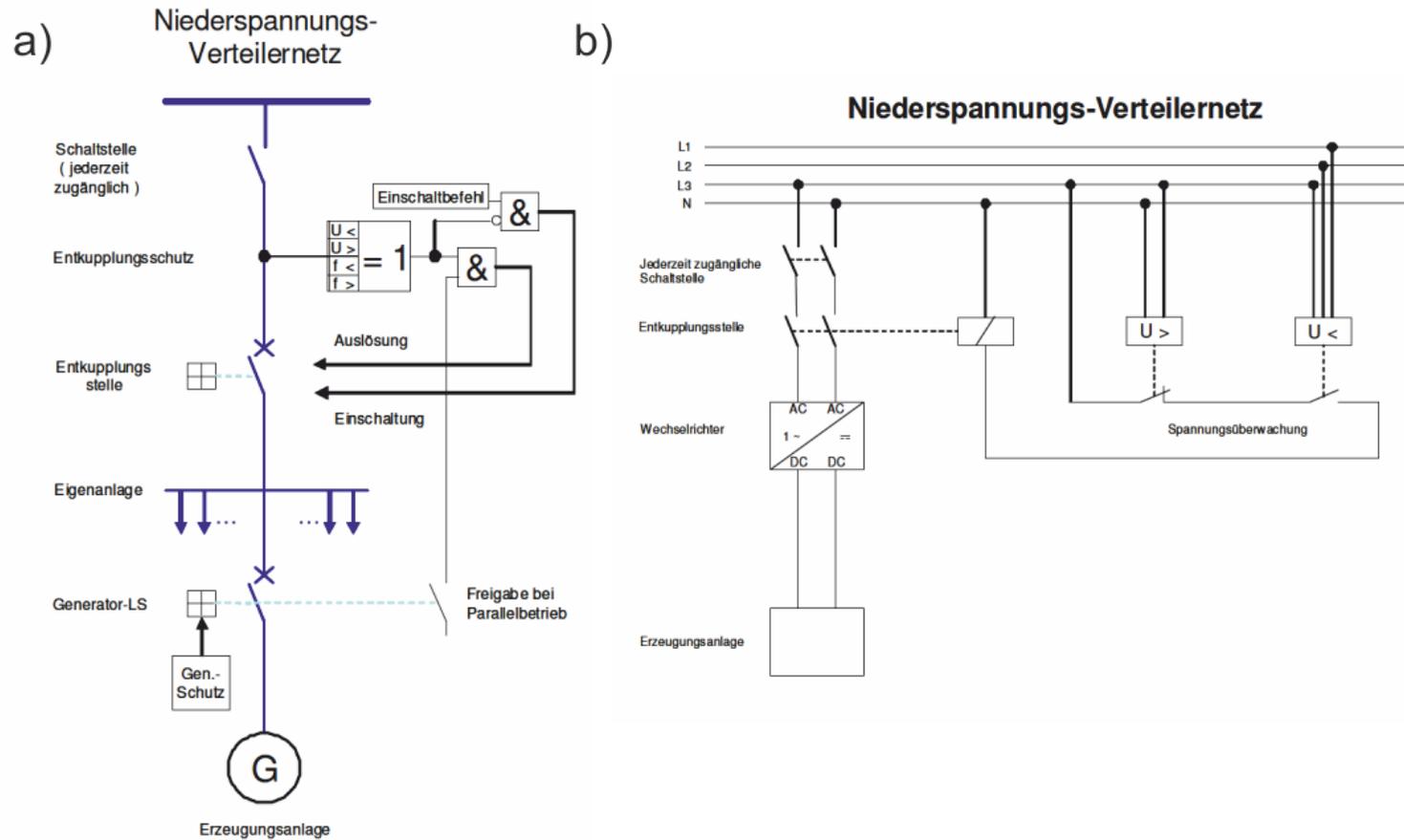


Abbildung 3.2: Netzanschluss von Erzeugungsanlagen,

a) Generator mit Entkopplungs-/Zusatzschutz, b) einphasiger Wechselrichter mit Schutzeinrichtung, [4]

3.2.2 Europa

Die europäische Normung unterscheidet bei den Grid Codes die Einspeisung von Erzeugungsanlagen in das Niederspannungsnetz nach dem Bemessungsstrom je Phase (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Anzuwendende Normen nach dem Bemessungsstrom der Erzeugungsanlage

Norm:	Bemessungsstrom:
DIN EN 50438 (VDE 0435-901)	$\leq 16 \text{ A}$
CLC/FprTS 50549-1	$> 16 \text{ A}$

3.2.2.1 DIN EN 50438

Die deutsche Fassung der europäischen Norm DIN EN 50438 (VDE 0435-901): „Anforderungen für den Anschluss von Klein-Generatoren an das öffentliche Niederspannungsnetz“ beschäftigt sich mit den technischen Forderungen an Erzeugungsanlagen, deren Bemessungsströme 16 A je Phase nicht überschreiten [7].

Die elektrische Netzschnittstelle ist das zentrale Element dieser Norm. Es muss ein ausreichend dimensionierter Schnittstellen-Schutz vorgesehen werden, der im Fehlerfall die Erzeugungsanlage vom Niederspannungsnetz trennt. Der Schnittstellen-Schutz soll die Erzeugungsanlage vom Netz trennen. Die Auslösung erfolgt wenn:

- die Einstellwerte für Spannung bzw. Frequenz über- oder unterschritten sind (siehe Tabelle 3.2),
- es zu einer Gleichstromeinspeisung in das Verteilernetz kommt,
- ungewollter Inselnetzbetrieb vorliegt.

Tabelle 3.2 zeigt Standardeinstellwerte für den Schnittstellenschutz aus der DIN EN 50438. Diese Werte dürfen durch den Betreiber der Erzeugungsanlage nicht abgeändert werden. Jedoch können diese Einstellwerte länderspezifisch differieren. Beispielsweise hat Österreich modifizierte nationale Anforderungen an den Schnittstellenschutz. Die verschiedenen Einstellwerte der einzelnen Länder sind im Anhang A der Norm aufgeführt [7].

Deutschland hat eine eigene Norm für den Schnittstellenschutz, die DIN VDE 0126-1-1: „Selbsttätige Freischaltstelle zwischen einer netzparallelen Eigenerzeugungsanlage und dem öffentlichen Niederspannungsnetz“. In ihr sind die zugehörigen Einstellwerte und maximalen Fehlerklärungsauern definiert [8].

Tabelle 3.2: Standardeinstellwerte für den Schnittstellen-Schutz [7]

Parameter	Maximale Fehlerklärungsdauer	Einstellwerte
Überspannung – Stufe 1 ^{a)} (falls erforderlich)	siehe Anhang A	siehe Anhang A
Überspannung – Stufe 2	0,2 s	230 V + 15 %
Unterspannung	1,5 s	230 V – 15 %
Überfrequenz	0,5 s	51 Hz
Unterfrequenz	0,5 s	47 Hz
Netzausfall (falls erforderlich)	siehe Anhang A	siehe Anhang A
Die angegebenen Ströme und Spannungen sind echte Effektivwerte. Die Spannungen in dieser Tabelle sind <ul style="list-style-type: none"> – Mittelleiterspannungen in 230-V-Einphasensystemen und 230/400-V-Systemen, – Außenleiterspannungen in Mehrphasen-230-V-Systemen. 		
^{a)} Überspannung – Stufe 1: 10-Minuten-Mittelwert nach EN 50160. Toleranzbereiche der Auslöseschwelle: <ul style="list-style-type: none"> – Spannung: ± 1 % der Nennspannung; – Frequenz: ± 0,5 % der Nennfrequenz; – Fehlerklärungsdauer: ± 10 %. 		

Die Synchronisation der Erzeugungsanlage mit dem Niederspannungsnetz muss automatisch erfolgen. Keinesfalls darf beispielsweise durch einen Schalter von Hand zugeschaltet werden.

Im Netzparallelbetrieb ist die galvanische Verbindung zwischen der Generatorwicklung und der vom Verteilernetzbetreiber gelieferten Erde zu verhindern. Der Generatorsternpunkt ist also hochohmig (isoliert) zu betreiben. Im Detail wird auf die Sternpunktbehandlung im Kapitel 4 eingegangen.

Während des Betriebes muss der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ einen Wert von 0,95 untererregt bis 0,95 übererregt bereitstellen können, jedoch nur, wenn mehr als 20 % der Bemessungswirkleistung abgegeben werden [7].

3.2.2.2 CLC/FprTS 50549-1

Erzeugungsanlagen mit einem Bemessungsstrom größer als 16 A je Phase werden in der europäischen Norm CLC/FprTS 50549-1: „Requirements for generating plants larger than 16 A per phase to be connected in parallel with a low-voltage distribution network“ behandelt [9].

Die Stromunsymmetrie der einzelnen Phasen, bei einphasiger Einspeisung oder einer Gruppe einphasiger Einspeiser, darf 16 A nicht überschreiten. Das entspricht einer einphasigen Nennscheinleistung von 3,68 kVA. Sie darf jedoch durch nationale Vorschriften sowie in Übereinkunft mit dem Verteilernetzbetreiber höher ausfallen. Zum Beispiel ist in Österreich eine Stromunsymmetrie von bis zu 20 A (4,6 kVA) erlaubt (siehe Kapitel 3.2.1).

In Europa muss der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ im Bereich von 0,9 untererregt bis 0,9 übererregt einstellbar sein, wenn die abgegebene Scheinleistung größer als 10 % der Bemessungsscheinleistung der Erzeugungsanlage ist. Die Erzeugungsanlage darf also die abgegebene Wirkleistung reduzieren, um die benötigte Blindleistung bereitstellen zu können.

Außerdem sind in der Norm Vorgangsweisen angegeben, wie sich die Erzeugungsanlagen innerhalb des normalen Betriebsbereiches (kein Ansprechen des Schnittstellenschutzes) verhalten sollen. Beispielsweise bei abweichender Frequenz, niedriger sowie hoher Spannung. Außerhalb des normalen Betriebsbereichs muss der Schnittstellenschutz für eine sichere Trennung der Erzeugungsanlage vom Verteilernetz sorgen [9].

Im Vergleich der CLC/FprTS 50549-1 zur DIN EN 50438 müssen Erzeugungsanlagen mit einem Bemessungsstrom >16 A (CLC/FprTS 50549-1) am Niederspannungsnetz mehr Blindleistung bereitstellen können. In beiden Normen braucht eine für den Verteilnetzbetreiber jederzeit zugängliche Trenneinrichtung nicht mehr vorgesehen werden, wenn zwei in Reihe ausgeführte automatische Trenneinrichtungen vorgesehen sind, wobei einer der beiden Schalter mechanische Trennkontakte bieten muss [7, 9].

3.2.2.3 VDE-AR-N 4105

In Deutschland gilt die VDE-AR-N 4105 „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ [9].

Im Unterschied zu den bisherigen behandelnden Normen bezieht diese zusätzlich die Beteiligung von dezentralen Erzeugungsanlagen an der statischen Spannungshaltung und die damit einhergehende Auslegung mit ein.

Am Netzanschlusspunkt muss die Spannungsänderung innerhalb eines Bereiches von 3 % von der Spannung ohne Erzeugungsanlage bleiben, jedoch kann aus Gründen der statischen Spannungshaltung von diesem Wert abgewichen werden.

Stromunsymmetrien dürfen maximal einen Wert von 4,6 kVA erreichen, eine gleichmäßige Verteilung ist anzustreben. Für den Anschluss einer einphasigen Erzeugungsanlage gilt derselbe Wert von 4,6 kVA. Ein maximaler Wert von 13,8 kVA (3 x 4,6 kVA) einphasiger Anlagen ist zulässig, darüber hinaus darf nur noch dreiphasig angeschlossen werden. Besteht zwischen mehreren einphasigen Einspeisern eine kommunikative Kopplung gilt dies ebenfalls als dreiphasige Einspeisung. Umrichteranlagen dürfen nur noch dreiphasig, symmetrisch ausgeführt sein.

Vom Netzbetreiber kann die statische Spannungshaltung gefordert werden, d.h. langsame Spannungsänderungen müssen von den dezentralen Erzeugungsanlagen gehalten werden können.

Der Netz- und Anlagenschutz (NA-Schutz) ist bei Anlagen mit einer Nennscheinleistung >30 kVA zentral auszuführen. Der zentrale NA-Schutz wird am Zählerplatz als eigenständiges

Betriebsmittel durch eine typgeprüfte Schutzeinrichtung ausgeführt. Kleinere Anlagen (≤ 30 kVA) können diesen NA-Schutz integriert haben (z.B.: Teil der programmierbaren Umrichtersteuerung).

Die Zuschaltung von Synchrongeneratoren muss durch eine geeignete Synchronisierungseinrichtung erfolgen, wobei automatische Synchronisierungseinrichtungen empfohlen werden. Die Zuschaltung von Umrichtern erfolgt stromlos [10].

3.2.3 International

Die IEC 60364-5-55:2001/A2:2008 behandelt im Abschnitt 551: „Niederspannungs-Stromerzeugungseinrichtungen“ [11].

Diese gilt sowohl für Erzeugungseinrichtungen, die im Netzparallelbetrieb arbeiten, als auch für Anlagen, die nur vorübergehend einspeisen bzw. unabhängig vom Niederspannungsnetz betrieben werden (Notstromgeneratoren).

Eine Erzeugungsanlage muss diversen Anforderungen genügen, damit diese sicher betrieben werden kann. Die Schutzeinrichtung der Anlage muss ausreichend bemessen sein, damit das Kurzschluss-Ausschaltvermögen im zulässigen Betriebszustand der Erzeugungsanlage auf keinen Fall überschritten wird. Ein Überschreiten des Leistungsvermögens des Stromerzeugers muss verhindert werden, gegebenenfalls hat eine automatische Trennung von Lasten zu erfolgen. Dies gilt insbesondere, um eine mögliche Gefährdung von Teilen der Anlage zu vermeiden. Der Überstrom-Schutz muss generatornahe ausgeführt sein, da der Kurzschlussstrom aus der Erzeugereinheit gering ist und große Zeitabhängigkeit aufweist.

Etwaige beim Netzparallelbetrieb vorhandene Oberschwingungsströme müssen weitgehend begrenzt werden, um die thermische Belastung der Leiter nicht zu überschreiten. Wichtig für die Schutzfunktion einer Erzeugungsanlage im Netzparallelbetrieb ist, dass sie auf der Versorgerseite der Schutzeinrichtung angeschlossen werden. Der Netzparallelbetrieb des Stromerzeugers darf keine problematischen Rückwirkungen auf das Netz verursachen. Dies gilt insbesondere für den Leistungsfaktor, Spannungsänderungen, die Lastunsymmetrie, nichtlineare Verzerrungen, Gleichstromüberlagerungen und Auswirkungen von Anlauf und Synchronisation. Bei einer Abweichung vom normalen Betriebsbereich (Frequenz, Spannung, Versorgungsunterbrechung) ist eine automatische Abschaltung zu gewährleisten und eine erneute Aufschaltung zu verhindern. Unabhängig von der automatischen Abschalteneinrichtung muss eine Trennung der Erzeugungsanlage vom Netz möglich sein (Entkuppelungsstelle) [11].

3.2.4 Vergleich

Tabelle 3.3 stellt wichtige Parameter aus den zuvor behandelten Grid Codes nationaler, europäischer und internationaler Normung vergleichend gegenüber.

Tabelle 3.3: Vergleich der Grid Codes

		TOR D4	DIN EN 50438	CLC/FprTS 50549-1	VDE-AR-N 4105	IEC 60364-5-55
max. Stromunsymmetrie:		4,6 kVA	-	3,68 kVA	4,6 kVA	-
Sternpunktbehandlung:		$I_{3,OS} < 20 \% \text{ von } I_n$	hochohmig	-	-	thermische Überlast vermeiden
Leistungsfaktor $\cos \varphi$:		>100 kW ≤1 MW:	0,9 übererregt bis 0,95 untererregt	0,9 übererregt bis 0,9 untererregt	>13,8 kVA:	0,9 übererregt bis 0,9 untererregt
		>10 kW ≤100 kW:	0,95 übererregt bis 0,95 untererregt		>3,68 kVA ≤13,8 kVA:	0,95 übererregt bis 0,95 untererregt
		≤10 kW:	1		≤3,68 kVA:	0,95 übererregt bis 0,95 untererregt
Synchronisation:		Synchronisiereinrichtung	Automatisch	-	Automatisch empfohlen	-
Schnittstellenschutz	Überspannung Stufe 1:	-	-	(0,05 - 1) s; (1,0 - 1,3) Un	<100 ms; 1,15 Un	-
	Überspannung Stufe 2:	0,2 s; 230 V + 11 %	0,2 s; 230 V + 15 %	(0,2 - 100) s; (1,0 - 1,2) Un	<100 ms; 1,1 Un	-
	Unterspannung:	0,2 s; 230 V - 15 %	1,5 s; 230 V - 15 %	(0,05 - 5) s; (0,2 - 1) Un	<100 ms; 0,8 Un	-
	Überfrequenz:	0,2 s; 51 Hz	0,5 s; 51 Hz	(0,05 - 20) s; (47 - 50) Hz	<100 ms; 50,2 Hz	-
	Unterfrequenz:	0,2 s; 47 Hz	0,5 s; 47 Hz	(0,05 - 90) s; (50 - 52) Hz	<100 ms; 47,5 Hz	-
	Netzausfall:	max. 5 s	-	Inselnetz-erkennung	Inselnetz-erkennung	-

3.3 Inselnetzbetrieb

Bei einer Störung oder einer Unterbrechung der übergeordneten Netzebenen bzw. einem Ausfall großer Erzeugungsanlagen in einem Netz mit zentraler Versorgungsstruktur, können die im Verteilernetz liegenden Verbraucher nicht mehr ausreichend versorgt werden. Im dezentralen Netzaufbau besteht die Möglichkeit bei Störungen der übergeordneten Netzebenen „Netzinseln“ zu formieren. Diese bilden ein abgegrenztes Teilnetz, das seine Verbraucher selbst über die darin enthaltenen Erzeugungsanlagen versorgen kann.

Eine solche Inselnetzbildung darf nur dort erfolgen, wo diese auch gewünscht ist. Die Bildung einer ungewollten Insel muss durch geeignete Maßnahmen verhindert werden. Zum Beispiel kann bei störungs- und wartungsbedingten Netzfreischaltungen die Kontrolle über das entstandene Inselnetz verloren gehen.

An Inselnetze sind vielfältige Anforderungen zu stellen. Im normalen Verbundbetrieb werden die Spannung und die Frequenz durch das Netz vorgegeben. Fällt das übergeordnete Netz aus, muss dies in der entstandenen Insel erkannt werden und die weitere P-Q-Regelung hat durch die Insel selbst zu erfolgen.

Es ist innerhalb der gebildeten Insel eine Wirk- und Blindleistungsregelung und gegebenenfalls ein gesteuertes Lastmanagement vorzusehen, falls die darin vorhandenen dezentralen Erzeugungskapazitäten nicht explizit auf die maximale Belastung ausgelegt sind. Damit sich Stromerzeugung und Stromverbrauch die Waage halten, sind Zu- bzw. Abschaltmöglichkeiten von Erzeugern und Verbrauchern sowie Netzumschaltungen vorzusehen. Eine weitere Erhöhung der Versorgungssicherheit wird durch die Nutzung unterschiedlicher Primärenergieträger gewährleistet.

Die Rückführung des Inselnetzbetriebes in den Verbundbetrieb (Rücksynchronisation) darf nur bei synchronen Bedingungen (dieselbe Frequenz, dieselbe Phasenlage, dieselbe Spannung, dieselbe Phasenreihenfolge) erfolgen und muss entsprechend gesteuert durchgeführt werden [1].

4 Sternpunktbehandlung

Im zuvor behandelten Kapitel 3.2 Grid Codes wird auf die Ausführung des Sternpunktes dezentraler Erzeugungsanlagen Bezug genommen. In diesem Kapitel wird genauer auf die verschiedenen Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung eingegangen.

4.1 Einleitung

Die Ständerwicklungen von Synchrongeneratoren werden als Sternschaltung ausgeführt. Aufgrund der geometrisch exakt um 120° versetzten Ständerwicklungen bilden sich an den Anschlüssen (Phasen) drei um 120° phasenverschobene Ströme aus. Bei symmetrischer Belastung heben sich diese Phasenströme für die Grundschwingung im Neutralleiter auf. Der Neutralleiterstrom entspricht dann betragsmäßig Null. Aufgrund des nicht vorhandenen Neutralleiterstromes kann auf den Anschluss des Neutralleiters am Sternpunkt der Ständerwicklungen des Synchrongenerators verzichtet werden. Der Verzicht auf den Anschluss des Neutralleiters am Sternpunkt des Generators bringt neben ökonomischen Gründen (Kupfereinsparungen, etc.) auch technische Vorteile. Anders als bei den zuvor beschriebenen Gegebenheiten bilden sich im Neutralleiter Ströme aus, welche aufgrund von unsymmetrischer Last bzw. nichtlinearen Verbrauchern entstehen (siehe Kapitel 5 Oberschwingungen). Die im Neutralleiter summierten gleichphasigen Oberschwingungsströme können in der Regel sehr hohe Werte erreichen und im schlimmsten Fall den Generatorbemessungsstrom übersteigen. Da es sich dabei um reine Verschiebungsblindleistung handelt, tragen diese Ströme nur zur Erwärmung der Generatorwicklungen bei und erhöhen dadurch die Belastung bzw. die Verluste. Durch den Verzicht auf den Anschluss des Generatorsternpunktes können sich diese Oberschwingungs-Nullströme nicht mehr über den Generator ausbilden und die dadurch entstehende Belastung wird unterbunden [12].

In Kraftwerksblöcken erfolgt die Energieerzeugung meist über leistungsstarke Synchrongeneratoren. Diese Generatoren speisen über Blocktransformatoren in die jeweilige Netzebene ein. Der Sternpunkt des Generators wird sehr hochohmig mit Erde verbunden. Dadurch können Generatorschutzfunktionen wie beispielsweise der Ständererdschlussschutz gewährleistet werden [13].

Anders als in Kraftwerksblöcken ergeben sich bei der Einspeisung dezentraler Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz andere Anforderungen an die Sternpunktbehandlung. Daher werden die dort möglichen Sternpunktbehandlungen näher betrachtet.

4.2 Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen

Wie im Kapitel 3 Dezentrale Energieversorgung – Grid Codes bereits erwähnt, speisen dezentrale Erzeugungsanlagen im Mittel- und Niederspannungsnetz ein. Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz müssen im Gegensatz zu leistungsstarken Generatoren großer Kraftwerke anderen Anforderungen genügen, speziell im Hinblick auf Schutzeinrichtungen und den Personenschutz.

Die Einbindung der Erzeugungsanlage, speziell des Generatorsternpunktes in die jeweilige Niederspannungs-Netzform ist zu beachten. Denn die vorhandenen Schutzeinrichtungen dürfen durch die Einspeisung in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt oder eingeschränkt werden.

Niederspannungsnetze werden in TT-, TN- und IT-Netz untergliedert. Die Buchstabenkombination gibt gleichzeitig die Netzform vor. Der erste Buchstabe steht für die Ausführungsform des Transformatorsternpunktes. **T** („terre“ – Erde) bedeutet, dass der Transformatorsternpunkt niederohmig mit Erde verbunden ist, **I** („isolé“ – isoliert) ist die Betriebsweise mit isoliertem Sternpunkt. Am zweiten Buchstaben ist die anlagenseitige Behandlung berührbarer, leitfähiger Teile einer Anlage erkennbar. Die Anlagenteile von Netzen mit einem **N** („neutre“ – neutral) sind mit dem Transformatorsternpunkt leitfähig verbunden. Das **T** steht wiederum für Erdung, d.h. das Anlagenteil ist mit dem lokalen Erder verbunden. Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten von Niederspannungsnetzen. Das TN Netz kann in **TN-C** („combiné“ – kombiniert) und **TN-S** („séparé“ - separat) unterteilt werden, also wird die Ausführungsform des Neutralleiters festgelegt. Im TN-C-Netz wird der Neutralleiter und der Erdleiter als gemeinsamer Leiter (PEN) ausgeführt. Beim TN-S-Netz sind diese beiden Leiter separat ausgeführt. Wird das TN-C-Netz mit dem TN-S-Netz kombiniert, entsteht das heute am meisten verwendete Netzsystem, das TN-C-S-Netz. Hierbei wird das Netz vom Verteilnetzbetreiber als TN-C-Netz ausgeführt und an der Schnittstelle zur Verbraucheranlage (Zählerkastenanschluss) in das TN-S-Netz überführt [12].

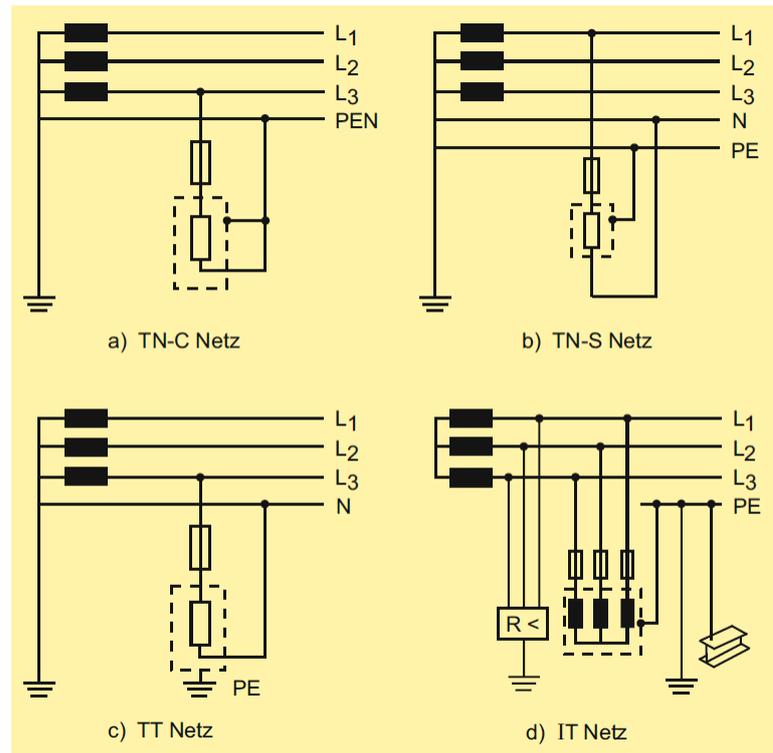


Abbildung 4.1: Niederspannungs-Netzformen,
a) TN-C Netz, b) TN-S Netz, c) TT Netz, d) IT Netz [12]

Der Sternpunkt von Generatoren dezentraler Erzeugungsanlagen kann auf unterschiedliche Weise mit dem Niederspannungsverteilstromnetz verbunden werden. Die Anbindung kann:

- isoliert,
- mittels einer Kompensationsreaktanz oder
- niederohmig

erfolgen. Die Ausführung des Generatorsternpunktes von dezentralen Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz wird in den existierenden Normen und Richtlinien wie folgt behandelt:

Der österreichische Regulator E-Control schreibt in seinen Technischen und organisatorischen Richtlinien (TOR) im Hauptabschnitt D4:

„Synchrongeneratoren können ebenfalls mit isoliertem Sternpunkt betrieben werden. Bei Synchrongeneratoren, deren Sternpunkt mit dem PEN-Leiter des Netzes verbunden wird, darf dies nur dann direkt erfolgen, wenn der auftretende Oberschwingungsstrom³ über den Sternpunkt weniger als ca. 20 % des Bemessungsstroms des Generators beträgt. Höhere Ströme erfordern gegebenenfalls den Einbau einer Sternpunktdrossel bzw. anderweitige Maßnahmen [4].“

In der deutschen Fassung der Europäischen Norm DIN EN 50438 ist beschrieben, dass zwischen Generatorwicklung und dem Erdanschlusspunkt des Verteilnetzbetreibers (Transformatorsternpunkt) während des Netzparallelbetriebes keine Verbindung bestehen

darf. Ist das Niederspannungsnetz als TT-Netz aufgebaut, wird die Vermeidung des Anschlusses nahegelegt. Bei Photovoltaikanlagen erfolgt die Einspeisung beispielsweise über einen Wechselrichter, dabei kann ein Pol der Gleichstromseite mit dem Verteilernetz verbunden werden [7].

Die internationale Norm IEC 60364-5-55 empfiehlt den Sternpunkt einer Stromerzeugungseinrichtung über eine Impedanz auszuführen um Oberschwingungsströme einzugrenzen. Die Impedanz wird so bemessen, dass die Oberschwingungsströme den thermischen Bemessungswert der Leiter nicht überschreiten [11].

Im Zweifelsfall empfehlen die Normen und Richtlinien für den Anschluss des Generators den Sternpunkt nicht bzw. nur sehr hochohmig anzuschließen. Dies dient vor allem dem Zweck, große Oberschwingungs-Neutralleiterströme über die Erzeugungsanlage im Normalbetrieb und damit einhergehende Probleme zu vermeiden, nicht aber um im Fehlerfall den nötigen Strom für die Auslösung zugehöriger Schutzeinrichtungen zu gewährleisten.

4.3 Symmetrische Komponenten

Die Berechnung von Strömen und Spannungen in einem Drehstromsystem kann über die Methode der symmetrischen Komponenten durchgeführt werden.

In einem 3-phasigen Drehstromsystem sind die Ströme und Spannungen der einzelnen Phasen miteinander und gegenüber Erde verkoppelt. Diese Koppelung erfolgt kapazitiv, induktiv und ohmsch [14]. Eine unsymmetrische Belastung, wie beispielsweise bei 1-poligem Fehler gegen Erde, hat Auswirkungen auf das gesamte Drehstromsystem.

Mit Hilfe der Methode der symmetrischen Komponenten können Ströme und Spannungen in Drehstromsystemen als mathematisch entkoppelt beschrieben werden. Die Transformation in dieses System geht auf C. L. FORTESCUE zurück [15]. Sie besteht aus drei symmetrischen Komponenten, dem Mit-, dem Gegen- und dem Nullsystem, welche in den nachfolgenden Formeln mit den hochgestellten Indizes (1, 2, 0) gekennzeichnet sind.

„Das Mitsystem beschreibt symmetrische Vorgänge, bei unsymmetrischen Vorgängen muss außerdem das Gegensystem berücksichtigt werden, das Nullsystem beschreibt zusätzlich alle Vorgänge mit Erdberührung [14].“

Die Transformation in die symmetrischen Komponenten erfolgt mittels der Symmetrierungsmatrix \underline{S} die in Formel (4.1) dargestellt ist.

$$\underline{S} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Wendet man die Symmetrierungsmatrix auf die drei Phasenströme eines Drehstromsystems an, ergibt sich Formel (4.2).

$$\underline{I}^S = \begin{bmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Mit der Entsymmetrierungsmatrix \underline{T} , Formel (4.3), kann man die Ströme oder Spannungen aus den symmetrischen Komponenten ermitteln.

$$\underline{T} = \underline{S}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Angewandt auf das Mit-, Gegen- und Nullsystem, der zuvor transformierten Phasenströme, ergibt sich die Beziehung (4.4).

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Der in den zuvor behandelten Formeln beschriebene Drehvektor \underline{a} (4.5) symbolisiert eine Vektordrehung im komplexen Raum um 120° , im mathematisch positiven Drehsinn.

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{i120^\circ} \text{ mit } 1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad (4.5)$$

Die in den Gleichungen (4.2) und (4.4) angegebenen Transformationen für Phasenströme erfolgen analog für Phasenspannungen. Impedanzen stehen mit den Strömen und Spannungen im, unter Formel (4.6), gezeigtem Zusammenhang. \underline{Z} symbolisiert dabei die Impedanzmatrix, welche aus den Mitimpedanzen entlang der Hauptdiagonalen und den Koppelimpedanzen außerhalb der Hauptdiagonalen der Matrix besteht. Gleichung (4.7) zeigt den Zwischenschritt zur Ermittlung der Impedanzmatrix in symmetrischer Komponentenform (4.8).

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (4.6)$$

$$\underline{S} \cdot \underline{U} = \underline{S} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{T} \cdot \underline{I}^S \quad (4.7)$$

$$\underline{Z}^S = \underline{S} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{T} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}^1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Bei exakt symmetrischen Koppelreaktanzen verschwinden die Koeffizienten ungleich der Hauptdiagonalen der in symmetrische Komponenten übergeführten Impedanzmatrix \underline{Z}^S . Die Mit-, Gegen- und Nullimpedanz ist entkoppelt und messbar [16].

Aufgrund der Entkoppelung der Impedanzen ergeben sich die drei Ersatzschaltbilder nach Abbildung 4.2.

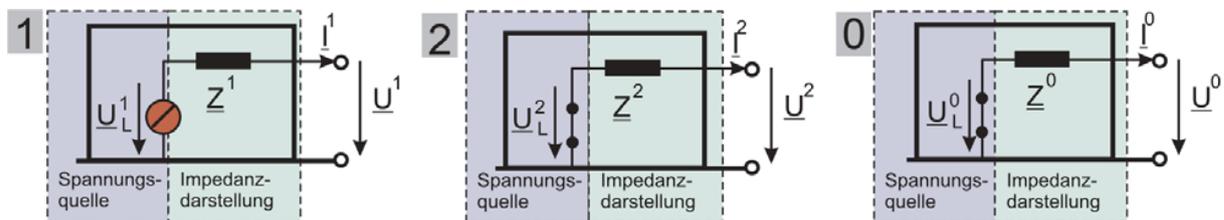


Abbildung 4.2: Ersatzschaltungen der symmetrischen Komponenten [16];

(1) Mitsystem, (2) Gegensystem, (0) Nullsystem

Die Ersatzspannungsquelle ist nur im Mitsystem (1) vorhanden, da von einem symmetrischen Aufbau der Maschine ausgegangen wird. Im Fehlerfall verschalten sich die drei Komponentenersatzschaltbilder an der Fehlerstelle. Alle im System auftretenden Fehlerströme bzw. Fehlerspannungen können daraus bestimmt werden [17].

Die Sternpunktbehandlung hat einen ausschlaggebenden Anteil an der Nullimpedanz im jeweiligen Netz. Je nach Ausführungsform des Sternpunktes kann sich der Nullstrom mehr oder weniger gut ausprägen. Dies ist speziell im 1-poligen Fehlerfall gegen Erde interessant [18].

4.4 1-poliger Fehler gegen Erde

Der 1-polige Fehler gegen Erde ist der am häufigsten vorkommende Fehler in Drehstromsystemen. Zum Beispiel kann dieser Fehler bei einem Isolationsverlust einer Phase entstehen. D.h. im Fehlerfall kommt es zu einem Ausgleichsstrom zwischen dem fehlerhaften Leiter und Erde. Dieser hebt das Erdpotential und senkt das Potential der Phase, sodass die Potentialdifferenz an der Fehlerstelle Null ergibt. Aufgrund des im Kapitel 4.3 beschriebenen Zusammenhanges zwischen den drei Phasen eines Drehstromsystems hat der Erdschluss auch eine Auswirkung auf die beiden nicht fehlerbehafteten Phasen [19].

Abbildung 4.3 zeigt wie sich ein 1-poliger Fehler gegen Erde auf die Spannungen und Ströme in einem Drehstromsystem, in Abhängigkeit von der Entfernung zur Fehlerstelle, auswirkt.

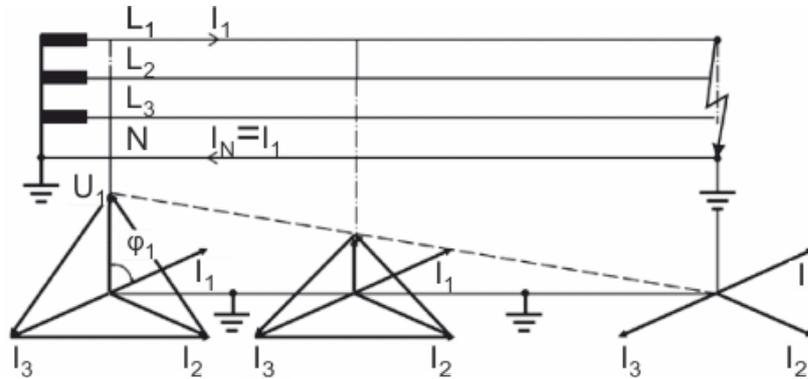


Abbildung 4.3: Auswirkungen des 1-poligen Fehler auf das Drehstromsystem [19]

Abhängig von der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Sternpunktbehandlung des Niederspannungsnetzes ergeben sich für den 1-poliger Fehler gegen Erde verschiedene Ausprägungen, welche mit der Methode der symmetrischen Komponenten berechnet werden können. Abhängig von der jeweiligen Sternpunktbehandlung können die auftretenden Fehlerströme berechnet werden. In dieser Arbeit werden folgende Sternpunktbehandlungen behandelt:

- Niederohmig geerdeter Sternpunkt
- Isolierter Sternpunkt
- Erdschlusskompensation

4.4.1 Niederohmig geerdeter Sternpunkt

In Netzen mit niederohmig geerdetem Sternpunkt verschalten sich im Falle des 1-poligen Fehlers gegen Erde ($L_1 - PE$) die drei Ersatzschaltungen für symmetrische Komponenten (Abbildung 4.2) an der Fehlerstelle, wie in Abbildung 4.4 gezeigt ist.

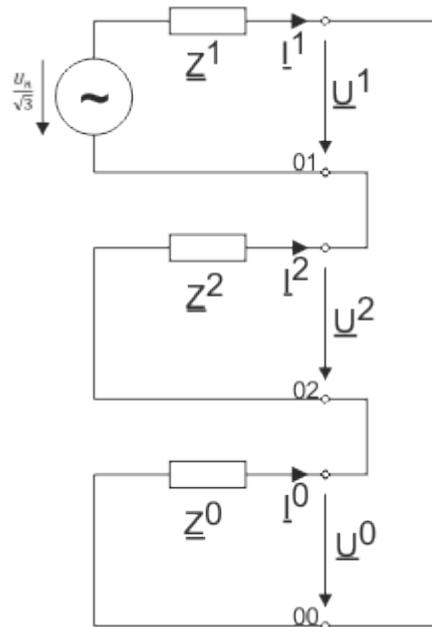


Abbildung 4.4: Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten im Falle eines 1-poligen Fehlers gegen Erde in einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung [14]

Aus dem Ersatzschaltbild in symmetrischer Komponentenform kann folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$\underline{I}^0 = \underline{I}^1 = \underline{I}^2 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\underline{Z}^0 + \underline{Z}^1 + \underline{Z}^2} \quad (4.9)$$

Zusätzlich kann angenommen werden, dass die Impedanzen des Mit- und Gegensystems annähernd gleich sind.

$$\underline{Z}^1 \approx \underline{Z}^2 \quad (4.10)$$

Unter Anwendung der Entsymmetrierungsmatrix des kurzgeschlossenen Leiters kann aus Bedingung (4.9) \underline{I}_{KS} berechnet werden.

$$\underline{I}_{KS} = \underline{I}_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2 \cdot \underline{Z}^1 + \underline{Z}^0} \quad (4.11)$$

4.4.2 Isolierter Sternpunkt

In der Betrachtung des 1-poligen Fehlers in isoliert betriebenen Netzen müssen die Kapazitäten gegen Erde berücksichtigt werden. Sie sind im Wesentlichen für die Höhe des Fehlerstromes verantwortlich [14].

Die Kapazitäten der Leitungen bestimmen den Strom, die Kapazitäten der übrigen Netzelemente können vernachlässigt werden. Die Längsreaktanzen (Leitungen, Transformatoren,...) der Netzelemente können ebenfalls vernachlässigt werden, da die Querimpedanzen C_E im Vergleich zu diesen sehr hochohmig sind. Der Erdschlussstrom wird aus dem Ersatzschaltbild (Abbildung 4.5) mit Hilfe der symmetrischen Komponenten berechnet. Im Fehlerfall überlagert sich dieser relativ kleine Erdschlussstrom mit dem normalen Betriebsstrom [18].

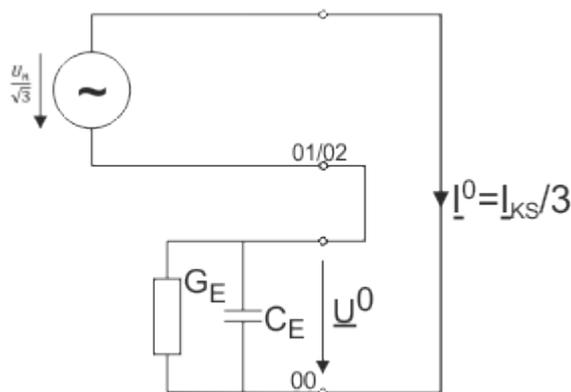


Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten im Falle eines 1-poligen Fehlers gegen Erde in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt [14]

Der Kurzschlussstrom I_{KS} errechnet sich bei Vernachlässigung der Querableitwiderstände nach Gleichung (4.12).

$$I_{KS} = I_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot j \cdot \omega \cdot C_E \quad (4.12)$$

Abbildung 4.6 zeigt im Fehlerfall die Leiter-Erde-Spannungen der einzelnen Phasen. Die gesunden Phasen können Werte bis zur verketteten Spannung gegenüber Erde annehmen.

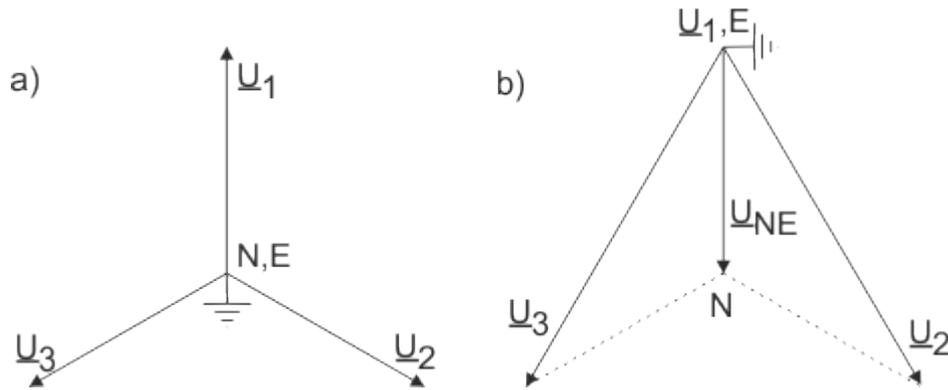


Abbildung 4.6: Zeigerdiagramme eines Netzes mit isoliertem Sternpunkt [14];

a) Normalbetrieb, b) 1-poliger Fehler gegen Erde

4.4.3 Erdschlusskompensation

Im Sternpunkt wird eine Erdschlusslöschspule (Erdschlusskompensation) angebracht. Das Ersatzschaltbild erweitert sich gegenüber dem Ersatzschaltbild mit isoliertem Sternpunkt um die Spule L_D . Diese muss mit ihrem dreifachen Wert berücksichtigt werden, da diese im Sternpunkt angebracht ist und somit nach der Transformation dreimal im Nullsystem vorhanden ist. Ebenso werden nur die Nullimpedanzen berücksichtigt. Diese ergeben sich aus den Leitungskapazitäten und der Erdschlusslöschspule wie in Abbildung 4.7 ersichtlich ist [14].

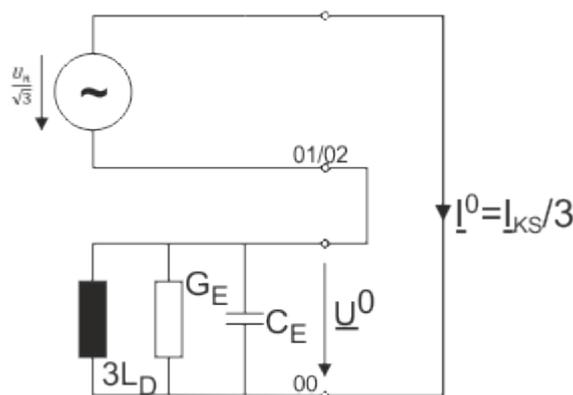


Abbildung 4.7: Ersatzschaltbild der symmetrischen Komponenten im Falle des 1-poligen Fehlers gegen Erde in einem Netz mit Erdschlusskompensation [14]

Der entstandene Parallelschwingkreis kann nach Formel (4.13) auf Resonanz abgestimmt werden, zu beachten ist allerdings, dass man den dreifachen Reaktanzwert der Leitungskapazität für die Erdschlussppule verwendet.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot L_D \cdot C_E}} \quad (4.13)$$

Im Fehlerfall kommt es auch bei optimalen Resonanzverhalten zu einem Reststrom bzw. Erdschlussstrom, der sich aus den ohmschen Anteilen der verwendeten Komponenten ergibt. Die Größe dieses Reststromes wird vor allem durch die Verluste im Nullsystem, vornehmlich in der Erdschlussppule bestimmt. Die Abstimmung des Resonanzkreises erfolgt für die Netzfrequenz. Bei Vorhandensein von Oberschwingungen erhöht sich der Erdschlussstrom zusätzlich [18].

Der Erdschlussstrom kann aus dem Ersatzschaltbild (Abbildung 4.7) nach den Gleichungen (4.14) und (4.15) bei Vernachlässigung der Querableitwiderstände berechnet werden.

$$X_{Schwingkreis} = \frac{\omega \cdot L_D \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_E}}{\omega \cdot L_D + \frac{1}{\omega \cdot C_E}} \quad (4.14)$$

$$I_{KS} = I_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{j \cdot X_{Schwingkreis}} \quad (4.15)$$

Nach Eintritt des Fehlers erhöhen sich die beiden „gesunden“ Leiterspannungen auf etwa den Wert der verketteten Spannung.

5 Oberschwingungen

Dieses Kapitel setzt sich mit den Oberschwingungen und deren Verhalten auseinander, um die im Abschnitt Messungen (Kapitel 7) entstehenden Effekte beschreiben und nachvollziehen zu können.

Oberschwingungen sind sinusförmige Signale, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz ist. Sie überlagern die Grundschwingung und führen zu einer Verzerrung des sinusförmigen Signals [20].

Ein nichtsinusförmiges Signal lässt sich durch Summation verschiedener sinusförmiger Signale, mit bestimmter Frequenz und bestimmter Amplitude, darstellen. Umgekehrt kann jedes nichtsinusförmige Signal in seine einzelnen sinusförmigen Komponenten zerlegt werden. Diese Aufteilung wird Fourieranalyse genannt und geht auf J. B. J. FOURIER zurück [21].

5.1 Ursachen

Die Ursache einer Beeinträchtigung der Spannungsqualität durch Oberschwingungen liegt in der nichtsinusförmigen Stromaufnahme elektrischer Verbraucher und der damit einhergehenden Beeinflussung der Netzspannung. Am häufigsten kommen die dritte Oberschwingung (150 Hz), die fünfte Oberschwingung (250 Hz) und die siebente Oberschwingung (350 Hz) in elektrischen Netzen vor. Die dritte Oberschwingung entsteht durch einphasige Lasten, die beiden anderen durch dreiphasige Betriebsmittel [22].

Grundsätzlich unterscheidet man Oberschwingungserzeuger laut Tabelle 5.1:

Tabelle 5.1: Oberschwingungserzeuger [6]

Art:	Beispiele:
Betriebsmittel der Leistungselektronik	Stromrichterantriebe, Gleichrichteranlagen, Dimmer
Massengeräte mit Gleichstromversorgung	Fernsehgeräte, Kompaktleuchtstofflampen mit eingebautem elektronischem Vorschaltgerät, IT-Geräte
Betriebsmittel mit nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinie	Induktions- und Lichtbogenöfen, Gasentladungslampen, Motoren, Kleintransformatoren, Drosseln mit Eisenkern

5.2 Auswirkungen

Ein überschwingungsbehaftetes Signal beeinflusst einerseits das hinterlagerte Versorgungsnetz, andererseits auch die elektrischen Betriebsmittel innerhalb der Anlage selbst. Es ergeben sich eine Vielzahl von Auswirkungen [20]:

- Überlastung von Neutralleitern
- Fehlauslösung von Leitungsschutzschaltern / Leistungsschaltern
- Überhitzung von Transformatoren
- Überbeanspruchung von Kompensations-Kondensatoren
- Skineffekte
- Spannungsverzerrungen
- Überhitzung von Drehfeldmotoren
- Nulldurchgangsstörungen

Um diese Auswirkungen gering zu halten, hat man Emissions-Grenzwerte für die Oberschwingungsströme definiert. Für das Niederspannungsnetz sind diese in der Norm DIN EN 61000-3-2 festgehalten [23].

Die Bewertung der Auswirkungen der Oberschwingungen erfolgt mit Hilfe verschiedener Parameter [24].

Oberschwingungsgehalt (Total Harmonic Factor - THF) – Verhältnis zwischen dem Oberschwingungsanteil und dem Effektivwert des Gesamtsignals.

$$THF = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{eff}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Gesamtverzerrung (Total Harmonic Distortion - THD) – Verhältnis des Oberschwingungsanteiles zum Anteil der Grundschwingung (GS - 50Hz).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{GS}} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Relative Oberschwingung (Harmonic Ratio - HR) – Prozentueller Anteil des Stromes einer Oberschwingung am Strom der Grundschwingung (GS - 50Hz).

$$HR = \frac{I_v}{I_{GS}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

Verzerrungsblindleistung (Distortion - D) – Jener Anteil der Blindleistung, der von nichtlinearen Verbrauchern hervorgerufen wird. Das Leistungsdreieck wird dreidimensional, D steht senkrecht auf die von den Vektoren Wirkleistung P (lt. Messung) und Blindleistung Q (50 Hz - Komponente) aufgespannte Ebene.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (5.4)$$

Im Messungsteil (Kapitel 7) dieser Arbeit werden sämtliche Messungen hinsichtlich der dritten Oberschwingung ausgewertet. Deshalb wird das theoretische Verhalten der dritten Oberschwingung näher betrachtet, um die in der Arbeit behandelte Problemstellung lösen zu können.

5.3 Verhalten und Einfluss der dritten Oberschwingung

Die dritte Oberschwingung liefert, da sie eine niedrigere Ordnungszahl besitzt, einen großen Beitrag in der Oberschwingungsbilanz (höhere Ordnungszahlen bedeuten aufgrund der höheren Frequenz größere Längsimpedanzen, die Oberschwingungsströme werden also stärker gedämpft). Die dritte Oberschwingung ist vor allem bei der Entscheidung über die Sternpunktbehandlung (siehe Kapitel 4) des Generators und bei der Untersuchung von Fehlern gegen Erde von großem Interesse.

In einem symmetrisch belasteten, dreiphasigen Drehstromsystem fließt in allen drei Phasen derselbe, um 120° phasenverschobene, Grundsicherungsstrom. Im Neutralleiter addieren sich diese Ströme zu Null (Abbildung 5.1 d).

Die Stromkomponenten der dritten Oberschwingung hingegen fließen in allen drei Phasen gleichphasig. Im Sternpunkt addieren sich ihre Amplituden und es kommt zu einem sehr hohen Neutralleiterstrom. Dieser kann im ungünstigsten Fall Werte bis zum Dreifachen des Phasenstromes erreichen [22].

Abbildung 5.1 zeigt das Verhalten der Grundsicherungsstrom und der dritten Oberschwingung in einem Drehstromsystem.

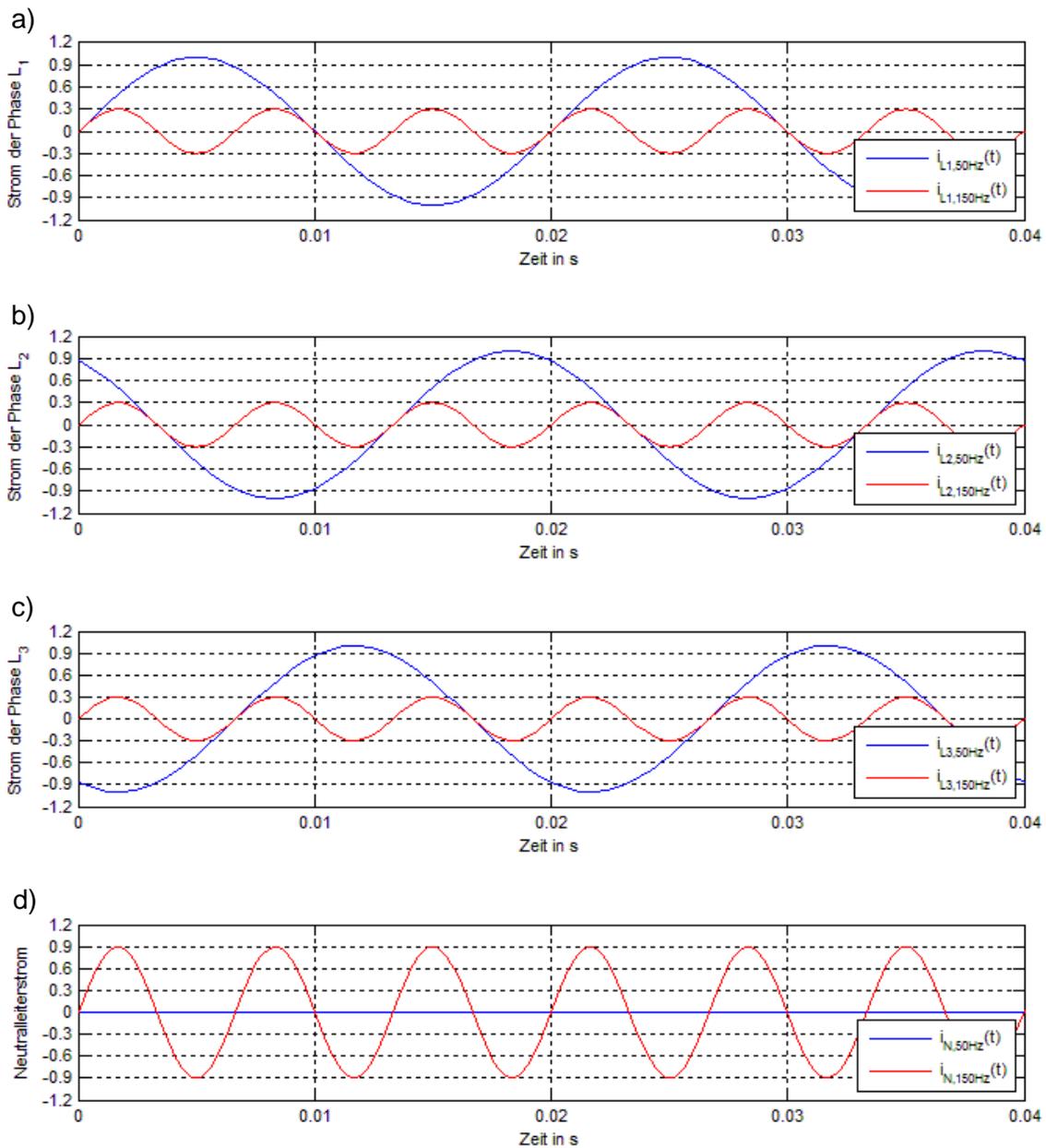


Abbildung 5.1: Grundschwingungsstrom und Strom der 3.OS in:

a) Phase L₁, b) Phase L₂, c) Phase L₃, d) Neutralleiter

Die Gleichungen (5.5), (5.6) und (5.7) stellen die drei Phasenströme der dritten Oberschwingung dar.

$$i_{L1,150Hz}(t) = \hat{I}_{L1,150Hz} \cdot \sin[3 \cdot \omega t + \varphi_{150Hz}] \quad (5.5)$$

$$i_{L2,150Hz}(t) = \hat{I}_{L2,150Hz} \cdot \sin\left[3 \cdot \left(\omega t - \frac{T}{3}\right) + \varphi_{150Hz}\right] \quad (5.6)$$

$$i_{L3,150\text{Hz}}(t) = \hat{I}_{L3,150\text{Hz}} \cdot \sin \left[3 \cdot \left(\omega t - \frac{2T}{3} \right) + \varphi_{150\text{Hz}} \right] \quad (5.7)$$

Die drei Phasenwellen der dritten Oberschwingung mit der Periodendauer T sind periodisch (5.8), dadurch ergibt sich, dass bei gleichen Spitzenwerten der Strom in Phase 2 ($i_{L2,150\text{Hz}}(t)$) dem Strom der Phase 1 ($i_{L1,150\text{Hz}}(t)$) entspricht (Gleichung (5.9)). Dasselbe gilt auch für die Phase 3 ($i_{L3,150\text{Hz}}(t)$, Gleichung (5.10)).

$$i(t) = i(t + T) \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} i_{L2,150\text{Hz}}(t) &= \hat{I}_{L2,150\text{Hz}} \cdot \sin \left[3 \cdot \left(\omega t - \frac{T}{3} \right) + \varphi_{150\text{Hz}} \right] = \\ &\hat{I}_{L2,150\text{Hz}} \cdot \sin[3 \cdot \omega t - T + \varphi_{150\text{Hz}}] = i_{L1,150\text{Hz}}(t) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} i_{L3,150\text{Hz}}(t) &= \hat{I}_{L3,150\text{Hz}} \cdot \sin \left[3 \cdot \left(\omega t - \frac{2T}{3} \right) + \varphi_{150\text{Hz}} \right] = \\ &\hat{I}_{L3,150\text{Hz}} \cdot \sin[3 \cdot \omega t - 2 \cdot T + \varphi_{150\text{Hz}}] = i_{L1,150\text{Hz}}(t) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Aufgrund der gezeigten Phasengleichheit der dritten Oberschwingung in allen drei Phasen im symmetrisch aufgebauten Drehstromsystem kann für den Neutralleiter die folgende Beziehung hergestellt werden (5.11).

$$i_{N,150\text{Hz}}(t) = i_{L1,150\text{Hz}}(t) + i_{L2,150\text{Hz}}(t) + i_{L3,150\text{Hz}}(t) = 3 \cdot i_{L1,150\text{Hz}}(t) \quad (5.11)$$

In Dreieckschaltungen bilden die Ströme der dritten Oberschwingung einen Kreisstrom. Dies hat den Vorteil, dass eine Begrenzung der Ausbreitung der dritten Oberschwingung durch Transformatoren mit einer im Dreieck verschalteten Wicklung möglich ist [20]. Jedoch ergeben sich durch den Kreisstrom im Transformator auch Nachteile, wie z.B. zusätzliche Erwärmung, eine Verkürzung der Lebensdauer, Lärm, erhöhte Leitungsverluste, etc. [22]. Abbildung 5.2 zeigt die Ausbreitung der dritten Oberschwingung in einem Transformator mit Dreieck-/Stern- Verschaltung.

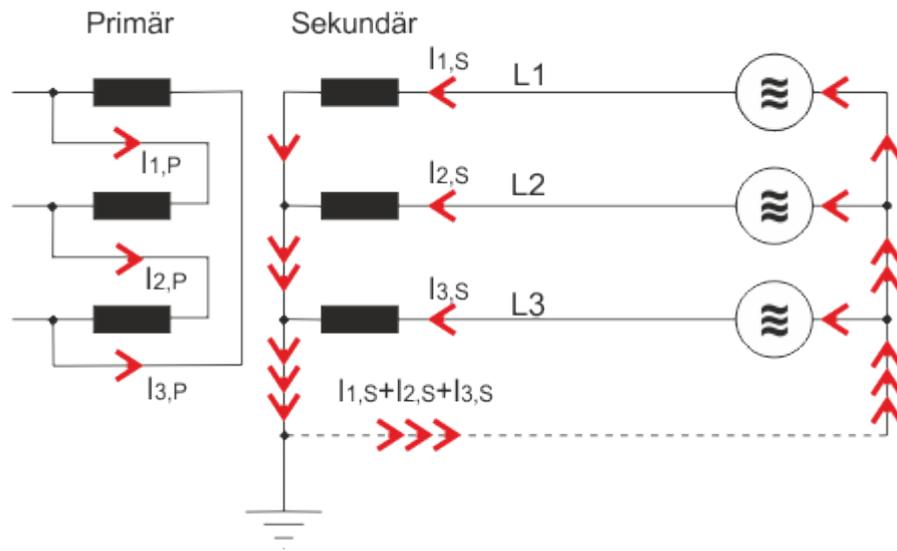


Abbildung 5.2: Ausbreitung der 3.OS im Transformator mit Dreieck-/Stern- Schaltung, [12]

$I_{1,P}$...Strom Phase L1 Primärseite, $I_{2,P}$...Strom Phase L2 Primärseite, $I_{3,P}$...Strom Phase L3 Primärseite, $I_{1,S}$...Strom Phase L1 Sekundärseite, $I_{2,S}$...Strom Phase L2 Sekundärseite, $I_{3,S}$...Strom Phase L3 Sekundärseite,

Gleiche Überlegungen wie bei der dritten Oberschwingung ergeben sich auch für die 9., 15., etc. Oberschwingung [12]. Jedoch sind diese nur zu einem verschwindend geringen Anteil im Netz vorhanden. Dies begründet sich dadurch, dass Oberschwingungen höherer Ordnungszahl aufgrund der höheren Frequenz durch höhere Impedanzen abgeschwächt werden.

5.4 Fast-Fourier-Transformation

Die Fast-Fourier-Transformation wird verwendet, um aus einem zeitdiskreten (abgetasteten) Signal, dessen Oberschwingungen rechnerisch bestimmen zu können. Dabei handelt es sich um eine effizient implementierte Form der Diskreten Fourier Transformation (DFT). Die DFT ist nach Gleichung (5.12) definiert.

$$\underline{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \underline{x}(nT_A) \cdot e^{-i \frac{2\pi kn}{N}} \quad (5.12)$$

$\underline{x}(nT_A)$ Diskretes Signal im Zeitbereich, Dimension abhängig von der jeweiligen ausgewerteten Größe

$\underline{X}(k)$ Komplexes Signal im Frequenzbereich, Dimension abhängig von der jeweiligen ausgewerteten Größe

- k Index der diskreten Frequenzstellen, dimensionslos
- n Index der Abtastwerte, dimensionslos
- T_A Abtastperiodendauer, s
- N Anzahl der Abtastwerte, dimensionslos

Als Lösung der DFT erhält man ein diskretes Frequenzspektrum. Die einzelnen Beiträge im Frequenzspektrum befinden sich an den Positionen der diskreten Auswertefrequenzen $\underline{X}(k)$ nach Formel (5.13). Den Abstand zwischen zwei Beiträgen im Frequenzspektrum bezeichnet man als Auflösung [25].

$$\underline{X}(k) = k \cdot \frac{1}{N \cdot T_A} \tag{5.13}$$

5.4.1 Fensterung

Die Fensterung beschreibt die Auswahl einer bestimmten Anzahl von N Abtastwerten und deren Gewichtung. Aus dem entnommenen Teilstück wird ein neues Signal mit N zeitdiskreten Messwerten aus dem Eingangssignals gebildet, dieser Vorgang wird Fensterung genannt. Ein mögliches Fenster ist das Rechteckfenster (Abbildung 5.3). Dieses hat den Vorteil, dass keine Gewichtung im Gegensatz zu anderen Fensterfunktionen stattfindet [26].

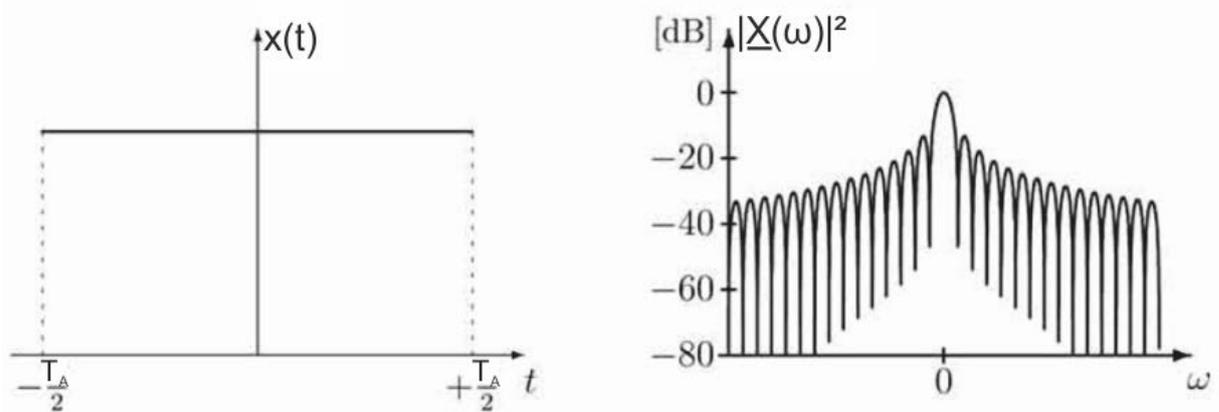


Abbildung 5.3: Rechteckfenster im Zeit- und Frequenzbereich [26]

Wird das Eingangssignal mit einem Rechteckfenster der Länge $N \cdot T_A$ multipliziert, ist dies mit einer Faltung im Frequenzbereich gleichzusetzen. Durch die Faltung kommt es zu einer „Verschmierung“ des Frequenzspektrums, aus dieser Eigenschaft entsteht der Leckeffekt [25].

5.4.2 Leckeffekt

Der Leckeffekt entsteht, da die Fensterlänge in der Regel kein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer des Eingangssignals ist.

„Das aus der DFT resultierende Spektrum ist deutlich breiter, da die tatsächliche Signalfrequenz zwischen zwei Auswertefrequenzen liegt und darüber hinaus die Nullstellen der Fensterfunktion nicht mehr auf die benachbarten Auswertefrequenzen fallen [25].“

Durch den Leckeffekt ergeben sich neben der Verbreiterung des Spektrums auch Amplitudenfehler. Beide Abweichungen können durch die Wahl unterschiedlicher Fensterfunktion wie zum Beispiel, Hann-, Blackman-, Kaiserfenster, etc. an die konkrete Problemstellung angepasst werden [27].

5.5 Synchrongenerator

Das Verhalten der dritten Oberschwingung eines Synchrongenerators ist im Wesentlichen durch dessen Nullreaktanz bestimmt. Dies ist darin begründet, dass es sich bei der dritten Oberschwingung um ein Nullsystem handelt. Ein Nullsystem bildet im Synchrongenerator kein Drehfeld aus, es entstehen lediglich Streufelder. Aufgrund dieser Streufelder hängt die Nullreaktanz von der Zonenbreite, der Sehnung und Ausführung der Wickelköpfe der Ständerwicklung ab [28].

5.6 Wechselrichter

Das Verhalten der dritten Oberschwingung bei einem Wechselrichter hängt von dessen Typ, den verwendeten Leistungshalbleitern (z.B.: IGBT) und dessen Schaltung ab.

Die Spannungskurvenform wird beispielsweise während den Kommutierungsvorgängen verzerrt. Es müssen geeignete Maßnahmen wie Strom-, bzw. Spannungsglättung ausgeführt sein, damit die Grenzwerte der Normenreihe EN 61000-3 eingehalten werden können [29].

6 Begleitende Berechnungen

Simuliert wird ein Netzmodell, bestehend aus einem Transformator in Dreieck-/Stern-Schaltung, einem Synchrongenerator beliebiger Leistung, einer Leitung und einer Last. Verwendet wird dazu das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, USA), welches die nötigen Rechenmöglichkeiten bietet und eine gute grafische Aufbereitung ermöglicht. Schematisch ist der simulierte Netzabschnitt in Abbildung 6.1 dargestellt.

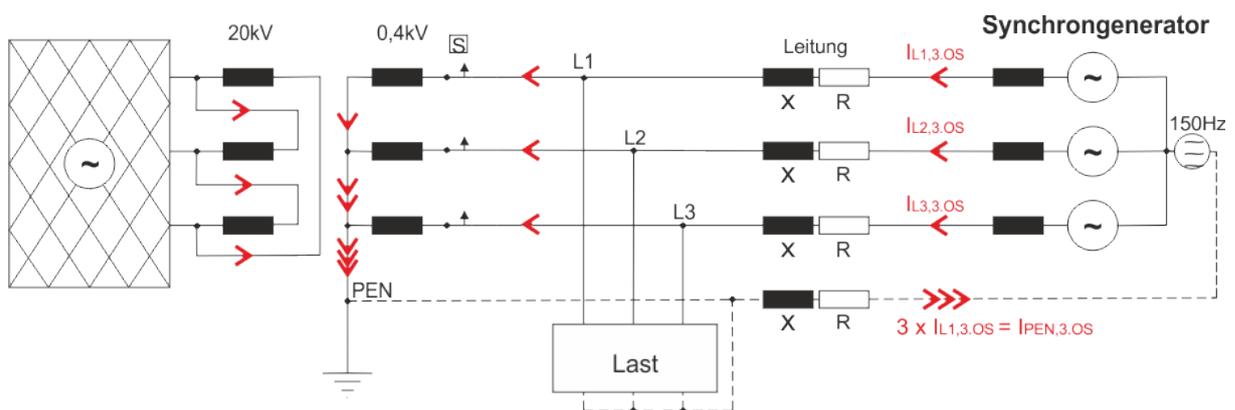


Abbildung 6.1: Excel-Simulation der dritten Oberschwingung – Netzmodell

Die dritten Oberschwingungsströme werden sowohl für den Netzparallelbetrieb als auch für den Inselnetzbetrieb (Schalter S, an dem die drei Leiter der Transformator Sekundärseite geöffnet sind) berechnet. Die Last kann variabel eingestellt werden und wird in den Berechnungen berücksichtigt.

Die Simulation soll die betragsmäßige Größe der dritten Oberschwingung in den Leitern ermitteln und die Messergebnisse validieren. Dargestellt wird das unter 5.3 beschriebene theoretische Verhalten und der Einfluss der dritten Oberschwingung auf den Generatorsternpunkt. Beispielsweise, dass im PEN-Leiter der dreifache Oberschwingungsstrom der einzelnen Phasen fließt.

Die dritte Oberschwingung bildet unter idealen Bedingungen ein reines Nullsystem, deshalb können die Ströme über dieses Nullsystem errechnet werden. Dazu müssen die Reaktanzen der im Netzmodell vorhanden Komponenten eingegeben werden. Berechnet wird der Strom, welcher in Phasenleiter L1 fließt. Da von einem symmetrischen Aufbau des Netzmodells ausgegangen wird, fließt dieser errechnete Phasenleiterstrom in allen drei Phasen gleich.

Die Parameter der einzelnen Komponenten (Transformator, Synchron-generator, Leitung, Last) des Modells sind veränderbar. Es können somit beliebige Konstellationen simuliert werden.

Die Nullimpedanz des Synchrongenerators z_{SG}^0 muss aus dem per unit Wert berechnet werden. Dies gilt auch für die Berechnung der Transformator-Nullimpedanz. Exemplarisch ist in Gleichung (6.1) die Berechnung der Nullimpedanz für die Grundschiwingung des Synchrongenerators ausgeführt.

$$\underline{Z}_{0,SG,GS} = \frac{z_{SG}^0 \cdot U_n^2}{S_n} \quad (6.1)$$

Nach Gleichung (6.2) gilt für die Nullimpedanz der dritten Oberschwingung $\underline{Z}_{0,SG,3.OS}$ der dreifache Wert der Grundschiwingungs-Nullimpedanz (Annahme: $R \approx 0$, $Z \approx jX$).

$$\underline{Z}_{0,SG,3.OS} = 3 \cdot \underline{Z}_{0,SG,GS} \quad (6.2)$$

Die Berechnung für die Nullimpedanz des Transformators erfolgt gleich wie die Synchrongenerator-Nullimpedanz Berechnung zuvor.

Nach der Berechnung der einzelnen Impedanzen kann man im Netzparallelbetrieb von einer Parallelschaltung von Last- und Transformatorimpedanz ausgehen, welche die Leitungs- und Synchrongeneratorimpedanz in Serie geschaltet hat (Gleichung (6.3)). Der Berechnung geht die Annahme eines symmetrischen Drehstromsystems voraus.

$$\underline{Z}_{Netzparallel,3.OS} = \frac{\underline{Z}_{0,SG,3.OS} + 2 \cdot \underline{Z}_{Leitung,3.OS} + \frac{\underline{Z}_{Last,3.OS} \cdot \underline{Z}_{0,Trafo,3.OS}}{\underline{Z}_{Last,3.OS} + \underline{Z}_{0,Trafo,3.OS}}}{3} \quad (6.3)$$

Die Inselnetzberechnung (Gleichung (6.4)) vereinfacht sich, da der Transformatorzweig der Parallelschaltung entfällt und somit die Reaktanzen von Synchrongenerator, Leitung und Last in Serie sind.

$$\underline{Z}_{Insel,3.OS} = \frac{\underline{Z}_{0,SG,3.OS} + 2 \cdot \underline{Z}_{0,Leitung,3.OS} + \underline{Z}_{0,Last,3.OS}}{3} \quad (6.4)$$

Der dritte Oberschwingungsstrom im PEN-Leiter ergibt sich sowohl im Netzparallelbetrieb $I_{PEN,Netzparallel,3.OS}$ als auch im Inselnetzbetrieb $I_{PEN,Insel,3.OS}$ aus der dritten Oberschwingungsspannung $U_{3.OS}$ durch die jeweilige Gesamtimpedanz des Drehstromsystems (in Gleichung (6.5) für den Netzparallelbetrieb ausgeführt).

$$I_{PEN,Netzparallel,3.OS} = \frac{U_{3.OS}}{|\underline{Z}_{Netzparallel,3.OS}|}$$

7 Messung

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der dritten Oberschwingung dezentraler Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz hinsichtlich Größenordnung und Ausbreitung dieser Oberschwingungsströme.

Es wird an dieser Stelle auf die Indexierung der gemessenen und berechneten Ströme und Spannungen in dieser Arbeit aufmerksam gemacht. Tabelle 7.1 zeigt die Indexierung der verwendeten Größen, die einzelnen Abkürzungen sind hervorgehoben.

Tabelle 7.1 Indexierung der verwendeten Größen

	Parameter:	Abkürzung:
1.	Leiter	<u>L1</u> , <u>L2</u> , <u>L3</u> , <u>N</u> , <u>PEN</u>
2.	Messpunkt	<u>T</u> ransformator, <u>N</u> otstromgenerator, <u>R</u> esiduallast, <u>L</u> abor- <u>S</u> ynchrongenerator, <u>N</u> etz, <u>I</u> nselnetzwech <u>s</u> elr <u>i</u> chter, <u>S</u> olarwech <u>s</u> elr <u>i</u> chter
3.	Frequenz	<u>G</u> ru <u>n</u> d <u>s</u> chwingung, <u>3.</u> <u>O</u> ber <u>s</u> chwingung
4.	Zeitpunkt	<u>VOR</u> -, <u>NACH</u> der Synchronisation, <u>WÄHREND</u> des Fehlers
5.	Messwert	<u>g</u> emessen, <u>b</u> erechnet

7.1 Einleitung

Gemessen werden die Größen eines Notstromgenerators, um einen leistungsmäßig großen Erzeuger zu analysieren. Im Labor werden mit einem Labor-Synchrongenerator und einem Inselnetzwechselrichter Messungen durchgeführt.

Gemessen wird mit Messgeräten der Fa. Dewetron (DEWETRON elektronische Messgeräte GmbH, Grambach, Österreich). Diese tasten die Messsignale mit eingestellter Abtastrate ab und speichern die Messdaten inklusive Zeitstempel in einem File. Alle aufgenommenen Messwerte stehen dadurch auch nach der Messung zur Verfügung. So können verschiedenste Betriebszustände der zu messenden Anlagen messtechnisch erfasst werden. Folgende Anforderungen gelten für die einzelnen Messungen:

- Exakte Zeitsynchronisation der einzelnen Messgeräte untereinander, damit eine anschließendes Auswertung gewährleistet ist
- Erfassung des kompletten Messverlaufes

Die Messdatenfiles können mit der Software DEWESoftX (DEWETRON elektronische Messgeräte GmbH, Grambach, Österreich) eingelesen werden. Mit dieser Software kann der gesamte Messverlauf dargestellt und bearbeitet werden. Außerdem ist es möglich, das Messfile bzw. ausgewählte Zeitbereiche der Messung zu exportieren. Dadurch sind die Messdaten mit anderen Softwareprogrammen kompatibel. In dieser Arbeit erfolgen sämtliche

Auswertungen mit Hilfe der Software MATLAB (Mathworks Inc., Natick, USA). D.h. es werden keine durch DEWESoftX berechneten Daten verwendet, sondern sämtliche Werte über MATLAB, aus den exportierten Rohdaten, ermittelt und bearbeitet.

7.2 Messung Notstromgenerator-Einspeisung

7.2.1 Messkonzept

Im Rahmen dieser Arbeit wurde neben der Simulation und den Messungen im Labor auch eine dezentrale Erzeugungsanlage im Feld real vermessen. Bei dieser dezentralen Erzeugungsanlage handelt es sich um einen Diesel-Notstromgenerator vom Typ OLYMPIAN GEP65-2 (Caterpillar Inc., Peoria, USA) [30]. Die Messung erfolgte im Rahmen eines periodischen Funktionstests auf dem Gelände der Energie Graz GmbH & Co KG, wo dieses stationär aufgestellt ist. Der Notstromgenerator dient zur Aufrechterhaltung der Stromversorgung des Bürogebäudes vor Ort. Abbildung 7.1 zeigt eine schematische Übersicht der Niederspannungsverteilschiene sowie den Einspeisepunkt des Netzes und des Notstromgenerators im Bürogebäude als Einlinienersatzschaltbild.

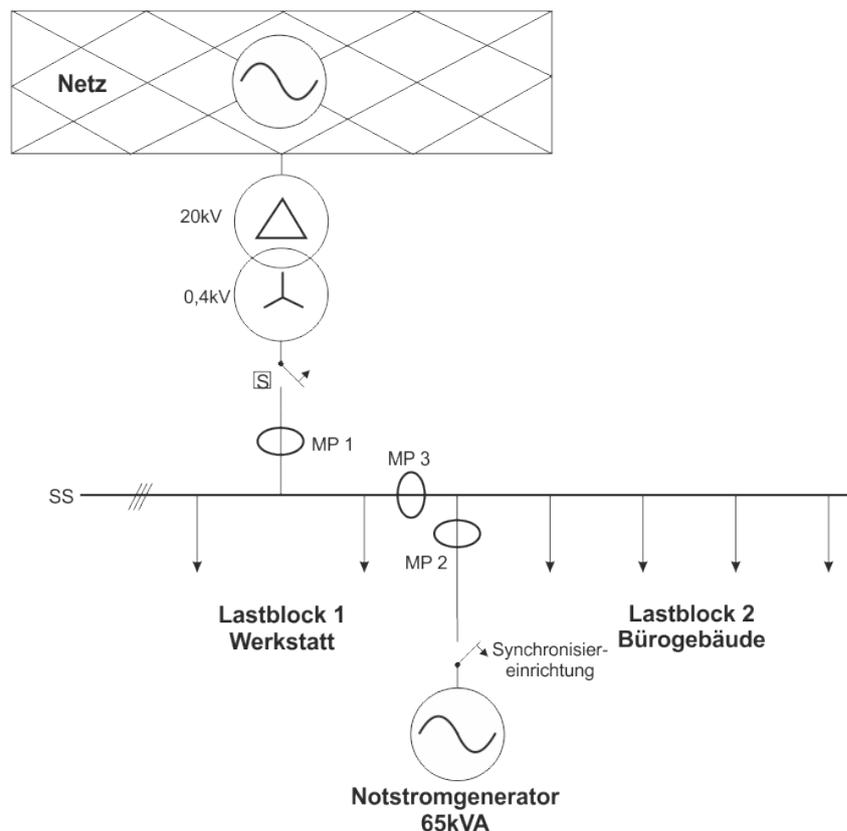


Abbildung 7.1: Einlinienersatzschaltbild – Messung Notstromgenerator,
MP... Messpunkt, SS ... Sammelschiene

Der periodische Funktionstest wird durch einen manuellen Startimpuls (Taster) am Notstromgenerator in Gang gesetzt und läuft danach im Automatikmodus ab. Die Einspeisung erfolgt im Netzparallelbetrieb. Demnach wird das notstromversorgte Gebäude netzseitig nicht getrennt.

Folgende Schritte werden vom Automatikmodus durchlaufen:

- Anlaufen bzw. Hochfahren des Aggregates
- Synchronisation mit dem Netz
- Eine Stunde Dauerbetrieb bei Nennleistung
- Trennen vom Netz
- Herunterfahren des Aggregates

Überwacht wird dieser Vorgang seitens der Energie Graz GmbH & Co KG über eine zentrale Bedienwarte, wo auch das Monitoring sämtlicher Parameter des Aggregates erfolgt.

Das Messkonzept wird dahingehend konzipiert, dass eine vollständige Erfassung sämtlicher Ströme und Spannungen gewährleistet ist. Im Speziellen soll die Ausbreitung der dritten Oberschwingung im Netz nachvollzogen werden können. Um diese Forderungen zu ermöglichen, werden drei Messpunkte definiert:

MP 1: Transformator

MP 2: Notstromgenerator

MP 3: Residuallast

Abbildung 7.2 zeigt das vollständige Messkonzept. Die roten Pfeile kennzeichnen die angenommene Ausbreitungsrichtung der dritten Oberschwingung im Netz. Schwarze Pfeile an der Niederspannungsverteilschiene symbolisieren die daran angeschlossenen Lasten.

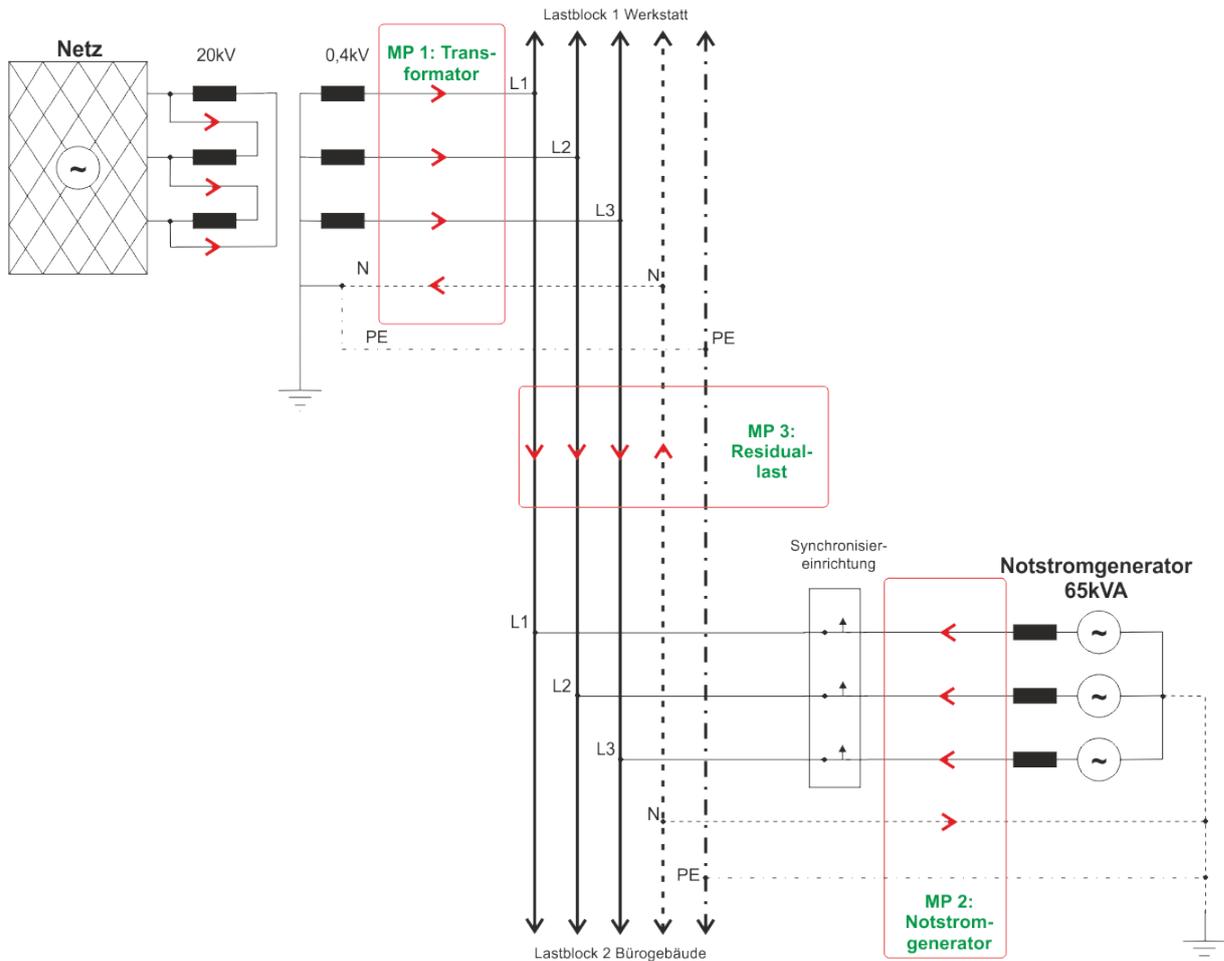


Abbildung 7.2: Messkonzept zur Erfassung der dritten Oberschwingung durch die Einspeisung über den Notstromgenerator

Den einzelnen Messpunkten sind Messgeräte zugeordnet, die nach Abbildung 7.3 angeschlossen werden. An jedem dieser Messpunkte erfolgt eine Strommessung der Leiter L_1 , L_2 , L_3 und N , sowie eine Spannungsmessung pro Phase gegen den Neutralleiter (L_1 - N , L_2 - N , L_3 - N).

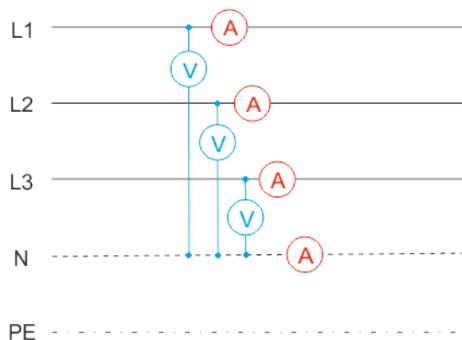


Abbildung 7.3: Messgeräteanordnung pro Messpunkt

7.2.2 Messaufbau

Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Messgeräte findet sich im Anhang 12.1.

7.2.3 Messauswertung

Die zuvor beschriebene Auswertung der Messdaten erfolgt vorerst mit den ermittelten Werten für die Grundschiwingung (50 Hz). Dies geschieht deshalb, um die Plausibilität der gemessenen Ströme (Amplitude, Phasenlage) zu überprüfen. Danach erst werden die Ströme und Spannungen der dritten Oberschwingung (150 Hz) ermittelt und beurteilt.

7.2.3.1 Neutralleiterstrom Messung Residuallast

Bei der Auswertung der Ströme der Grundschiwingung (50 Hz) und der dritten Oberschwingung (150 Hz) muss die phasenrichtige Summation der drei gemessenen Phasenströme dem gemessenen Neutralleiterstrom entsprechen (Vergleiche: Abbildung 5.1). Stimmt diese Forderung mit der Messung nicht überein, liegt ein Problem im Messaufbau vor.

Die Messpunkte Transformator (MP 1) und Notstromgenerator (MP 2) erfüllen diese Summations-Forderung. Im Messpunkt Residuallast (MP 3) hingegen, ergibt die Messung des Neutralleiterstromes sowohl für die Grundschiwingung, als auch für die dritte Oberschwingung, kleinere Werte, als die rechnerisch ermittelte Summe der gemessenen Phasenströme (siehe Gleichung (7.1)).

Abbildung 7.4 verdeutlicht (gelber Kreis), dass nicht der gesamte Neutralleiterstrom erfasst wird. Die Stromzange der Neutralleiterstrommessung erfasst nur einen der beiden blau markierten Leiter des doppelt ausgeführten Neutralleiters. Somit ist auch der zu gering gemessene Residuallast-Neutralleiterstrom messtechnisch nachvollziehbar. Der Fehler muss jedoch bei allen weiteren Berechnungen berücksichtigt werden.

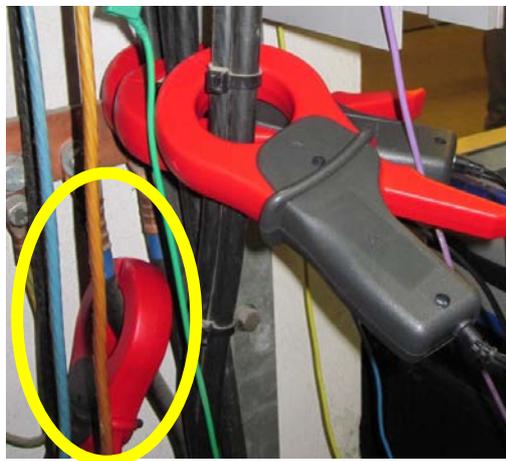


Abbildung 7.4: Messung Residuallast (MP 3), zu geringer Neutralleiterstrom

Der nicht erfasste Strom kann rechnerisch nach Gleichung (7.1) ermittelt werden und ist sowohl für die Grundschwingungsberechnungen, als auch für die Oberschwingungsberechnungen gültig.

$$I_{N \text{ nicht-erfasst}} = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} - I_N \quad (7.1)$$

7.2.3.2 Zeitsynchronisation - Phasenkorrektur

Damit ein Bezug zwischen den gemessenen Strömen und Spannungen der einzelnen Messpunkte hergestellt werden kann und um weitere Berechnungen aus den Messwerten auszuführen, muss eine möglichst exakte Synchronisation der drei verwendeten Dewetron-Messgeräte erfolgen. Als Beispiel für die benötigte Genauigkeit des Zeitabgleiches wird die Phasenverschiebung von Grundschwingung und Oberschwingung innerhalb eines Zeitintervalls betrachtet. Innerhalb einer Zeit von 1ms wandert der jeweilige Strom- bzw. Spannungszeiger um einen Winkel von 18° weiter. Noch gewichtigere Auswirkungen hat diese 1ms auf die Messungen der dritten Oberschwingung. Dort entspricht die Phasendifferenz bereits dem Dreifachen, nämlich 54°.

Eine Phasenverschiebung zwischen den drei Messpunkten ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Die blauen Vektoren zeigen Betrag- und Phasenlage der einzelnen Phasenspannungen, der rote Pfeil zeigt den Versatz der Phasenlage der jeweiligen Spannung U_{L1} zur Phasenlage 0°.

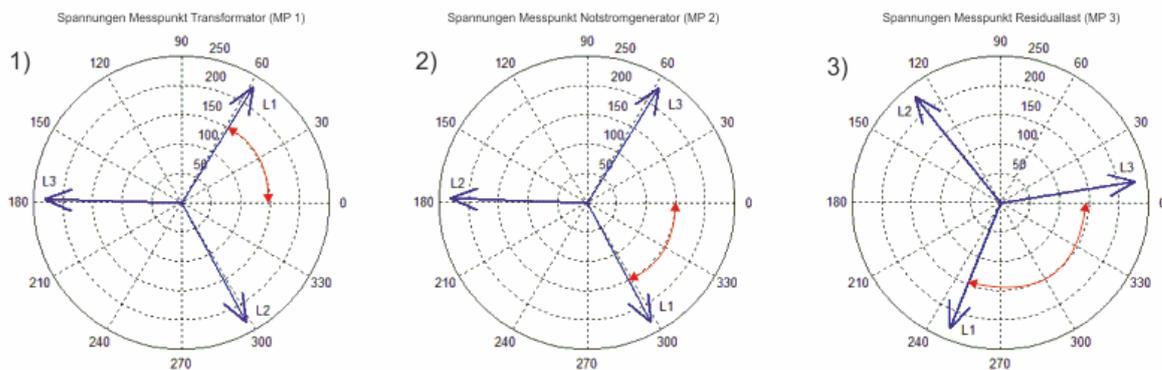


Abbildung 7.5: Zeigerdiagramme der Phasenspannungen der Grundschwingung (50 Hz):

1) am Messpunkt Transformator (MP 1), 2) am Messpunkt Notstromgenerator (MP 2),

3) am Messpunkt Residuallast (MP 3)

Damit weitere Berechnungen angestellt werden können, ist eine Korrektur der Phasenlagen sämtlicher Vektoren eines Messpunktes notwendig. Korrigiert wird jeweils um die Phasenlage des Spannungsvektors der Grundschwingung U_{L1} pro Messpunkt. Dadurch wird der Spannungsvektor U_{L1} willkürlich auf 0° gesetzt. Alle anderen Strom- und

Spannungsvektoren eines Messpunktes werden ebenfalls um den Winkel von U_{L1} korrigiert, da die Phasendifferenz der Vektoren einer Messung untereinander korrekt ist. Man kann sich den Vorgang als Drehung aller Vektoren im Zeigerdiagramm vorstellen.

Die Auswertung der Oberschwingungen wird ebenfalls um den Winkel des Vektors U_{L1} der Grundschiwingung (50 Hz) korrigiert. Es muss jedoch beachtet werden, dass der dreifache Korrekturwinkel abgezogen wird, da beispielsweise eine Phasenkorrektur von 120° der Grundschiwingung einer Phasenkorrektur von 360° der Vektoren der dritten Oberschwingung (150 Hz) entspricht.

7.2.4 Ergebnisse - Netzparallelbetrieb

Alle Berechnungen erfolgen exemplarisch für den Phasenleiter L_1 und sind sinngemäß für die übrigen Leiter L_2 , L_3 durchzuführen.

Die Auswertung der Ströme und Spannungen wird anhand von zwei Betriebszuständen des Notstromgenerators durchgeführt.

- **VOR** der Synchronisation des Notstromgenerators
- **NACH** der Synchronisation des Notstromgenerators

Vor der Synchronisation wird die Stromaufteilung ohne den Notstromgenerator untersucht. Diese Untersuchung dient einerseits zur Ermittlung des Lastblocks 1 Werkstatt und andererseits, um das Verhalten bzw. die Änderung der Ströme nach der Synchronisation, nachzuvollziehen und zu vergleichen.

Die Messergebnisse werden in Tabelle 7.2 bis Tabelle 7.5 angeführt. Dabei wird für jeden Messpunkt sowohl Strom, als auch Spannung mit ihrem jeweiligen Betrag und Winkel angegeben. Gibt es keine Messung ist diese Messung mit einem Querstrich (-) gekennzeichnet.

Tabelle 7.2: Messwerte der Grundschiwingung (50 Hz) **VOR** der Synchronisation

	MP 1: Transformator				MP 2: Notstromgenerator				MP 3: Residuallast			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	A	°	V	°	A	°	V	°
L1	232,4	2,7	231,6	0,0	-	-	230,5	0,0	146,9	3,6	230,8	0,0
L2	196,0	-120,6	231,3	-119,8	-	-	230,8	-119,8	95,5	-122,4	230,8	-119,7
L3	136,2	122,2	231,7	120,4	-	-	230,9	120,3	91,4	126,4	231,5	120,8
N	76,7	-35,0	-	-	-	-	-	-	7,9	13,3	-	-

Tabelle 7.3: Messwerte der Grundschiwingung (50 Hz) **NACH** der Synchronisation

	MP 1: Transformator				MP 2: Notstromgenerator				MP 3: Residuallast			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	A	°	V	°	A	°	V	°
L1	167,2	2,4	231,4	0,0	69,0	-0,3	231,7	0,0	78,6	5,8	231,3	0,0
L2	134,0	-120,8	231,1	-120,0	65,2	121,0	231,2	-119,7	32,4	-126,9	231,2	-119,8
L3	69,6	128,6	231,1	120,4	63,7	113,7	231,6	120,3	37,1	144,2	231,5	120,7
N	79,2	-43,0	-	-	9,4	13,7	-	-	7,0	0,3	-	-

Tabelle 7.4: Messwerte der dritten Oberschwingung (150 Hz) **VOR** der Synchronisation

	MP 1: Transformator				MP 2: Notstromgenerator				MP 3: Residuallast			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	A	°	V	°	A	°	V	°
L1	15,5	20,0	1,0	-84,1	-	-	1,3	-90,4	13,0	24,4	1,1	-87,5
L2	16,4	32,6	0,8	-59,4	-	-	0,7	-80,8	10,1	11,7	0,9	-65,5
L3	11,9	16,6	0,6	-50,3	-	-	0,9	-50,1	10,0	3,7	0,7	-53,8
N	43,9	23,9	-	-	-	-	-	-	14,5	18,0	-	-

Tabelle 7.5: Messwerte der dritten Oberschwingung (150 Hz) **NACH** der Synchronisation

	MP 1: Transformator				MP 2: Notstromgenerator				MP 3: Residuallast			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	A	°	V	°	A	°	V	°
L1	12,3	2,5	1,1	-98,7	4,5	63,6	0,8	-118,7	10,1	9,9	1,2	-101,7
L2	12,3	26,1	0,2	-82,4	4,9	61,4	0,3	-76,7	8,2	-13,7	0,4	-66,9
L3	10,8	0,6	0,7	-50,3	2,8	67,7	0,7	-68,8	8,8	-12,3	0,7	-59,1
N	35,0	10,1	-	-	11,3	63,3	-	-	12,1	-1,6	-	-

7.2.4.1 Berechnung des Neutralleiterstromes

Der Neutralleiterstrom errechnet sich aus der phasenrichtigen Addition der drei Phasenströme. Beispielhaft erfolgt die Berechnung für die Transformormessung der 3. Oberschwingung nach der Synchronisation.

$$\begin{aligned}
 I_{N,T,3.OS,NACH,ber} &= I_{L1,T,3.OS,NACH,gem} + I_{L2,T,3.OS,NACH,gem} + I_{L3,T,3.OS,NACH,gem} = \quad (7.2) \\
 &= 12,3 \text{ A} \angle 2,5^\circ + 12,3 \text{ A} \angle 26,1^\circ + 10,8 \text{ A} \angle 0,6^\circ = \\
 &= \underline{34,7 \text{ A} \angle 10,1^\circ} \approx \underline{35 \text{ A} \angle 10,1^\circ} = I_{N,T,3.OS,NACH,gem}
 \end{aligned}$$

7.2.4.2 Unsymmetrische Last

Die Last, im Gebäude des Unternehmens Energie-Graz, ist unsymmetrisch auf die drei Phasen aufgeteilt, wodurch sich auch bei den Neutralleiterstromberechnungen der Grundschiwingungsauswertung sehr hohe resultierende Ströme ergeben. Dieser resultierende Strom ist in Abbildung 7.6 als grüner Vektor erkennbar.

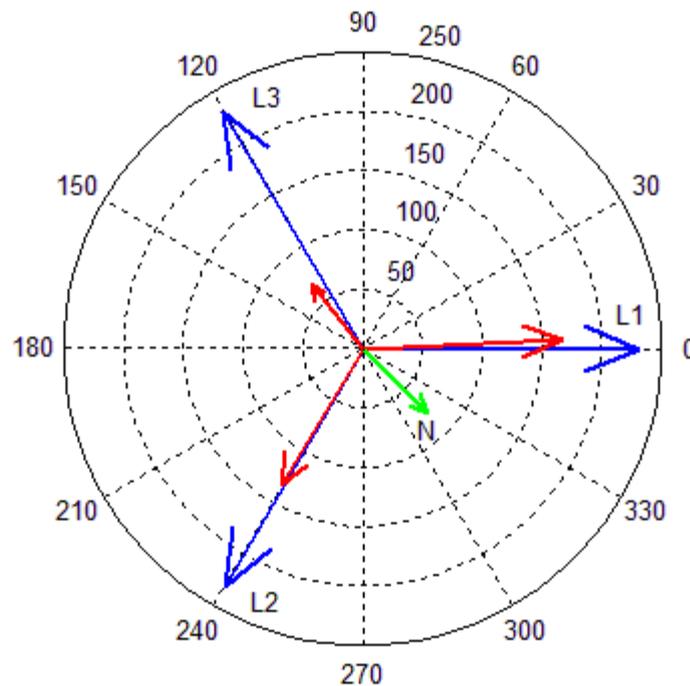


Abbildung 7.6: Ströme (rot) und Spannungen (blau) der Trafomessung (MP 1) nach der Synchronisation sowie der Neutralleiterstrom (grün)

7.2.4.3 Ermittlung Lastblock 1 Werkstatt

Der Strom, der in den Lastblock 1 Werkstatt fließt, errechnet sich aus der Differenz von Transformator-Strom und Residuallast-Strom. Als Beispiel ist in Gleichung (7.3) die Berechnung des Lastblocks 1 Werkstatt für die Grundschiwingungsauswertung vor der Synchronisation des Phasenleiters L1 angeführt.

$$\begin{aligned}
 I_{L1,Unbekannt,GS,VOR,ber} &= I_{L1,T,GS,VOR,gem} - I_{L1,R,GS,VOR,gem} = & (7.3) \\
 &= 232,4 \text{ A} \angle 2,7^\circ - 146,9 \text{ A} \angle 3,6^\circ = \underline{\underline{85,5 \text{ A} \angle 1,2^\circ}}
 \end{aligned}$$

7.2.4.4 Leistungsbilanz

Anhand der Grundschwingungsdaten wird die Richtigkeit der Messergebnisse überprüft. So muss nach der Synchronisation eine Entlastung des Transformators (MP 1) bzw. am Messpunkt Residuallast (MP 3) durch die Einspeisung des Notstromgenerators (MP 2) ersichtlich sein. Dies kann über die Leistungsbilanz erfolgen, wobei Folgendes gilt:

$$\begin{aligned}
 P_{L1,R,GS,VOR,ber} &= \underline{33,8 \text{ kW}} = P_{L1,R,GS,NACH,ber} + P_{L1,N,GS,NACH,ber} = & (7.4) \\
 &= 18,1 \text{ kW} + 16 \text{ kW} = \underline{34,1 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Die von der Residuallast des Phasenleiters L1 aufgenommene Leistung vor der Synchronisation (MP 3) entspricht der addierten Leistung der Messung Notstromgenerator (MP 2) und der Messung Residuallast (MP 3) nach der Synchronisation.

Die geringe Abweichung von 0,3 kW ergibt sich aufgrund der Lastzunahme im Gebäude der Energie-Graz, da zwischen den Messpunkten (vor und nach Synchronisation) ein Zeitintervall von einer Minute liegt und es in dieser Zeit zu einer Erhöhung der Last durch die Verbraucher kommt.

7.2.4.5 Relative Oberschwingung

Nach der Formel (5.3) errechnet sich das Harmonic Ratio (HR) nach dem prozentuellen Anteil der dritten Oberschwingung (150 Hz) an der Grundschwingung (50 Hz).

Tabelle 7.6: Harmonic Ratio (HR)

		MP 1: Transformator			MP 2: Notstromgenerator			MP 3: Residuallast		
		I _{GS}	I _{3.OS}	HR	I _{GS}	I _{3.OS}	HR	I _{GS}	I _{3.OS}	HR
				%			%			%
VOR Sync.	L1	232,4	15,5	6,7	-	-	-	146,9	13,0	8,8
	L2	196,0	16,4	8,4	-	-	-	95,5	10,1	10,6
	L3	136,2	11,9	8,7	-	-	-	91,4	10,0	10,9
	N	76,7	43,9	57,2	-	-	-	7,9	14,5	183,5
NACH Sync.	L1	167,2	12,3	7,4	69,0	4,5	6,5	78,6	10,1	12,8
	L2	134,0	12,3	9,2	65,2	4,9	7,5	32,4	8,2	25,3
	L3	69,6	10,8	15,5	63,7	2,8	4,4	37,1	8,8	23,7
	N	79,2	35,0	44,2	9,4	11,3	120,2	7,0	12,1	172,9

7.3 Messung Labor-Synchrongenerator

7.3.1 Messkonzept

Der Versuchsaufbau im Labor wird mit einem Labor-Synchrongenerator als dezentrale Energieerzeugungsanlage durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Drehstrom-Synchronmaschine Vollpolläufer 1kW (Nr. SE2662-5Q) der Fa. Lucas-Nuelle Lehr- und Messgeräte GmbH (Lucas-Nuelle Lehr- und Messgeräte GmbH, Kerpen, GERMANY). Die mechanische Energie, welche den Generator antreibt, wird von einem Servoantrieb (Nr. SE2663-6U) bereitgestellt, dieser ist direkt mit der Welle des Labor-Synchrongenerators verbunden. Über den Servo-Maschinenprüfstand (Nr. CO 2663-6U) können verschiedene Betriebsarten der Antriebsmaschine ausgewählt werden [31].

Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden beiden Prüfstand-Betriebsarten benötigt:

- **SPEED CONTROL** – Drehzahl geregelter Betrieb (Inselnetzbetrieb)
- **SPEED CONTROL + SYNCHRONISATION** – Drehzahl geregelter Betrieb, nach erfolgter Synchronisation wird auf drehmoment geregelter Betrieb (Netzparallelbetrieb) umgeschaltet (Netz ist Slack)

Das Messkonzept der Laborversuche mit dem Labor-Synchrongenerator ist in Abbildung 7.7 dargestellt:

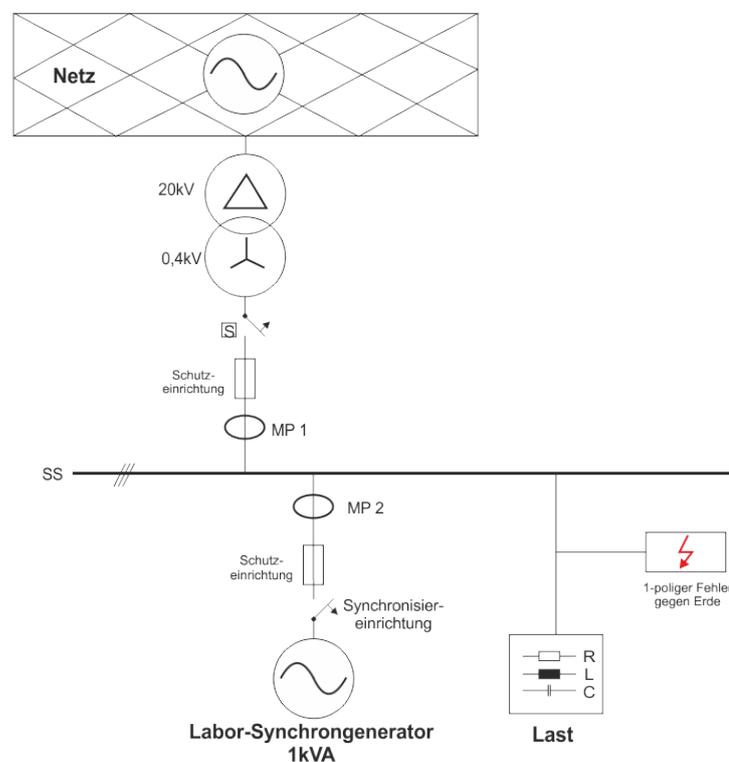


Abbildung 7.7: Einlinienerersatzschaltbild - Messung Labor-Synchrongenerator
MP... Messpunkt, SS ... Sammelschiene

Der Schalter (S) auf der Sternseite des Transformators dient zum Umschalten vom Netzparallel- in den Inselnetzbetrieb.

Folgende Schritte sind beim Hochfahren des Labor-Synchrongenerators zum Netzparallelbetrieb zu beachten [32]:

- Netz/Insel – Schalter (S) schließen (Last wird vom Netz versorgt)
- Starten des Servo-Maschinenprüfstandes
- Zügiges Erhöhen der Drehzahl bis 1500 U/min
- Einschalten der Erregung
- Korrektur auf Nennspannung
- Synchronisation, sobald die Synchronisationsbedingungen erfüllt sind
- Erhöhen des Drehmomentes des Synchrongerators
- Dauerbetrieb

Im Inselnetzbetrieb ist wie folgt vorzugehen:

- Netz/Insel – Schalter (S) öffnen
- Starten des Servo-Maschinenprüfstandes
- Zügiges Erhöhen der Drehzahl bis 1500 U/min
- Einschalten der Erregung
- Korrektur auf Nennspannung
- Schließen der Synchronisierereinrichtung
- Dauerbetrieb

Das Abschalten, sowohl im Inselnetz-, als auch im Netzparallelbetrieb erfolgt analog zum Hochfahren in umgekehrter Reihenfolge, der zuvor aufgezählten Punkte.

Da der Messaufbau ein abgegrenztes System darstellt und im Vergleich zur Messung mit dem Notstromgenerator (Abschnitt 7.2 Messung Notstromgenerator) alle Lasten bekannt sind, entfällt der Messpunkt Residuallast. Die Anordnung der Messgeräte erfolgt laut Abbildung 7.3 für die zwei übrigen Messpunkte.

MP 1: Transformator

MP 2: Labor-Synchrongenerator

Mit Hilfe des zuvor beschriebenen allgemeinen Messaufbaus werden die verschiedenen Messungen durchgeführt. Sie werden dahingehend modifiziert, dass eine mögliche Auswirkung auf die Ströme der dritten Oberschwingung erzielt wird. Messungen erfolgen daher unter Variation der Last, welche an der Sammelschiene angeschlossen ist. Folgende Lasten werden untersucht.

- Ohmsche Last
- Ohmsch-induktive Last
- Ohmsch-kapazitive Last
- Unsymmetrische ohmsche Last

Die vier Lastuntersuchungen werden sowohl für den Netzparallelbetrieb, als auch für den Inselnetzbetrieb separat ausgewertet.

Ein weiterer Versuch ist der 1-polige Fehler gegen Erde. Dieser wird ausschließlich im Inselnetzbetrieb untersucht, da die Grundannahme vorausgeht, dass im Netzparallelbetrieb zuerst eine netzseitige Abschaltung erfolgt. Durch diese netzseitige Abschaltung geht das System in den Inselnetzbetrieb über.

Der 1-polige Fehler gegen Erde wird für die folgenden beiden Sternpunktbehandlungen durchgeführt.

- 1-poliger Kurzschluss gegen Erde – Generatorsternpunkt mit PEN-Leiter verbunden, nicht geerdet
- 1-poliger Kurzschluss gegen Erde – Generatorsternpunkt mit PEN-Leiter verbunden und zusätzlich geerdet

7.3.2 Messaufbau

An dieser Stelle sei für die genauere Betrachtung des Messaufbaues bzw. der verwendeten Messgeräte auf den Anhang 12.2 am Ende dieser Arbeit verwiesen.

7.3.3 Messauswertung

Ziel der Messauswertung ist es, die Größe und Ausbreitung der dritten Oberschwingung nachzuvollziehen. Im Netzparallelbetrieb werden die Ströme vor und nach dem Synchronisier-Vorgang untersucht. Im Inselnetzbetrieb hingegen entfällt dieser Synchronisier-Vorgang. Daher werden die Ströme während des Speisens der jeweiligen Last (nach dem Hochfahren des Labor-Synchrongenerators) ausgewertet.

Die Untersuchung der 1-poligen Fehler gegen Erde erfolgt wiederum, um die Größe und Ausbreitung der dritten Oberschwingung im Messaufbau und im speziellen im Sternpunkt des Labor-Synchrongenerators während des Fehlers festzustellen. Daher wird eine Unterteilung in vor und während dem Fehler vorgenommen (kein Synchronisier-Vorgang da im Inselnetzbetrieb gemessen wird).

7.3.3.1 Phasenkorrektur

Die Phasenkorrektur erfolgt bei den Labor-Synchrongenerator-Messungen analog zur Messung „Notstromgenerator“ (siehe 7.2.3.2). Jedoch ist der Hintergrund ein Anderer; bei der Messung des Notstromgenerators werden drei verschiedene, örtlich getrennte Messgeräte verwendet, die untereinander vernetzt und synchronisiert sind. Dieses Problem kann bei der Messung Labor-Synchrongenerator von vornherein ausgeschlossen werden, da

beide Messpunkte am selben Messgerät ausgeführt und somit die Messdaten zeitlich synchron sind.

Zur Kontrolle der Zeitsynchronität der Messung der beiden Messpunkte (Transformator bzw. Labor-Synchrongenerator) ist die Phasenlage der Spannungszeiger zu vergleichen. Diese müssen zu jeder Zeit denselben Winkel besitzen.

In Abbildung 7.8 ist zu erkennen, dass die Spannungszeiger der beiden Messpunkte dieselbe Phasenlage zum selben absoluten Auswertezeitpunkt besitzen. Jedoch sind diese im Zeigerdiagramm verdreht zum Winkel 0° angezeigt. Diese Verdrehung zur Phasenlage 0° besitzt ihren Ursprung in der Anwendung der FFT-Analyse in Matlab.

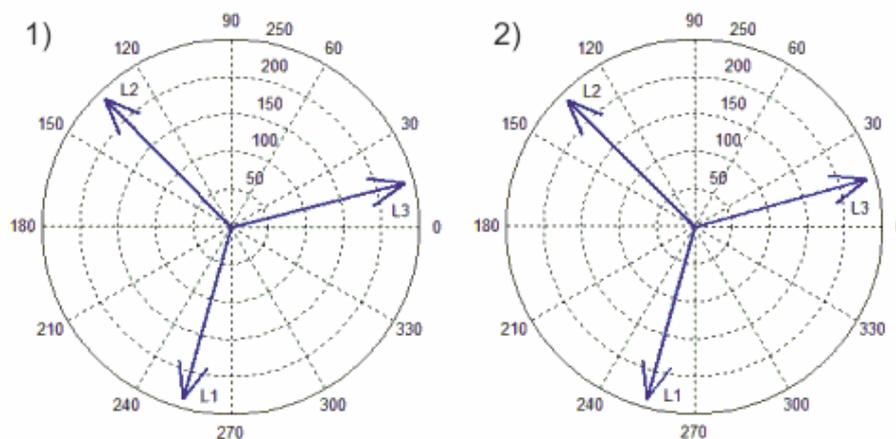


Abbildung 7.8: Netzparallelbetrieb Spannungszeiger:

1) im Messpunkt Transformator (MP 1), 2) im Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2)

Durch die gewählte Fensterung (5.4.1) bei der Ausführung der FFT-Analyse wird die Anzahl der untersuchten Messwerte begrenzt. Da dieses Fenster einen beliebigen Zeitpunkt des Signalausschnitts darstellt, haben die Messsignale zum Startzeitpunkt einen unterschiedlichen Eintrittswinkel in das gewählte Fenster. Matlab bezieht diesen Eintrittswinkel relativ zum Winkel eines Cosinus. Somit spiegelt der im Zeigerdiagramm angezeigte Phasenwinkel des Signals diesen Eintrittswinkel wieder.

Zur Verdeutlichung und Gewährleistung der Vergleichbarkeit der durchgeführten Messungen, wird in sämtlichen Labormessungen eine Phasenkorrektur um den Winkel der Phasenspannung U_{L1} des jeweiligen Messpunktes durchgeführt (siehe Abbildung 7.5). Dies gilt sowohl für die Grundschwingungsauswertung, als auch für die Auswertung der dritten Oberschwingung (Strom und Spannung).

7.3.4 Ergebnisse – Netzparallelbetrieb

Die Auswertung der Messung mit ohmscher Last wird sowohl für die Grundschiwingung, als auch für die dritte Oberschwingung ausgeführt. Die Grundschiwingungsauswertung dient zur Kontrolle der Messung bzw. des Messaufbaues. Da der Messaufbau für alle Messungen derselbe bleibt und nur die Last verändert wird, führt diese Arbeit die Grundschiwingungsauswertung nur für die Messung mit ohmscher Last aus. Diese würden jedoch analog dazu in allen anderen Messungen erfolgen.

Der Synchronisationsvorgang wird mit einem Nullspannungsmessgerät, einem Doppelfrequenzmessgerät und einem Doppelspannungsmessgerät durchgeführt. Diese messen sowohl auf Netzseite, als auch auf der Seite des Labor-Synchrongenerators. Mit Hilfe dieser drei Messeinrichtungen können die Synchronisationsbedingungen [4] überprüft werden. Treffen sie zu, erfolgt eine manuelle Zuschaltung des Labor-Synchrongenerators. Folgende Punkte müssen bei der jeweiligen Messung ausgeführt werden:

- Zuschalten des Netzes
- Hochfahren des Labor-Synchrongenerators (Drehzahl: 1500 U/min)
- Verändern der Drehzahl bis Frequenzgleichheit gegeben ist
- Phasenfolge bestimmen
- Über den Erregerstrom die Spannung korrigieren, bis Spannungsgleichheit gegeben ist
- Warten bis Nullspannungsmessgerät 0 anzeigt
- Manuelle Zuschaltung

7.3.4.1 Netzparallelbetrieb – ohmsche Last

Der Messaufbau wird mit einer symmetrischen Last von $3 \times 1000 \Omega$ belastet. Dazu werden drei Schiebewiderstände verwendet. Als Sicherungen (Si) dienen handelsübliche Feinsicherungen vom Typ: F 2 A L 250 V. Der gemessene Messaufbau ist in Abbildung 7.9 dargestellt.

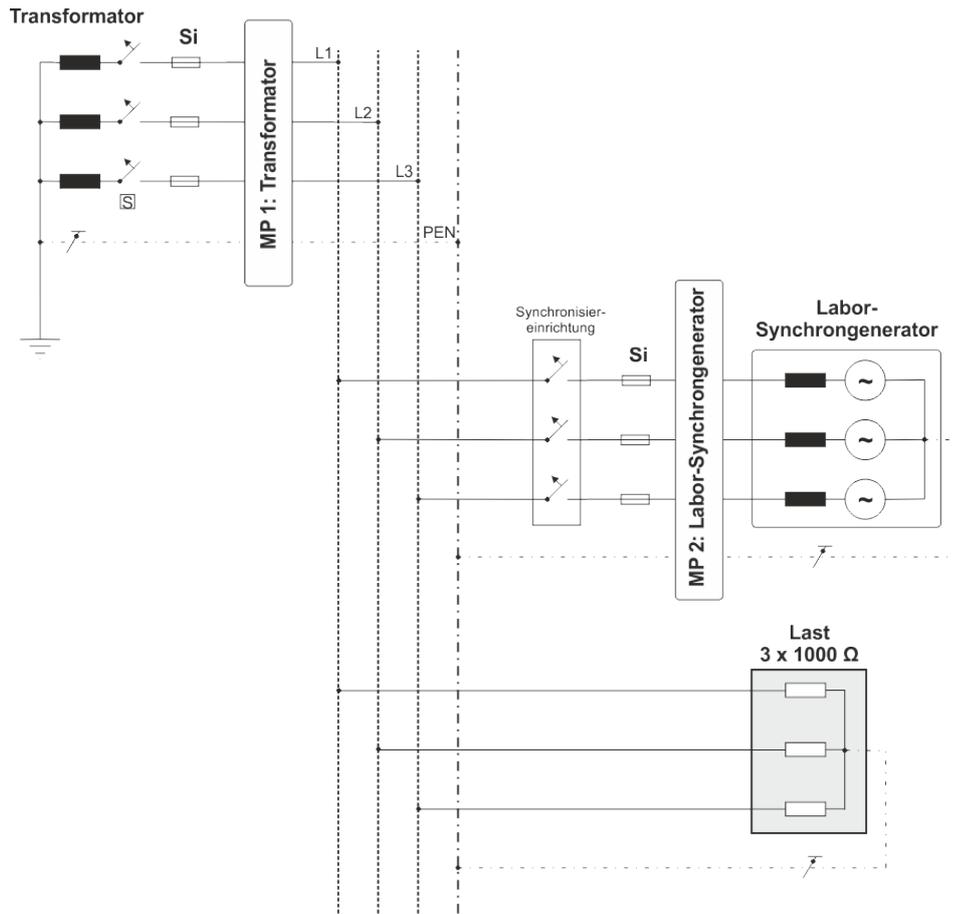


Abbildung 7.9: Netzparallelbetrieb mit ohmscher Last 3 x 1000 Ω

Im Netzparallelbetrieb wird die Auswertung der Ergebnisse, wie bei der Messung mit dem Notstromgenerator, in zwei Zeitsegmente (VOR und NACH der Synchronisation der erzeugenden Einheit) unterteilt. Bei den vor der Synchronisation gemessenen Strömen im Messpunkt Transformator, handelt es sich um die Ströme, welche durch die Versorgung der Last entstehen (Tabelle 7.7).

Tabelle 7.7: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsche Last 3x1000 Ω, Grund- und dritter Oberschwingungsstrom VOR der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator GS				MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	242	-0,5	242,3	0,0	0	-133,4	0,4	144,6
L2	238	-121,9	242,2	-120,5	1	-70,8	0,2	0,4
L3	235	119,0	241,7	119,7	1	-73,4	0,5	-60,0
PEN	3	47,7	-	-	2	-89,4	-	-

Im reinen Netzbetrieb bei symmetrischer ohmscher Last sind die Ströme der dritten Oberschwingung sowohl in den Phasenleitern (L1, L2, L3), als auch der Summenstrom im PEN-Leiter (PEN) minimal. Die rein ohmsche Last verursacht bei idealen Bedingungen keine Ausbreitung der dritten Oberschwingung.

Nach der Synchronisation kommt der Messpunkt Labor-Synchrongenerator hinzu und die Auswertung erfolgt anhand der Grundschiwingung (GS) und der dritten Oberschwingung (3.OS).

Tabelle 7.8: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsche Last 3x1000 Ω, Grundschiwingungsströme **NACH** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator GS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	725	-125,3	248,7	0,0	900	42,2	248,9	0,0
L2	744	116,9	248,4	-120,5	899	-76,4	248,4	-120,0
L3	692	-6,3	247,9	119,5	856	161,0	247,9	120,6
PEN	67	-175,2	-	-	70	8,6	-	-

Tabelle 7.9: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsche Last 3x1000 Ω, dritte Oberschwiwungsströme **NACH** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	56	-72,4	1,0	140,9	56	109,9	1,0	140,4
L2	55	-59,4	0,4	124,1	55	122,6	0,4	128,5
L3	63	-87,1	0,3	77,8	63	94,3	0,3	78,3
PEN	171	-73,2	-	-	170	108,7	-	-

Über die Leistungsbilanz der Grundschiwingung (z.B. für die Phase L1) kann überprüft werden, ob die Messergebnisse schlüssig sind. Die Wirkleistung einer Messung der Tabelle 7.7 errechnet sich nach Formel (7.5) und ist für alle anderen Berechnungen gleich auszuführen.

$$\begin{aligned}
 P_{L1,T,GS,VOR,ber} &= |U_{L1,T,GS,VOR,gem}| \cdot |I_{L1,T,GS,VOR,gem}| \cdot \cos(\Delta\varphi) = \\
 &= 0,242 \text{ A} \cdot 242,3 \text{ V} \cdot \cos(-0,5^\circ) = \underline{58,6 \text{ W}}
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

Die von der Last vor der Synchronisation aufgenommene Leistung, muss nach Gleichung (7.6) der Leistung der Last nach der Synchronisation entsprechen:

$$\begin{aligned}
 P_{L1,T,GS,VOR,ber} &= \underline{58,6W} = P_{L1,SG,GS,NACH,ber} - P_{L1,T,GS,NACH,ber} = & (7.6) \\
 &= 165,9 \text{ W} - 104,2 \text{ W} = \underline{61,8 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

Nach der Synchronisation kommt es zu einer Überschusseinspeisung des nicht von der Last aufgenommenen Stromes aus dem Labor-Synchrongenerator in das Netz. Die rückgespeiste Leistung entspricht dem in Formel (7.6) gezeigten $P_{L1,NACH,GS,T}$ und berechnet sich über alle drei Phasen nach Formel (7.7).

$$\begin{aligned}
 P_{Rückspeisung,ber} &= P_{L1,T,GS,NACH,ber} + P_{L2,T,GS,NACH,ber} + P_{L3,T,GS,NACH,ber} = & (7.7) \\
 &= 104,2 \text{ W} + 99,6 \text{ W} + 100,3 \text{ W} = \underline{304,1 \text{ W}}
 \end{aligned}$$

Aufgrund der stimmigen Leistungsbilanz werden nun die Ströme der dritten Oberschwingung näher betrachtet. Bei einer rein ohmschen Last handelt es sich um einen linearen Verbraucher. Deshalb hat diese Last nur einen sehr geringen Einfluss auf Oberschwingungen. Die nach der Synchronisation auftretenden dritten Oberschwingungen (Tabelle 7.9) entstehen durch die Synchronisation der Erzeugungsanlage (Labor-Synchrongenerator) und breitet sich über die Leiter aus. In weiterer Folge schließen sich diese über den Sternpunkt des Transformators. Daher werden in beiden Messpunkten die betragsmäßig selben Oberschwingungsströme gemessen. Phasenmäßig sind die Ströme in beiden Messpunkten um 180° verschoben. Diese Verschiebung kann aufgrund der Messrichtung der verwendeten Stromzangen erklärt werden, sie zeigt vom Transformator ausgehend in Richtung Last. Die Ströme der dritten Oberschwingung fließen jedoch in die genau entgegengesetzte Richtung, daher der Versatz um 180° .

Abbildung 7.10 verdeutlicht, dass im Messaufbau mit ohmscher Last die dritte Oberschwingung nur während des Netzparallelbetriebes auftritt (ab Sekunde 50, nach der Synchronisation bis zur Abschaltung in Sekunde 155). Der dritte Oberschwingungsstrom fließt über die drei Phasen in den Sternpunkt des Transformators und addiert sich im PEN-Leiter. Der Zacken zum Zeitpunkt Sekunde 75 (rot eingerahmt) entsteht durch die Justage des Drehmomentes am Labor-Synchrongeneratorbedienstand nach erfolgter Synchronisation.

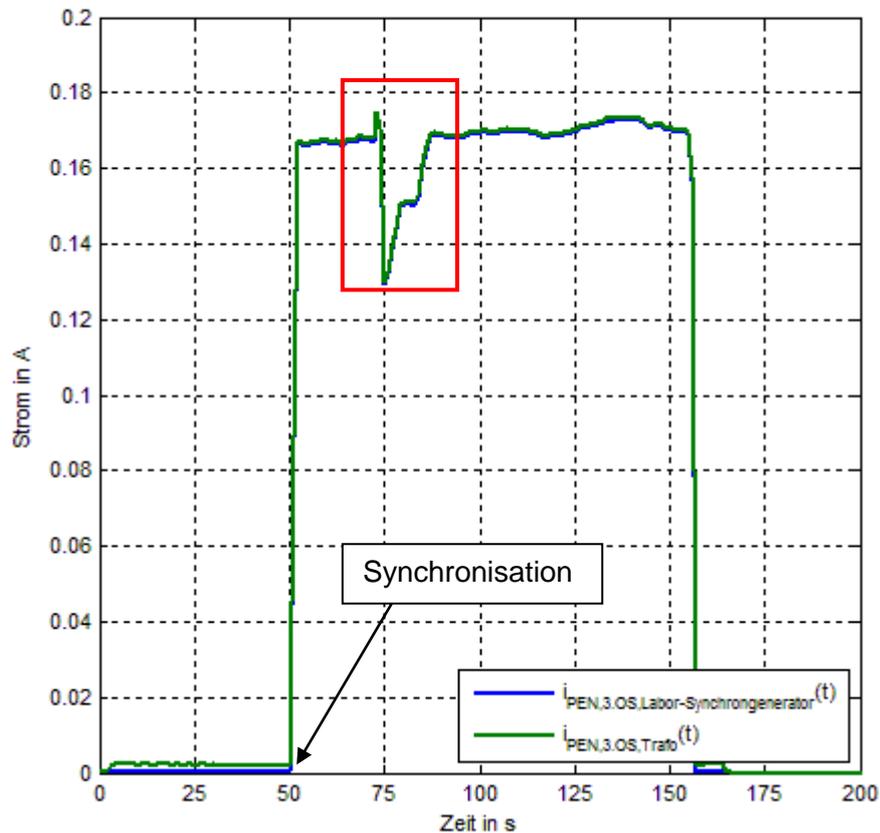


Abbildung 7.10: Zeitlicher Verlauf des dritten Oberschwingungsstromes im PEN-Leiter über die Messdauer

Über die rein ohmsche Last fließen keine Ströme der dritten Oberschwingung. Die Ausbreitung erfolgt nur zwischen Labor-Synchrongenerator und Transformator.

7.3.4.2 Netzparallelbetrieb – ohmsch-induktive Last

Der Messaufbau Abbildung 7.11 erfolgt wie bei der Messung mit ohmscher Last. Die Last ist aber je Phase als Serienschaltung einer Induktivität (1,59 H) mit einem Widerstand (550 Ω) ausgeführt. Die Gesamtimpedanz beträgt dann $3 \times (550 \Omega + j500 \Omega)$.

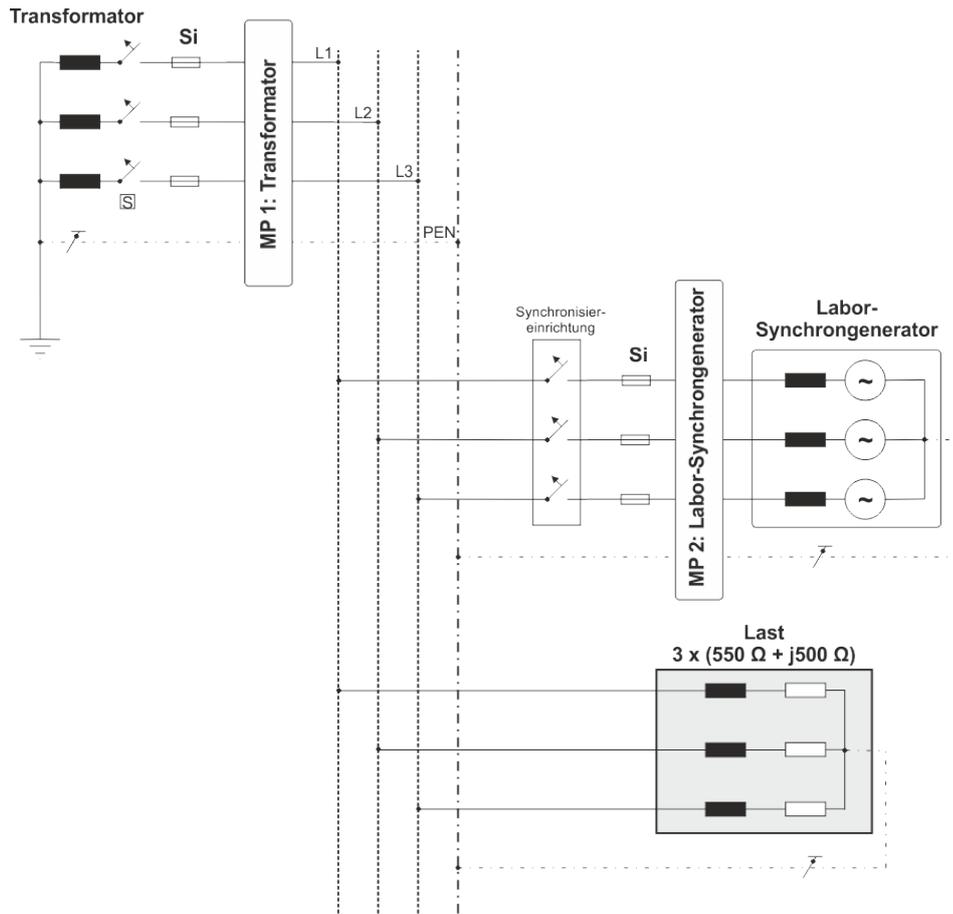


Abbildung 7.11: Netzparallelbetrieb mit ohmsch-induktiver-Last

Im reinen Netzbetrieb (vor der Synchronisation) treten im Vergleich zur rein ohmschen Last bereits deutlich höhere Ströme der dritten Oberschwingung auf (Tabelle 7.10). Diese Aufnahme kann durch Sättigungserscheinungen der verwendeten Induktivität erklärt werden, da beim Eintritt der Sättigung der Induktivität zwischen angelegter Spannung und aufgenommenen Strom kein linearer Zusammenhang mehr besteht. Durch die nichtlineare Aufnahme der Ströme und Spannungen entsteht die dritte Oberschwingung.

Tabelle 7.10: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsch-induktive-Last $3x(550 \Omega + j500 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme **VOR** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	71	-15,6	0,9	174,0
L2	71	-15,0	0,7	-156,5
L3	71	-14,9	0,7	-156,6
PEN	214	-14,7	-	-

Nach der Synchronisation kommt der Einfluss des Labor-Synchrongenerators auf die dritte Oberschwingung hinzu. Eine betragsmäßige Erhöhung des dritten Oberschwingungsstromes über den Transformator entsteht. Diese kann nach Gleichung (7.8) über die phasenrichtige Addition erklärt werden.

Tabelle 7.11: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsch-induktive-Last $3 \times (550 \Omega + j500 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme **NACH** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L₁	105	-31,0	1,3	161,0	46	110,8	1,3	160,4
L₂	108	-28,8	1,3	182,3	43	125,7	1,3	183,1
L₃	101	-44,3	0,8	158,7	54	92,6	0,7	160,2
PEN	312	-35,5	-	-	139	108,9	-	-

Unter der Annahme, dass der dritte Oberschwingungsstrom welcher über die Last fließt, vor bzw. nach der Synchronisation konstant bleibt, ergibt sich Beziehung (7.8).

$$\begin{aligned}
 I_{PEN,T,3.OS,NACH,ber} &= -I_{PEN,T,3.OS,VOR,gem} + I_{PEN,SG,3.OS,NACH,gem} = & (7.8) \\
 &= -(214 \text{ mA} \angle -14,7^\circ) + (139 \text{ mA} \angle 108,9^\circ) = \underline{313 \text{ mA} \angle 143,6^\circ}
 \end{aligned}$$

Vergleicht man den gemessenen Wert $I_{PEN,T,3.OS,NACH,gem}$ aus Tabelle 7.11 mit dem berechneten Wert aus Gleichung (7.8) erkennt man die konstante dritte Oberschwingungsaufnahme der ohmsch-induktiven-Last. Die Phasendifferenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert von ca. 180° entsteht durch die Messanordnung der Stromspule der beiden Messpunkte. Diese ist im Falle der Rückspeisung des Labor-Synchrongenerators in das Netz um 180° versetzt angeschlossen.

Wie in Abbildung 7.12 erkennbar, prägt sich ein zusätzlicher dritter Oberschwingungsstrom nach der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators zum dritten Oberschwingungsstrom der Last im Messpunkt Transformator ein. Der Oberschwingungsstrom über die ohmsch-induktive-Last bleibt annähernd konstant. Der rot eingerahmte Verlauf nach erfolgter Synchronisation bis in etwa Sekunde 30 entsteht durch die manuelle Veränderung des Drehmomentes am Labor-Synchrongenerator.

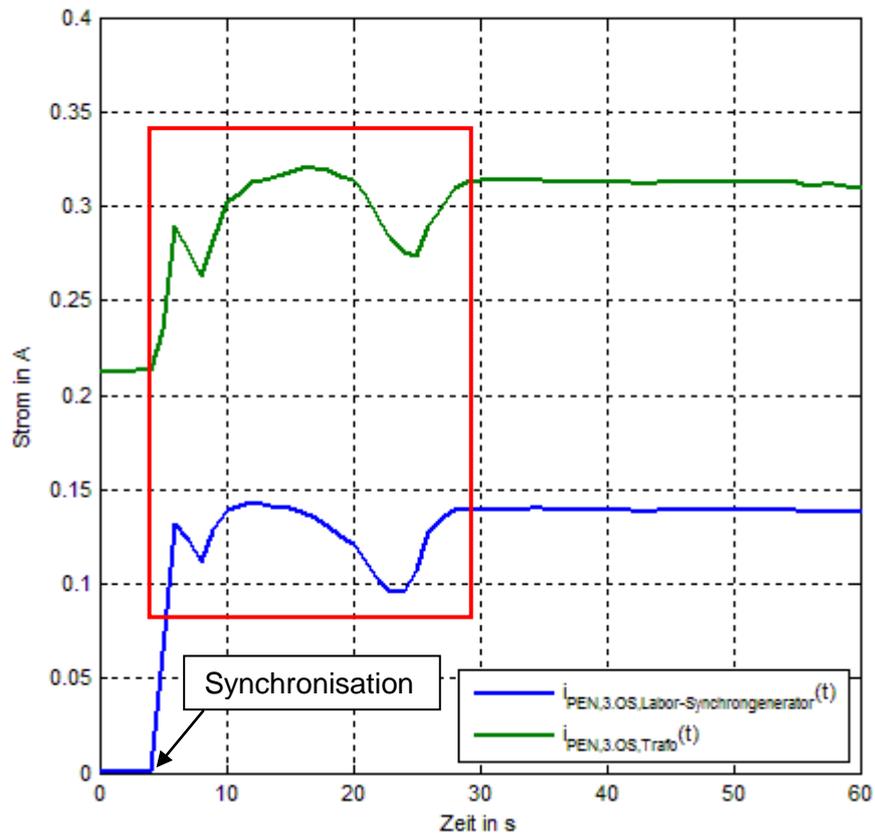


Abbildung 7.12: Zeitlicher Verlauf des dritten Oberschwingungsstromes im PEN-Leiter über die Messdauer

7.3.4.3 Netzparallelbetrieb – ohmsch-kapazitive Last

Der Messaufbau (Abbildung 7.13) erfolgt analog der Messung mit ohmscher Last. Die Last ist je Phase als Parallelschaltung einer Kapazität (83 nF) mit einem Widerstand (500 Ω) ausgeführt. Sie hat eine Impedanz von $3 \times (500 \Omega - j7 \Omega)$.

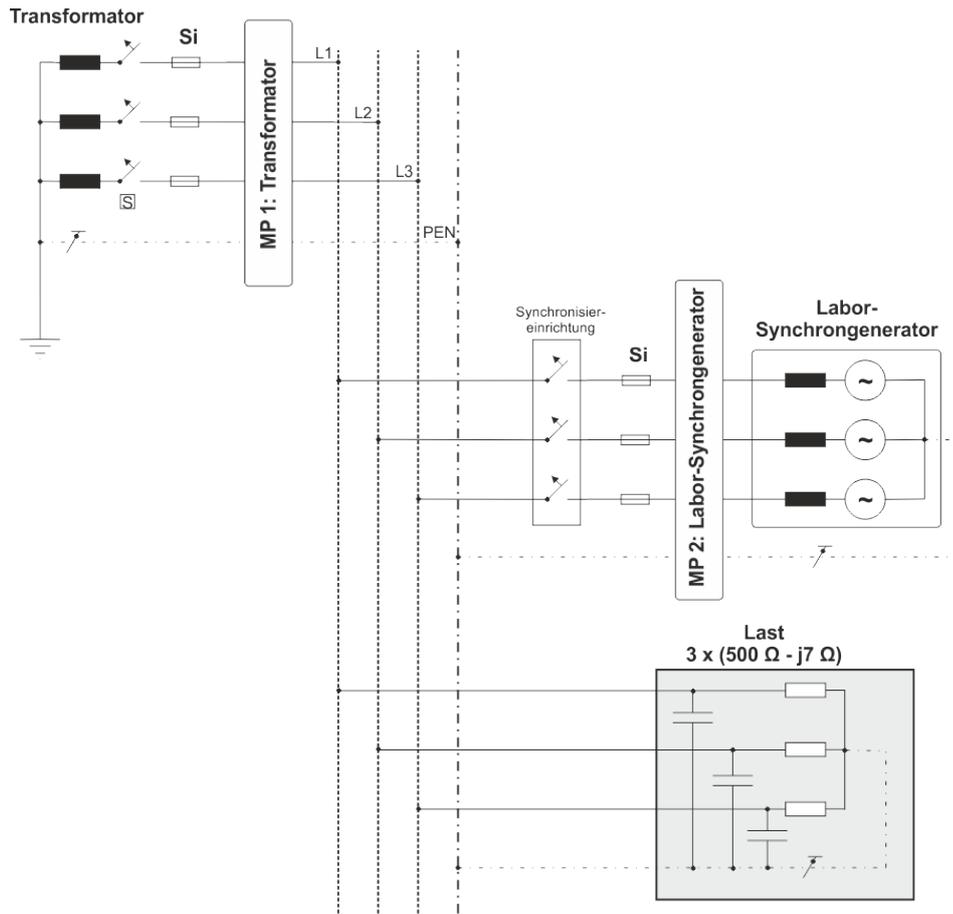


Abbildung 7.13: Netzparallelbetrieb mit ohmsch-kapazitiver Last

Vor der Synchronisation, also im reinen Netzbetrieb, nimmt die ohmsch-kapazitive Last ähnlich der rein ohmschen Last nur einen sehr geringen dritten Oberschwingungsstrom auf (Tabelle 7.12).

Tabelle 7.12: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsch-kapazitive Last $3 \times (500 \Omega - j7 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme **VOR** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	1	-51,0	0,3	150,3
L2	2	-55,1	0,4	-66,3
L3	1	-33,4	0,2	1,3
PEN	4	-46,4	-	-

Die Oberschwingungsströme nach der Synchronisation (Tabelle 7.13) haben gleiches Verhalten wie bei rein ohmscher Last. Die nach der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators entstandenen Oberschwingungsströme breiten sich über den Messpunkt Transformator (MP 1) und Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) aus.

Tabelle 7.13: Messung **Netzparallelbetrieb** - ohmsch-kapazitive-Last $3 \times (500 \Omega - j7 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme **NACH** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	52	-72,3	0,8	132,6	52	109,4	0,8	132,1
L2	53	-63,0	0,2	-177,8	52	118,7	0,2	177,1
L3	60	-86,8	0,5	98,3	61	94,1	0,5	100,7
PEN	162	-74,2	-	-	162	107,2	-	-

Die Phasenlage der dritten Oberschwingungsströme in beiden Messpunkten unterscheidet sich um 180° , da die Stromrichtung entgegengesetzt der Messrichtung der Stromzangen im Messpunkt Transformator ist. Abbildung 7.14 verdeutlicht die Kongruenz der Ströme der beiden Messpunkte.

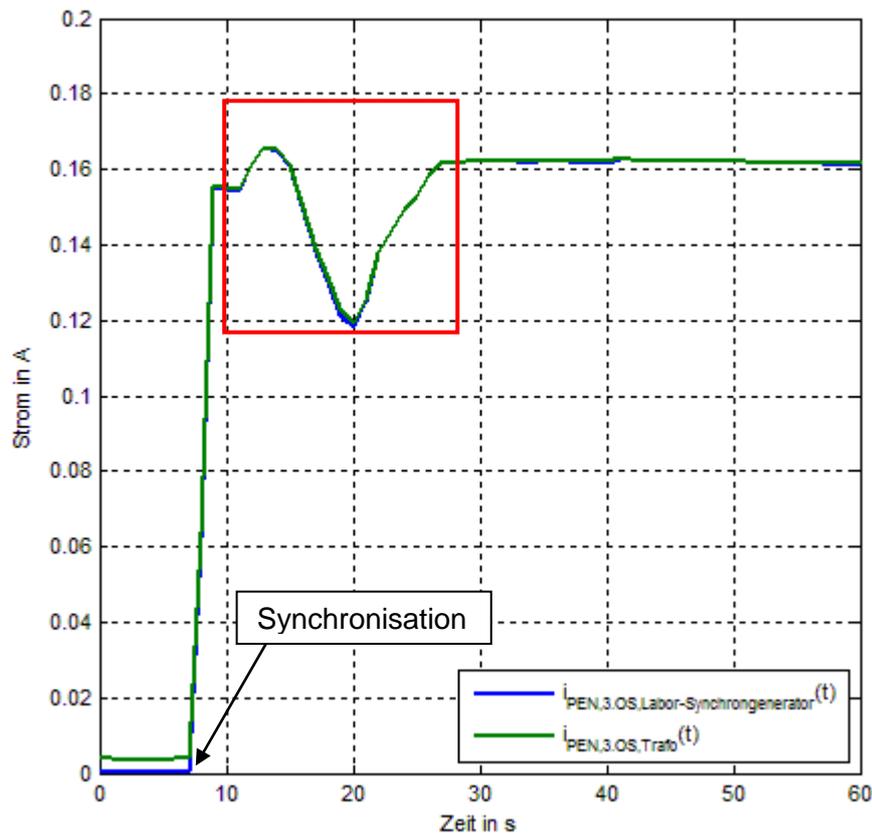


Abbildung 7.14 Zeitlicher Verlauf des dritten Oberschwingungsstromes im PEN-Leiter über die Messdauer

Der rot markierte Abschnitt in Abbildung 7.14 stellt die Justage des Labor-Synchrongeneratordrehmomentes dar, welches nach dem Synchronisationsvorgang manuell verändert wird.

7.3.4.4 Netzparallelbetrieb – unsymmetrische Last

An den Versuchsaufbau wird eine unsymmetrische Last angeschlossen (Abbildung 7.15). Diese besteht aus drei Schiebewiderständen, wobei L1 und L3 auf den Wert 250 Ω eingestellt sind und L2 einen Wert von 1000 Ω besitzt.

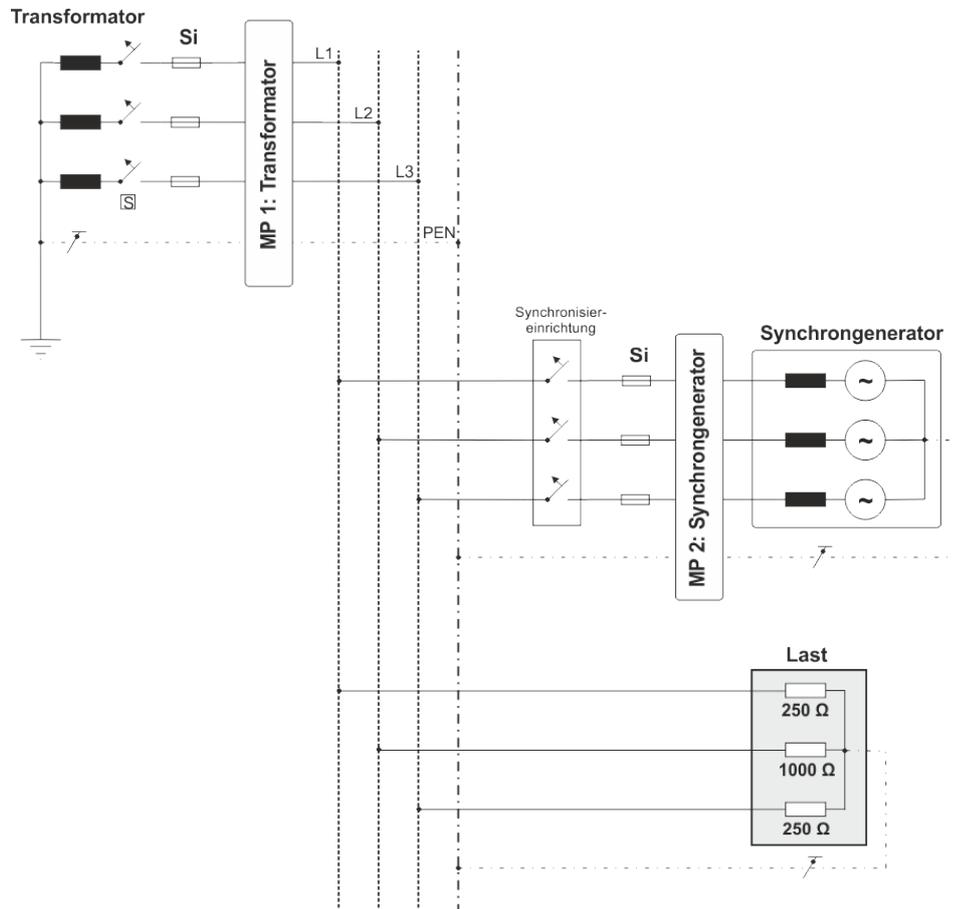


Abbildung 7.15: Netzparallelbetrieb mit unsymmetrischer Last

Im Falle der unsymmetrischen Last ergibt sich im reinen Netzbetrieb (vor der Synchronisation) ein ähnliches Oberschwingungsverhalten wie mit rein ohmscher- bzw. ohmsch-kapazitiver Last. Die ausgewerteten Daten zeigen, dass durch Unsymmetrie nur ein geringer dritter Oberschwingungsstrom im Vergleich zur Messung mit ohmsch-induktiver Last über die Last fließt.

Tabelle 7.14: Messung **Netzparallelbetrieb** - unsymmetrische-Last, dritten Oberschwingungsströme **VOR** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	1	57,4	0,3	124,8
L2	1	-76,0	0,2	-51,2
L3	3	-38,7	0,4	-58,1
PEN	3	-28,9	-	-

Nach der Synchronisation prägt sich der dritte Oberschwingungsstrom über beide Messpunkte (MP 1, MP 2) ein. Der dritte Oberschwingungsstrom in den Phasen des Messpunktes Transformator (MP 1) summiert sich in dessen Sternpunkt zum PEN-Leiterstrom. Dieser wird auch im PEN-Leiter des Labor-Synchrongenerators (MP 2) gemessen. Die Phasenlage dieser Ströme unterscheidet sich um 180°, dies ist durch die Messrichtung der Stromzangen zu erklären. Im Messpunkt Transformator ist diese Messrichtung genau entgegengesetzt der Stromrichtung der dritten Oberschwingung.

Tabelle 7.15: Messung **Netzparallelbetrieb** - unsymmetrische-Last, dritten Oberschwingungsströme **NACH** der Synchronisation des Labor-Synchrongenerators

	MP 1: Transformator 3.OS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	44	-68,9	0,9	127,0	47	112,3	0,9	126,5
L2	53	-47,9	0,4	133,7	53	134,1	0,4	136,2
L3	63	-87,2	0,1	-155,4	63	9305,0	0,1	170,3
PEN	153	-68,9	-	-	155	112,4	-	-

Die gemessenen Verläufe (Abbildung 7.16) der dritten Oberschwingung in den Messpunkten Transformator (MP 2) und Labor-Synchrongenerator (MP 2) sind kongruent. Daraus folgt, dass über die unsymmetrische Last keine Ausbreitung stattfindet. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die manuelle Einstellung des Labor-Synchrongenerator Drehmomentes.

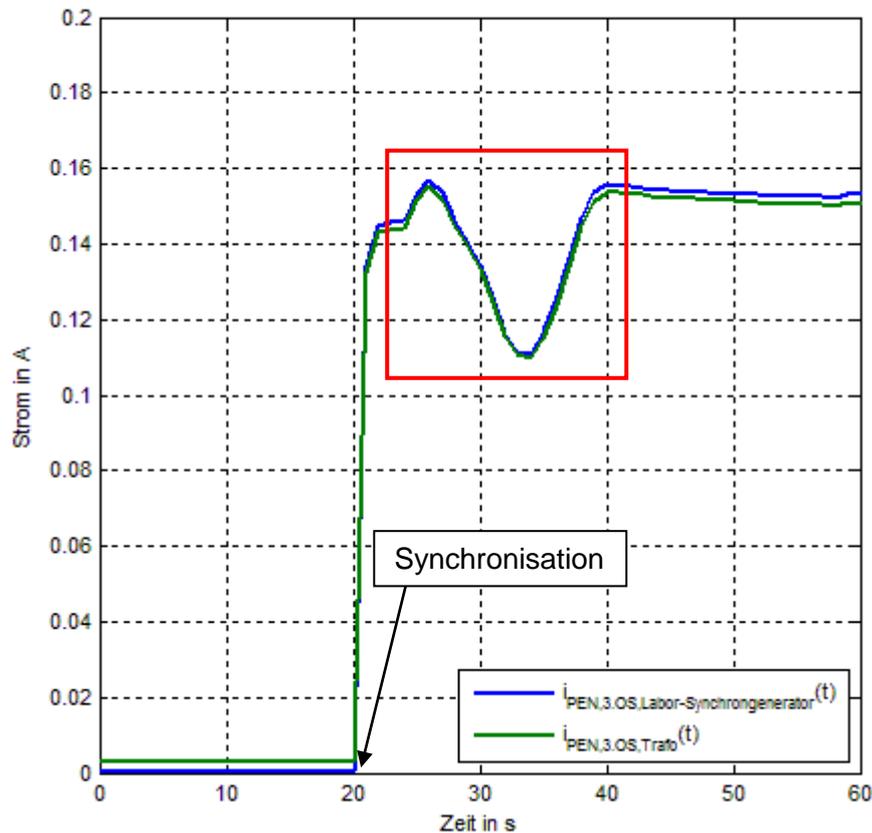


Abbildung 7.16: Zeitlicher Verlauf des dritten Oberschwingungsstromes im PEN-Leiter über die Messdauer

7.3.5 Ergebnisse – Inselnetzbetrieb

Im Inselnetzbetrieb erfolgt durch den offenen Schalter (S) an der Sekundärseite des Transformators die Versorgung der Last nur mehr durch den Labor-Synchrongenerator. Somit wird auch der Messpunkt Transformator nicht mehr benötigt (siehe Abbildung 7.17). Er wird jedoch in den folgenden Kurzschlussversuchen (1-poliger Fehler gegen Erde) benötigt, da sich hier der Fehlerstrom auch über den geerdeten Transformatorsternpunkt und den daran angeschlossenen PEN-Leiter ausbreitet.

Die Auswertung der Messung mit ohmscher Last wird sowohl für die Grundschiwingung als auch für die dritte Oberschwingung ausgeführt. Die Grundschiwingungsauswertung dient zur Kontrolle der Messung bzw. des Messaufbaues. Da der Messaufbau für alle Messungen derselbe bleibt und nur die Last verändert wird, ist in dieser Arbeit die Grundschiwingungsauswertung nur für die Messung mit ohmscher Last ausgeführt. Die Grundschiwingungsauswertung würde jedoch analog in allen anderen Messungen erfolgen.

7.3.5.1 Inselnetzbetrieb – ohmsche Last

Im Inselnetzbetrieb mit reiner ohmscher Last (Abbildung 7.17) ist lediglich der Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) von Interesse. Daher ist in Abbildung 7.17 der Transformator inklusive Messpunkt (MP 1) grau hinterlegt. Der Messaufbau wird mit einer Last von $3 \times 1000 \Omega$ durchgeführt.

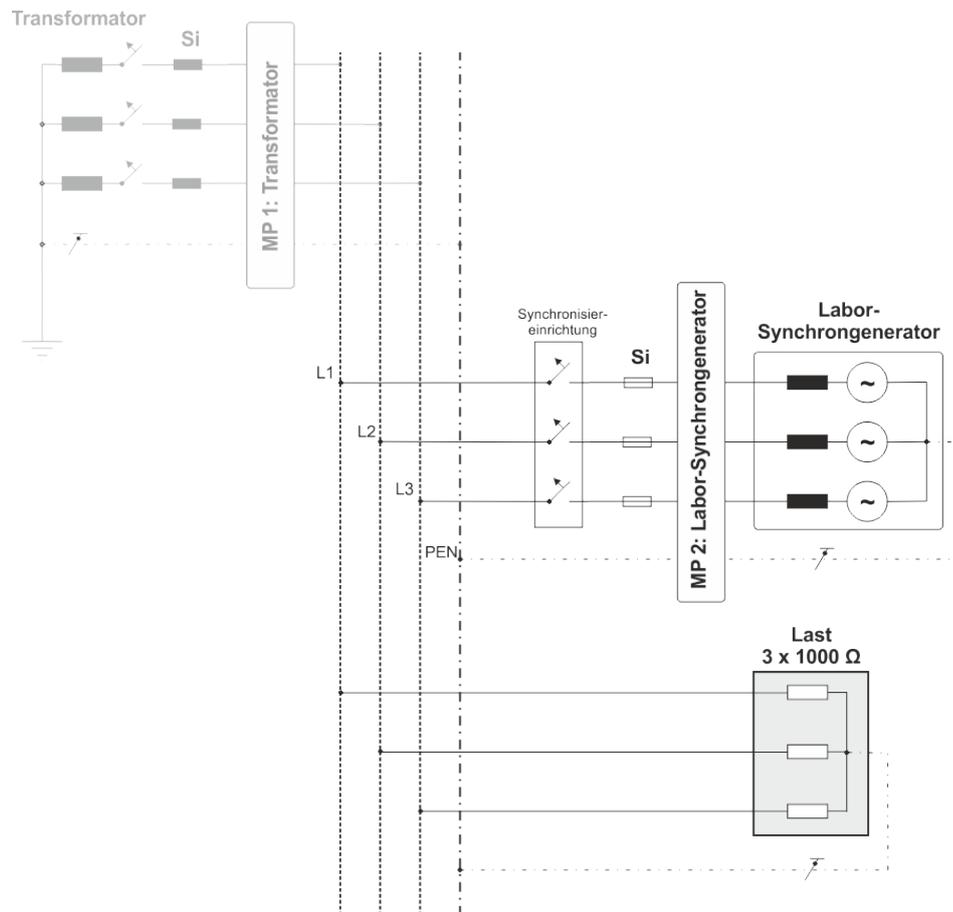


Abbildung 7.17: Inselnetzbetrieb mit ohmscher Last

Die Auswertung vor und nach der Synchronisation, wie im Netzparallelbetrieb, wird im Inselnetzbetrieb nicht ausgeführt, da es keinen Synchronisationsvorgang in diesem Sinne gibt. Der Labor-Synchrongenerator speist, nach erfolgtem Hochfahren, direkt die Last.

Tabelle 7.16: Messung **Inselnetzbetrieb** - ohmsche Last $3 \times 1000 \Omega$, Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme

	MP 2: Labor-Synchrongenerator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L₁	235	1,5	231,2	0,0	6	-159,0	5,5	-166,5
L₂	230	-121,5	230,5	-120,1	5	-155,7	5,1	-162,0
L₃	226	119,6	231,5	120,2	4	-170,0	4,3	-177,6
PEN	6	54,5	-	-	15	-163,3	-	-

Aufgrund der symmetrischen Ausführung der Last ergibt sich für die Grundschwingung ein geringer PEN-Leiterstrom. Der dritte Oberschwingungsstrom kann sich über die symmetrische, ohmsche Last nicht einprägen, da die erzeugten Oberschwingungsströme durch die Last nicht beeinflusst werden. Die dritten Oberschwingungsspannungen sind jedoch deutlicher als in den bisherigen Messungen ausgeprägt, diese erreichen ein HR von etwa 2 % bezogen auf die Spannung der Grundschwingung.

7.3.5.2 Inselnetzbetrieb – ohmsch-induktive Last

Zur ohmschen Last (550Ω) wird eine Induktivität ($1,59 \text{ H}$) in Serie (Abbildung 7.18) geschaltet. Die Last besitzt eine Größenordnung von $3 \times (550 \Omega + j500 \Omega)$. Die dezentrale Energieerzeugungsanlage (Labor-Synchrongenerator) versorgt diese Last. Während des Betriebes erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Größe und der Ausbreitung der dritten Oberschwingung.

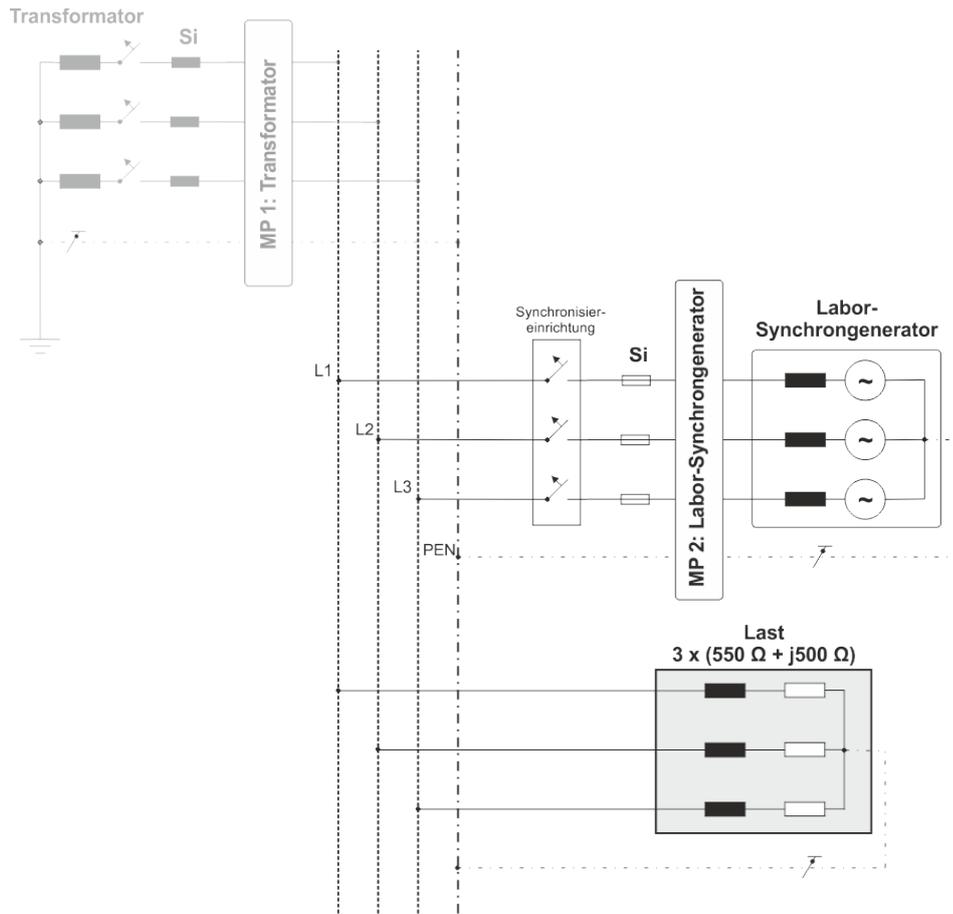


Abbildung 7.18: Inselnetzbetrieb mit ohmsch-induktiver Last

Es kommt zu einer deutlichen Ausprägung des dritten Oberschwingungsstromes über die ohmsch-induktive-Last im Vergleich zur Messung mit rein ohmscher Last. Dies kann durch Sättigungserscheinungen der verwendeten Induktivität erklärt werden. Grundsätzlich handelt es sich bei einer Induktivität um ein lineares Bauelement, geht diese jedoch in Sättigung bekommt sie nichtlineare Eigenschaften, wodurch die dritten Oberschwingungsströme hervorgerufen werden.

Tabelle 7.17: Messung **Inselnetzbetrieb** – ohmsch-induktive Last $3x(550 \Omega + j500 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme

	MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	61	-22,0	12,5	-136,1
L2	61	-22,5	12,3	-135,0
L3	62	-22,4	10,8	-138,4
PEN	182	-21,7	-	-

7.3.5.3 Inselnetzbetrieb – ohmsch-kapazitive Last

Die Last ist als Parallelschaltung von einem Kondensator (83 nF) und einem Widerstand (500 Ω) ausgeführt und wird vom Labor-Synchrongenerator versorgt (Abbildung 7.19). Der Einfluss und die Ausbreitung der dritten Oberschwingung werden untersucht.

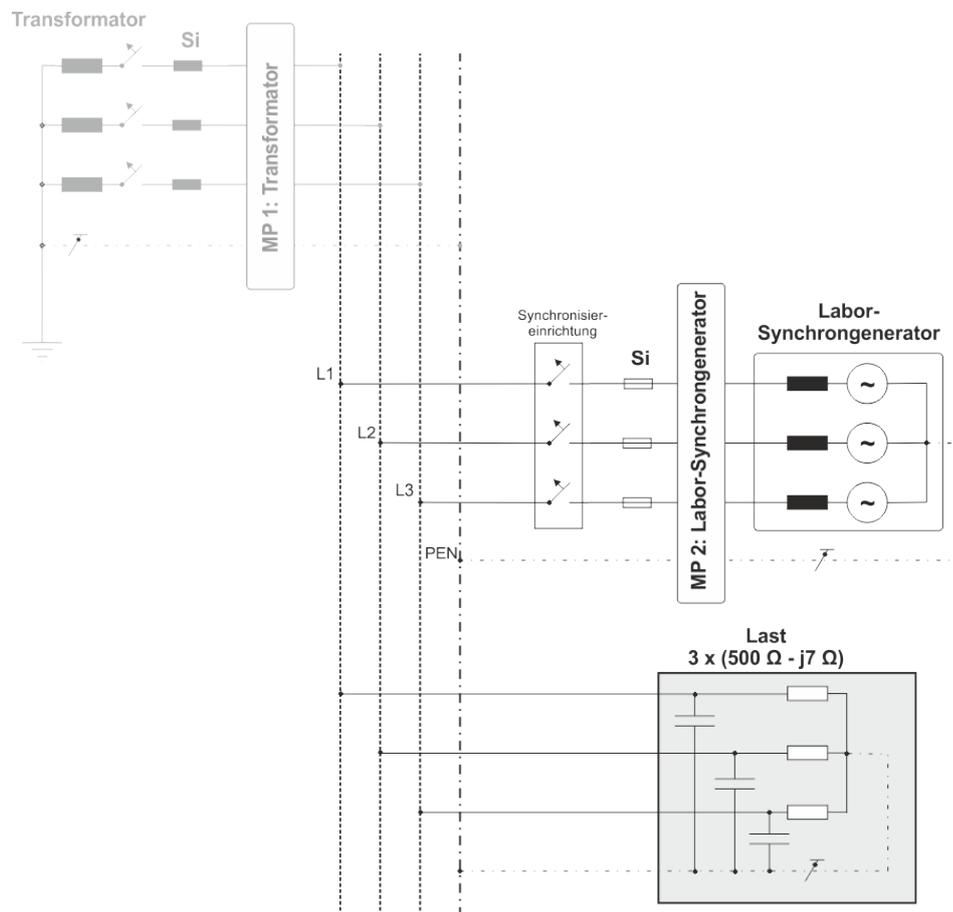


Abbildung 7.19: Inselnetzbetrieb mit ohmsch-kapazitiver Last

Auch im Inselnetzbetrieb mit ohmsch-kapazitiver Last fließt nur ein geringer dritter Oberschwingungsstrom. Die Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator verhält sich linear zu den erzeugten Strömen und Spannungen des Labor-Synchrongenerators.

Tabelle 7.18: Messung **Inselnetzbetrieb** – ohmsch-kapazitive Last $3x(550 \Omega - j7 \Omega)$, dritte Oberschwingungsströme

	MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	8	-168,5	4,1	-175,8
L2	8	-157,1	4,0	-165,5
L3	6	169,4	3,3	163,5
PEN	20	-171,2	-	-

7.3.5.4 Inselnetzbetrieb – unsymmetrische Last

Zur Messung einer unsymmetrischen Last werden drei Schiebewiderstände verwendet. Zwei dieser drei Schiebewiderstände werden auf den Wert 250Ω (L1, L3) eingestellt, der dritte (L2) hat einen Wert von 1000Ω (Abbildung 7.20).

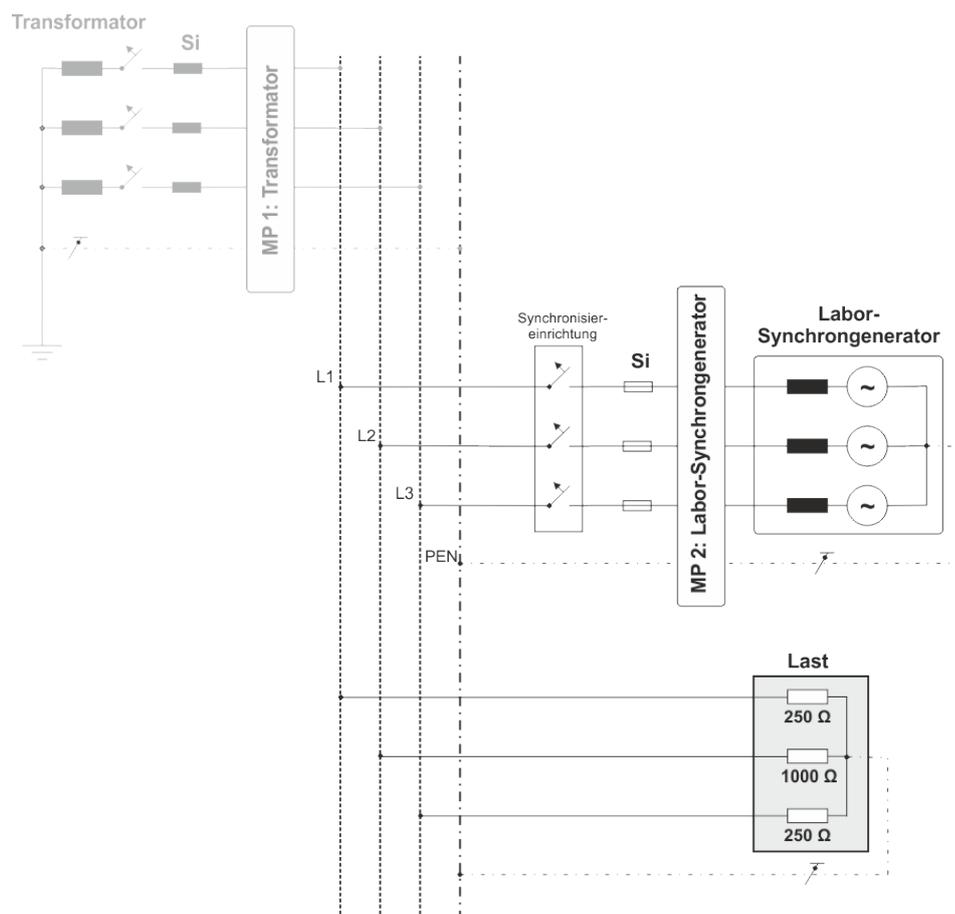


Abbildung 7.20: Inselnetzbetrieb mit unsymmetrischer Last

Da sich die unsymmetrische, ohmsche Last linear zu den vom Labor-Synchrongenerator erzeugten Strömen und Spannungen verhält, ist die Ausbreitung der dritten Oberschwingung eingeschränkt.

Tabelle 7.19: Messung **Inselnetzbetrieb** – unsymmetrische Last, dritte Oberschwingungsströme

	MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung	
	mA	°	V	°
L1	13	130,7	3,4	135,3
L2	6	-122,4	5,6	-128,1
L3	21	131,7	5,5	135,7
PEN	32	141,4	-	-

7.3.5.5 Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde

Der Messaufbau (Abbildung 7.21) erfolgt wie bei den vorherigen Messungen. Zusätzlich wird eine manuelle Fehlerauslöseeinheit hinzugefügt. Diese verbindet bei Betätigung die Phase L1 mit dem PEN-Leiter. Als Last dienen drei Schiebewiderstände zu je 250Ω . Der Labor-Synchrongenerator wird hochgefahren und versorgt diese Last. Während des Betriebes wird die Fehlereinheit ausgelöst. Der Fehler bleibt etwa 1-2 Sekunden bestehen und wird anschließend per Hand abgeschaltet, um eine Überlastung der verwendeten Komponenten zu vermeiden. Der Erdwiderstand wird nicht berücksichtigt, da der Messaufbau mit Messstrippen ausgeführt ist.

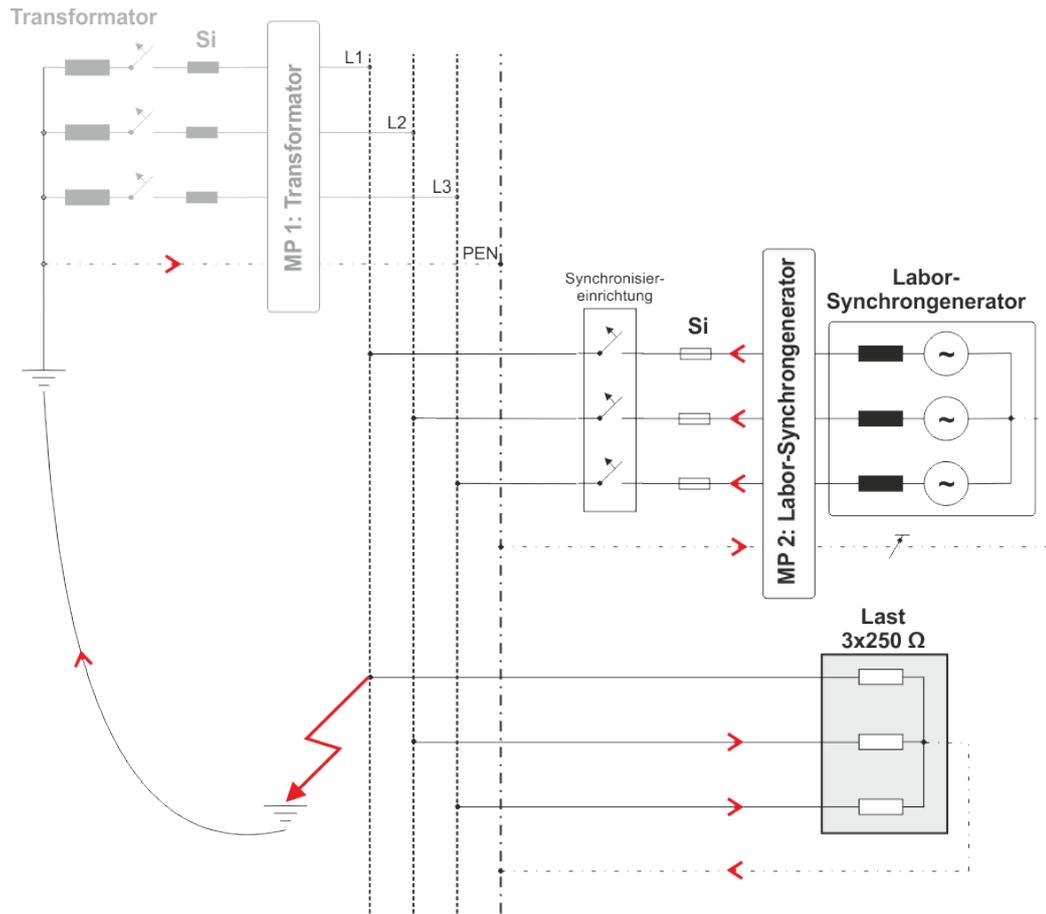


Abbildung 7.21: Inselnetzbetrieb, 1-poliger Fehler gegen Erde, Generatorsternpunkt mit PEN-Leiter verbunden

Die Messung wird vor dem Fehler und während des Fehlers ausgewertet. Die Messung vor dem Fehler entspricht der Messung im Inselnetzbetrieb mit ohmscher Last (vgl.: 7.3.5.1).

Tabelle 7.20: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde, Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) VOR dem Fehler

	MP 2: Labor-Synchrongenerator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	930	0,5	230,7	0,0	15	146,5	4,1	149,0
L2	920	-120,4	229,5	-120,0	14	160,0	3,7	161,3
L3	920	119,7	230,8	120,3	17	120,4	4,4	116,2
PEN	10	70,3	-	-	44	140,8	-	-

Im Fehlerfall kommt der Messpunkt Transformator (MP 1) wieder zum Tragen. Es ergibt sich wie in Abbildung 7.21 eingezeichnet, ein Stromfluss von der Fehlerstelle (Phasenleiter-Erde-

Berührung) über den Sternpunkt des Transformators. Der dort angeschlossene PEN-Leiter schließt den Stromkreis zurück in die Erzeugungsanlage (Tabelle 7.21).

Tabelle 7.21: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde, Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) **WÄHREND** des Fehlers

	MP 2: Labor-Synchrongenerator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L₁	2660	0,1	1,3	0,0	85	38,6	0,0	39,2
L₂	480	-58,1	119,7	-57,9	6	50,5	1,6	45,2
L₃	450	177,4	113,4	178,0	13	-121,4	3,4	-116,4
PEN	2490	-8,6	-	-	79	36,9	-	-

Tabelle 7.22: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde, Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Transformator (MP 1) **WÄHREND** des Fehlers

	MP 1: Transformator GS				MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L₁	-	-	0,4	0,0	-	-	0,0	42,6
L₂	-	-	119,5	-58,9	-	-	1,6	42,4
L₃	-	-	113,7	176,6	-	-	3,4	-120,7
PEN	2670	179,2	-	-	85	-143,3	-	-

Aus Tabelle 7.22 ist zu entnehmen, dass sich im Fehlerfall ein Stromfluss im PEN-Leiter des Messpunktes Transformator ergibt. Dieser entspricht dem gesamten Strom des Phasenleiters L₁, der im Labor-Synchrongenerator erzeugt wird.

Die zeitlichen Verläufe der Ströme der dritten Oberschwingung der beiden Messpunkte sind in Abbildung 7.22 dargestellt. Es ist der gesamte Messverlauf dargestellt, vom Betrieb vor dem Kurzschluss, während des Kurzschlusses und nach dem Abschalten des Kurzschlusses mit weiterfolgendem Normalbetrieb.

Sowohl die Fehlerauslösung als auch die Fehlerklärung wird manuell durchgeführt. Um eine Überlastung der verwendeten Komponenten auszuschließen, wird der Fehlerzustand nur für ca. drei Sekunden belassen. Das heißt für die Messauswertung, dass nur drei Messpunkte im Kurzschluss zur Verfügung stehen, denn durch die gewählte Fensterung der FFT kann nur ein Messpunkt pro Sekunde dargestellt werden.

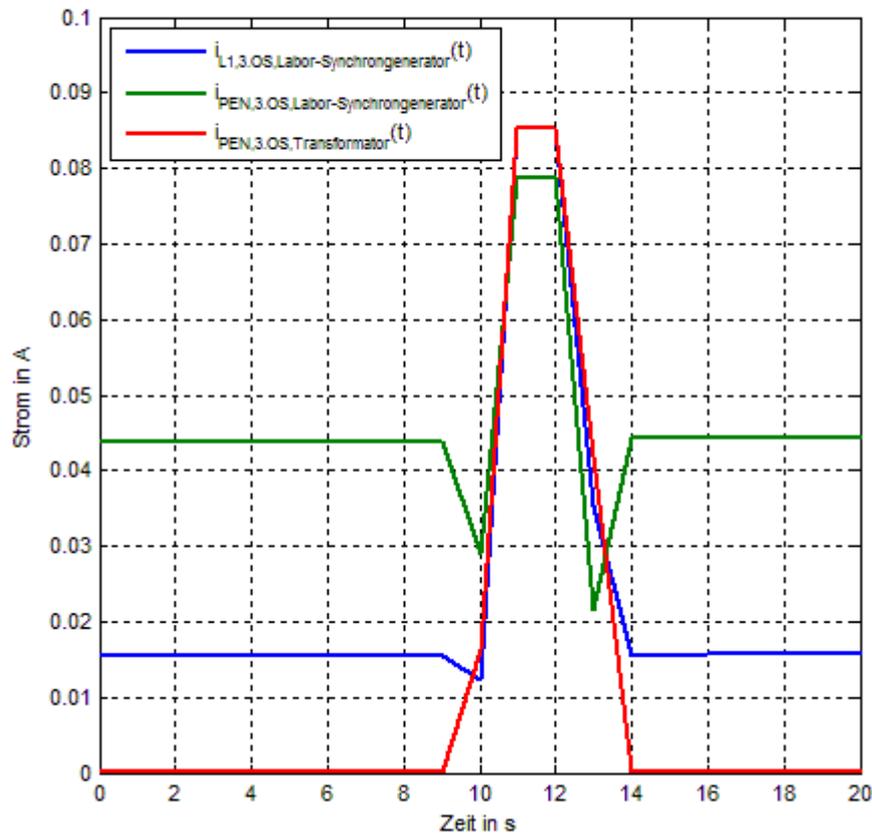


Abbildung 7.22: Zeitliches Verhalten der dritten Oberschwingung über die Messdauer

Aus Abbildung 7.22 ist ersichtlich, dass der Strom der kurzgeschlossenen Phase L1 (blaue Kurve) im Fehlerfall gleich dem Strom des PEN-Leiters des Transformators (rote Kurve) wird. Im PEN-Leiter des Labor-Synchrongenerators (grüne Kurve) erreicht der Kurzschlussstrom nicht mehr den Spitzenwert der anderen beiden Kurven, da sich die Ströme der „gesunden“ Phasenleiter L2 und L3 zum Kurzschlussstrom phasenrichtig addieren.

7.3.5.6 Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde, Generatorsternpunkt geerdet

Der Generatorsternpunkt ist mit dem PEN-Leiter und niederohmig mit Erde verbunden. Um den Fehler auszulösen, verbindet eine manuell zu betätigende Fehlerauslöseeinheit den Phasenleiter L1 mit Erde. Die Last ist mit drei Schiebewiderständen zu je 250 Ω ausgeführt (Abbildung 7.23).

Nach dem Hochfahren des Labor-Synchrongenerators im Inselnetzbetrieb versorgt dieser die Last. Im Betrieb wird die Fehlerauslöseeinheit betätigt. Der eingetretene Fehler bleibt etwa 2-3 Sekunden bestehen und wird anschließend von Hand abgeschaltet, um eine

Überlastung bzw. etwaige Beschädigung an den verwendeten Komponenten auszuschließen.

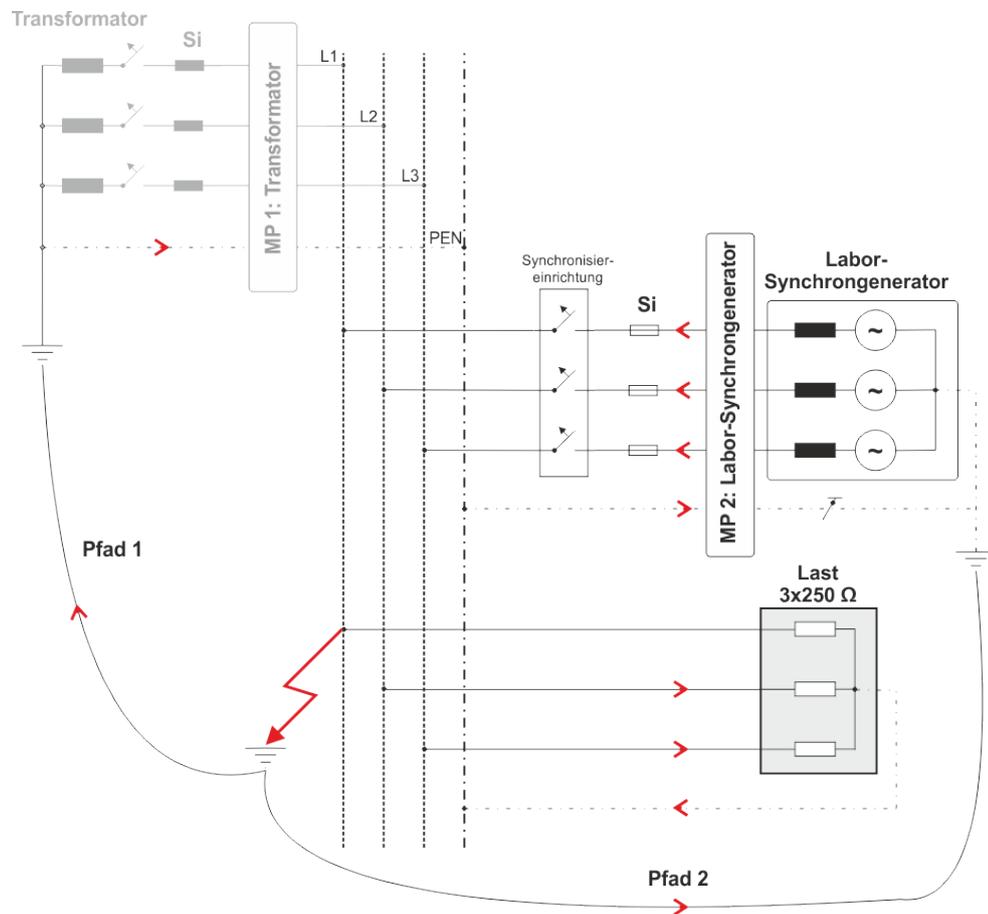


Abbildung 7.23: Inselnetzbetrieb, 1-poliger Fehler gegen Erde, Generatorsternpunkt mit PEN-Leiter verbunden und geerdet

Die Messung wird in eine Zeitspanne vor dem Fehler (normaler Inselnetzbetrieb) und in eine Zeitspanne während des Fehlers unterteilt und ausgewertet (Tabelle 7.23).

Tabelle 7.23: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde (Generatorsternpunkt geerdet), Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) **VOR** dem Fehler

	MP 2: Labor-Synchrongenerator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	928	0,5	230,9	0,0	15	144,2	4,0	146,8
L2	925	-120,3	230,1	-119,9	14	165,6	3,7	166,1
L3	925	119,7	231,4	120,3	18	121,6	4,7	126,0
PEN	9	66,2	-	-	34	141,3	-	-

Im Fehlerfall, bei dem der Phasenleiter L1 mit Erde verbunden ist, bilden sich zwei Strompfade (Pfad 1, Pfad 2, Abbildung 7.23) ausgehend von der Fehlerstelle aus. Der erste Strompfad (Pfad 1) schließt sich über den Transformatorsternpunkt und dessen PEN-Leiter zurück zum Labor-Synchrongeneratorsternpunkt. Der zweite Pfad (Pfad 2) bildet sich von der Fehlerstelle direkt zum geerdeten Labor-Synchrongeneratorsternpunkt aus.

Tabelle 7.24: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde (Generatorsternpunkt geerdet), Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Labor-Synchrongenerator (MP 2) **WÄHREND** des Fehlers

	MP 2: Labor-Synchrongenerator GS				MP 2: Labor-Synchrongenerator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	2681	0,2	1,2	0,0	88	38,7	0,0	40,0
L2	481	-58,1	120,3	-58,0	6	47,4	1,6	42,8
L3	456	177,3	113,8	178,0	13	-121,4	3,5	-116,6
PEN	621	-29,0	-	-	18	30,0	-	-

Tabelle 7.25: Messung Inselnetzbetrieb – 1-poliger Fehler gegen Erde (Generatorsternpunkt geerdet), Grundschwingungs- und dritte Oberschwingungsströme im Messpunkt Transformator (MP 1) **WÄHREND** des Fehlers

	MP 1: Transformator GS				MP 1: Transformator 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	mA	°	V	°	mA	°	V	°
L1	-	-	0,3	0,0	-	-	0,0	42,1
L2	-	-	120,1	-59,2	-	-	1,6	39,3
L3	-	-	113,8	176,3	-	-	3,5	-121,6
PEN	748	-174,9	-	-	25	-143,1	-	-

Der Kurzschlussstrom, der im Kurzschlussfall über den Pfad 2 (Fehlerstelle - geerdeter Generatorsternpunkt) führt, errechnet sich nach Formel (7.9) (exemplarisch für die dritte Oberschwingung ausgeführt).

$$I_{Fehler,Pfad2} = I_{L1,SG,3.OS,WÄHREND,gem} - I_{PEN,T,3.OS,WÄHREND,gem} = \quad (7.9)$$

$$= (88 \text{ mA} \angle 38,7^\circ) + (25 \text{ mA} \angle -143,1^\circ) = \underline{63 \text{ mA} \angle 39,4^\circ}$$

Es kommt zu einer Stromaufteilung des kurzgeschlossenen Phasenleiterstromes über die beiden Pfade (Pfad 1, Pfad 2) im Verhältnis:

$$\frac{Pfad\ 1}{Pfad\ 2} = \frac{30}{70} \quad (7.10)$$

Die zeitlichen Verläufe der Ströme der dritten Oberschwingung sind in Abbildung 7.24 dargestellt. Sie zeigt den Betrieb vor dem Kurzschluss, während des Kurzschlusses und das Abschalten des Kurzschlusses mit weiterfolgendem Normalbetrieb. Aus diesen Schalthandlungen ergeben sich auch die dargestellten Verläufe. Zu beachten ist, dass aufgrund der gewählten Fensterung für die FFT nur ein Messpunkt pro Sekunde ausgewertet wird.

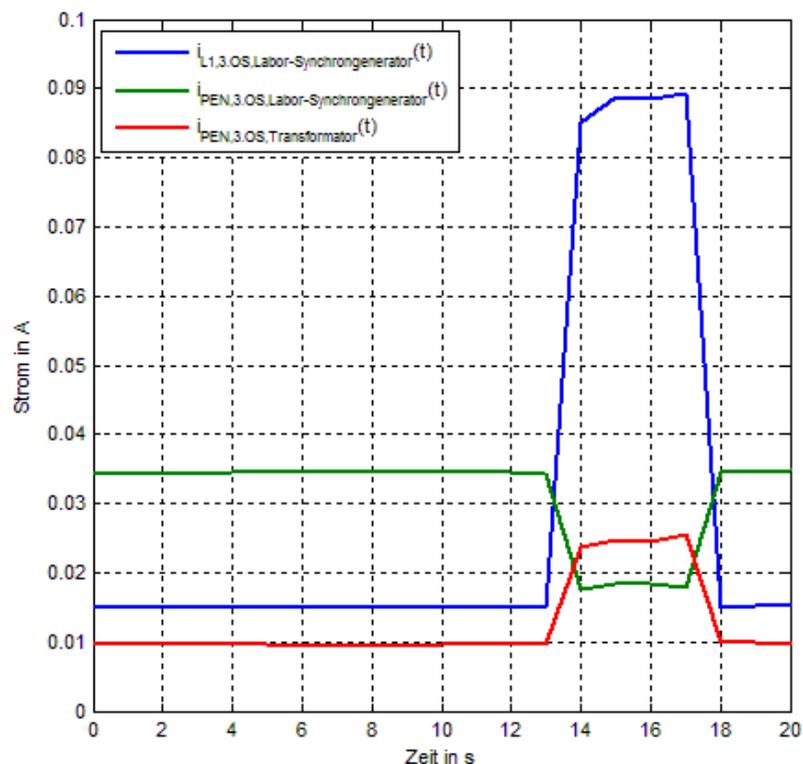


Abbildung 7.24: Zeitliches Verhalten der dritten Oberschwingung während des Kurzschlusses

In der Abbildung 7.24 ist ersichtlich, dass sich der Strom der kurzgeschlossenen Phase L1 (blaue Kurve) im Fehlerfall aufteilt. Der Pfad 1 (PEN-Leiter des Transformators) ist als rote Kurve dargestellt. Im PEN-Leiter des Labor-Synchrongenerators (grüne Kurve) kann man eine betragsmäßige Abnahme des Stromes feststellen, da der über Pfad 2 fließende Strom nicht von der Stromzange über den PEN-Leiter des Labor-Synchrongenerators erfasst wird.

7.3.6 Verursacher der dritten Oberschwingung

Betrachtet man die Messung des Labor-Synchrongenerators im Netzparallelbetrieb mit ohmscher Last (siehe 7.3.4.1), so kann die nach der Synchronisation auftretende dritte Oberschwingung ihre Quelle sowohl im Transformator als auch im Labor-Synchrongenerator besitzen. Der Einfluss der Last auf die dritte Oberschwingung kann ausgeschlossen werden, da es sich konkret bei dieser Betrachtung um ein lineares Bauelement handelt und zum anderen durch die Messergebnisse (Abbildung 7.10) bestätigt wird, dass nur ein geringer dritter Oberschwingungsstrom von der Last aufgenommen wird. Die ohmsche Last kann deshalb für die Verursacherermittlung vernachlässigt werden.

Damit die dritte Oberschwingung berechnet werden kann, erfolgt eine Messung der Spannung im Leerlauf. Die Leerlaufmessung wird sowohl für den Transformator als auch für den Labor-Synchrongenerator durchgeführt. Dadurch werden die Ersatzspannungsquellen für die dritte Oberschwingung amplitudenmäßig ermittelt. Die Messergebnisse der Leerlaufmessung sind in Tabelle 7.26 dargestellt.

Tabelle 7.26: Dritte Oberschwingungsspannungen der Leerlaufmessung, Transformator, Labor-Synchrongenerator

	Transformator 3. OS	Labor- Synchrongenerator 3.OS
	Spannung	Spannung
	V	V
L1	0,3	7
L2	0,2	7
L3	0,5	6
PEN	-	-

Zusätzlich zu den Ersatzspannungsquellen für die dritte Oberschwingung werden die Nullimpedanzen des Generators und des Transformators ermittelt.

Der Wert für die Generator-Nullimpedanz z_{SG}^0 in per unit wird für den verwendeten Labor-Synchrongenerator in [32] bestimmt. Daraus errechnet sich nach Gleichung (7.11) die Generator-Nullimpedanz.

$$\underline{Z}_{0,SG,GS,ber} = \frac{z_{SG}^0 \cdot U_n^2}{S_n} = \frac{0,31 \cdot (400 \text{ V})^2}{1000 \text{ VA}} = 49,6 \Omega \quad (7.11)$$

Für die dritte Oberschwingung ergibt sich dann im Wesentlichen die dreifache Impedanz aufgrund der Frequenzabhängigkeit (7.12).

$$\underline{Z}_{0,SG,3.OS,ber} = \underline{Z}_{0,SG,GS,ber} \cdot 3 = 49,6 \Omega \cdot 3 = 148,8 \Omega \quad (7.12)$$

Die Transformator-Nullimpedanz wird nach Gleichung (7.13) für die Grundschwingung berechnet.

$$\underline{Z}_{0,T,GS,ber} = \frac{z_T^0 \cdot U_n^2}{S_n} = \frac{0,7 \cdot 0,05 \cdot (400 \text{ V})^2}{1000 \text{ VA}} = 5,6 \Omega \quad (7.13)$$

Die Transformator-Nullimpedanz für die dritte Oberschwingung berücksichtigt die höhere Frequenz der Impedanz im Vergleich zur Grundschwingung (7.14).

$$\underline{Z}_{0,T,3.OS,ber} = \underline{Z}_{0,T,GS,ber} \cdot 3 = 6,4 \Omega \cdot 3 = 16,8 \Omega \quad (7.14)$$

Man erhält bei Berücksichtigung der Nullimpedanzen und der Oberschwingungsspannungsquellen aus den Leerlaufmessungen das in Abbildung 7.25 gezeigte Ersatzschaltbild. Bei der Spannung $|U_{M,3.OS}|$ handelt es sich um die nach der Synchronisation in MP 1 und MP 2 gemessenen dritten Oberschwingungsspannungen für den Leiter L1 gegen PEN (siehe Tabelle 7.9).

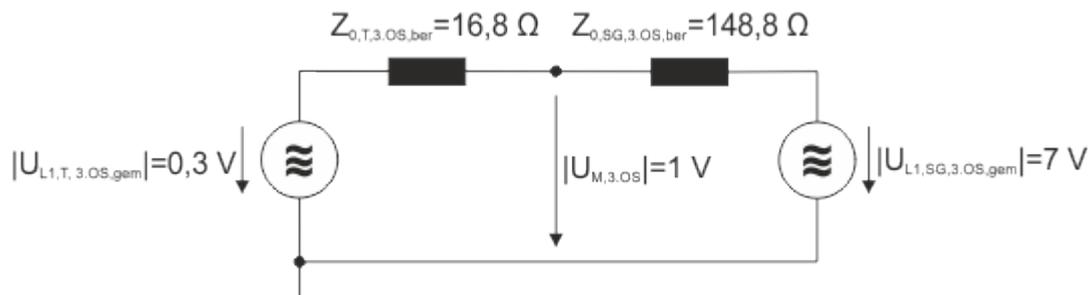


Abbildung 7.25: Ersatzschaltbild zur Ermittlung des Verursachers des dritten Oberschwingungsstromes

Die Spannung $|U_{M,3.OS,ber}|$ kann aus dem Ersatzschaltbild errechnet werden (Gleichung (7.16)) und bestätigt damit die Messung der Spannung $|U_{M,3.OS,gem}|$ (siehe Tabelle 7.9).

Die Berechnung der Gleichung (7.16) erfolgt unter der versuchsweisen Annahme, dass die Winkeldifferenz der beiden dritten Oberschwingungsspannungsquellen null ist (Gleichung (7.15)):

$$\angle \underline{U}_{L1,T,3.OS} = \angle \underline{U}_{L1,SG,3.OS} \quad (7.15)$$

$$\begin{aligned} |\underline{U}_{M,3.OS,ber}| &= \left| \underline{U}_{L1,T,3.OS,gem} + \frac{\underline{U}_{L1,SG,3.OS,gem} - \underline{U}_{L1,T,3.OS,gem}}{\underline{Z}_{0,T,3.OS,ber} + \underline{Z}_{0,SG,3.OS,ber}} \cdot \underline{Z}_{0,T,3.OS,ber} \right| = \quad (7.16) \\ &= \left| 0,3 \text{ V} + \frac{7 \text{ V} - 0,3 \text{ V}}{148,8 \, \Omega + 16,8 \, \Omega} \cdot 16,8 \, \Omega \right| = 1 \text{ V} \end{aligned}$$

Die Stimmigkeit des Messergebnisses (1 V) rechtfertigt die Annahme.

In einer genaueren Analyse wird nun die Auswirkung einer Winkeldifferenz zwischen den beiden dritten Oberschwingungsspannungsquellen untersucht. Dazu wird der Winkel der Transformator-Ersatzspannungsquelle $\underline{U}_{L1,T,3.OS,gem}$ mit 0° definiert. Der Winkel φ der Labor-Synchrongenerator-Ersatzspannungsquelle $\underline{U}_{L1,SG,3.OS,gem}$ wird zwischen 0° und 180° variiert. Für verschiedene Winkel wird dann die Spannung $\underline{U}_{M,3.OS,ber}(\varphi)$ nach Gleichung (7.17) berechnet.

$$\begin{aligned} |\underline{U}_{M,3.OS,ber}(\varphi)| &= f(\varphi) = \\ &= \left| \underline{U}_{L1,T,3.OS,gem}(0^\circ) + \frac{\underline{U}_{L1,SG,3.OS,gem}(\varphi) - \underline{U}_{L1,T,3.OS,gem}(0^\circ)}{\underline{Z}_{0,T,3.OS,ber} + \underline{Z}_{0,SG,3.OS,ber}} \cdot \underline{Z}_{0,T,3.OS,ber} \right| \quad (7.17) \end{aligned}$$

Bis zu einer Winkeldifferenz von $\varphi \leq \pm 52^\circ$ bleibt die berechnete Spannung $|\underline{U}_{M,3.OS,ber}(\varphi)|$ innerhalb eines Messtoleranzbereiches von $|\underline{U}_{M,3.OS,gem}| - 10 \%$.

Die Serienschaltung des Labor-Synchrongenerators, bestehend aus dritter Oberschwingungsspannungsquelle und Generatornullimpedanz, kann als Stromquelle betrachtet werden, welche den dritten Oberschwingungsstrom in der untersuchten Messkonstellation maßgeblich verursacht. Der restliche Anteil der dritten Oberschwingungsströme wird vom Transformator verursacht.

Steigt die am Transformator angelegte Spannung über die Nennspannung hinaus, so geht dieser zu einem bestimmten Zeitpunkt in Sättigung. Im Bereich vor der Sättigung ist der Zusammenhang von Strom und Spannung linear. Erhöht man die Spannung über den Punkt

der Sättigung hinaus steigt der Strom (Oberschwingungsstrom) stark an, dieser Zusammenhang ist nichtlinear.

Der Transformator kann also im nichtlinearen Bereich als spannungsgesteuerte Oberschwingungsstromquelle betrachtet werden, welcher bei Sättigungserscheinungen Oberschwingungen generiert.

7.4 Messung im Labor – Inselnetzwechselrichter

7.4.1 Messkonzept

Als dezentrale Energieerzeugungsanlage dient ein 1-phasiger Inselnetzwechselrichter vom Typ SUNNY ISLAND 5048 [34]. An die DC-Seite des Inselnetzwechselrichter sind vier Stück Batterien (in Serie geschaltet) vom Typ FirstPower LFP12250 [35] angeschlossen. Diese dienen im Falle eines Netzausfalles bzw. im gewünschten Inselnetzbetrieb als DC-Stromquelle, über welche die Last versorgt wird. Der Inselnetzwechselrichter besitzt zwei separate AC-Anschlüsse. Der erste (AC1 Loads/SunnyBoys) dient für den Anschluss der inselnetzversorgten Last und zum Einspeisen von anderen dezentralen Erzeugungsanlagen im Inselnetz. Der zweite (AC2 Gen/Grid) dient netzseitig zum Anschluss des Niederspannungs-Verteilernetzes.

An den ersten, den AC1-Anschluss, ist ein Solarwechselrichter vom Typ SUNNY BOY 1200 [36] angeschlossen. Der Solarwechselrichter wird DC-seitig von drei in Serie geschalteten Gleichstromquellen versorgt. Mit Hilfe dieser Gleichstromquelle wird eine mögliche Photovoltaikanlage simuliert.

Abbildung 7.26 zeigt das Messkonzept der Messung Inselnetzwechselrichter:

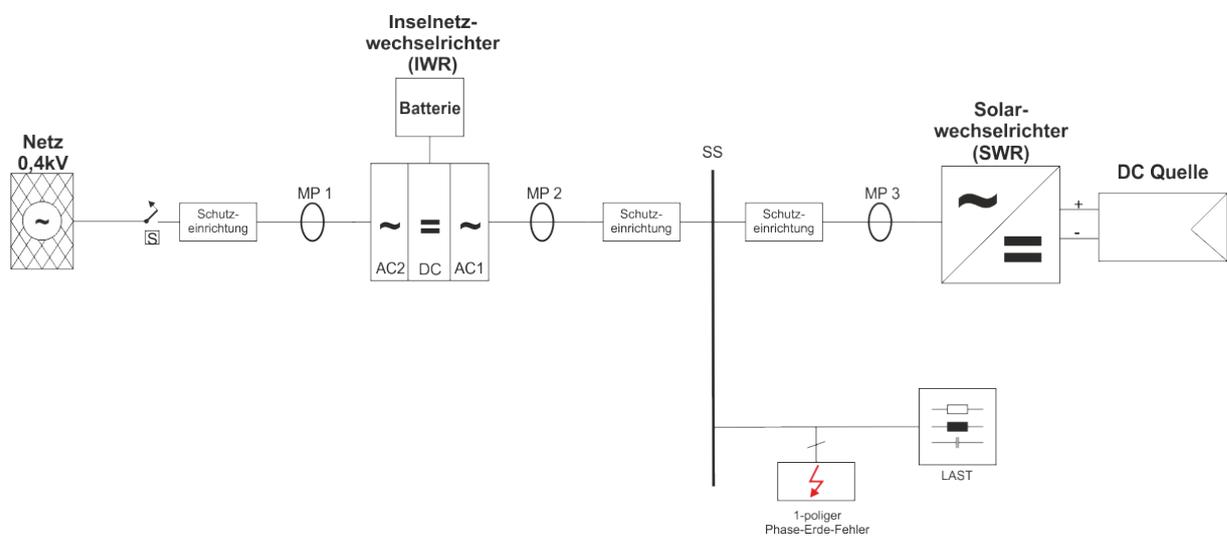


Abbildung 7.26: Einlinienersatzschaltbild Messkonzept Inselnetzwechselrichter,
MP...Messpunkt, SS...Sammelschiene

Um die Ströme und Spannungen im Messaufbau bestimmen zu können, werden drei Messpunkte definiert.

MP 1: Netz (Netz)

MP 2: Inselnetzwechselrichter (IWR)

MP 3: Solarwechselrichter (SWR)

In jedem dieser Messpunkte erfolgen zwei Strommessungen (IL1 und IN) und eine Spannungsmessung (L1-N).

Gemessen werden das Verhalten und die Ausbreitung der dritten Oberschwingung im Phasenleiter und im Neutralleiter. Dazu werden verschiedene Messszenarien definiert, um unterschiedliche Betriebszustände des Messaufbaus abdecken zu können. Folgende Betriebszustände werden erfasst:

1. Inselnetzbetrieb, Versorgung der Last durch die Batterien
2. Inselnetzbetrieb, Versorgung der Last durch Batterien + Solarwechselrichter
3. Netzparallelbetrieb, Laden der Batterie
4. Netzparallelbetrieb, Speisen der Last durch das Netz
5. Netzparallelbetrieb, Versorgung einer 0,2 kW Last, Batterien sind vollständig geladen, Überschusseinspeisung durch den Solarwechselrichter
6. Inselnetzbetrieb, 1-poliger Kurzschluss gegen Erde

7.4.2 Messaufbau

Für den Messaufbau und die genaue Bezeichnung der verwendeten Messgeräte sei an dieser Stelle auf den Anhang 12.3 dieser Arbeit verwiesen.

7.4.3 Messauswertung

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Einflussgrößen werden verschiedene Messszenarien definiert, um einen Großteil der möglichen Betriebszustände des zu messenden Systems abzudecken.

In den Szenarien werden die einzelne Betriebszustände des Inselnetzwechselrichters betrachtet und die Auswertung der Ströme und Spannungen der dritten Oberschwingung durchgeführt. Folgende Messszenarien werden ausgeführt:

- Messung mit einem 5 kW bzw. 2 kW Heizlüfter als Last
- Messung mit einer 0,2 kW Glühbirne als Last
- Messung mit einer 0,2 kW Glühbirne als Last – Kurzschlussversuch

In Bezug auf die angewandte Phasenkorrektur wird hier auf die Messung Labor-Synchrongenerator verwiesen (siehe Kapitel: 7.3.3.1). Diese erfolgt analog in der Messung Inselnetzwechselrichter.

7.4.4 Ergebnisse - Inselnetzwechselrichter

Die Ergebnisse werden in die einzelnen zu messenden Betriebszustände unterteilt und gemäß Ausbreitung und Verlauf der dritten Oberschwingung ausgewertet.

Der Inselnetzwechselrichter startet immer im Inselnetzbetrieb. Liegt an der Inselnetzseite (AC1) ein Verbraucher an, wird dieser von den Batterien versorgt (Energieflussrichtung im Inselnetzwechselrichter von DC auf AC1).

Ist der Solarwechselrichter auf der AC1-Seite angeschlossen, erkennt dieser die vom Inselnetzwechselrichter erzeugte Netzspannung und beginnt seinen Synchronisiervorgang (DC-seitig muss am Solarwechselrichter mindestens eine Gleichspannung von 120 V anliegen). Nach Abschluss des Synchronisiervorganges speist der Solarwechselrichter aus der DC-Quelle in das Inselnetz ein. Die eingespeiste Leistung des Solarwechselrichters ist von der DC-Quelle abhängig und wird durch diese limitiert. Bei einer DC-Nennspannung von 150 V können in etwa 700 W von der DC-Quelle geliefert werden.

Die vom Solarwechselrichter erzeugte Leistung hat drei Möglichkeiten der Energieaufteilung, je nach Betriebszustand des Systems. Erstens: Die gesamte Energie geht in die Last und die Batterien werden um diesen Betrag der Einspeisung entlastet. Zweitens: Die Leistungsaufnahme der Last ist geringer als die Erzeugung vom Solarwechselrichter und die überschüssige Energie wird zum Laden der Batterien verwendet. Drittens: Im Netzparallelbetrieb mit geringer Last und vollständig geladenen Batterien erfolgt eine Überschusseinspeisung in das Netz.

Die Synchronisation mit dem Netz erfolgt vollautomatisch durch den Inselnetzwechselrichter. Nach der Synchronisation, also im Netzparallelbetrieb, wird die AC1-Seite auf die AC2-Seite vom Inselnetzwechselrichter durchgeschaltet, die Last wird nun aus dem Netz gespeist. Eine nicht vollständig geladene Batterie wird über das Netz geladen, anschließend erfolgt die Ladungserhaltung.

7.4.4.1 IWR – Inselnetzbetrieb – Batteriebetrieb

Im Batteriebetrieb wandelt der Inselnetzwechselrichter (IWR) den Strom aus den Batterien (DC-Seite) in Wechselstrom (AC1-Seite) um und versorgt damit die Last. Die Last besteht aus der Heizwicklung eines Heizlüfters und kann über einen Stufenschalter eingestellt werden. Die Stufe 5 hat eine Nennleistung von 5 kW. Der Ventilator des Heizlüfters wird extern (außerhalb des Messaufbaues) versorgt (Abbildung 7.27).

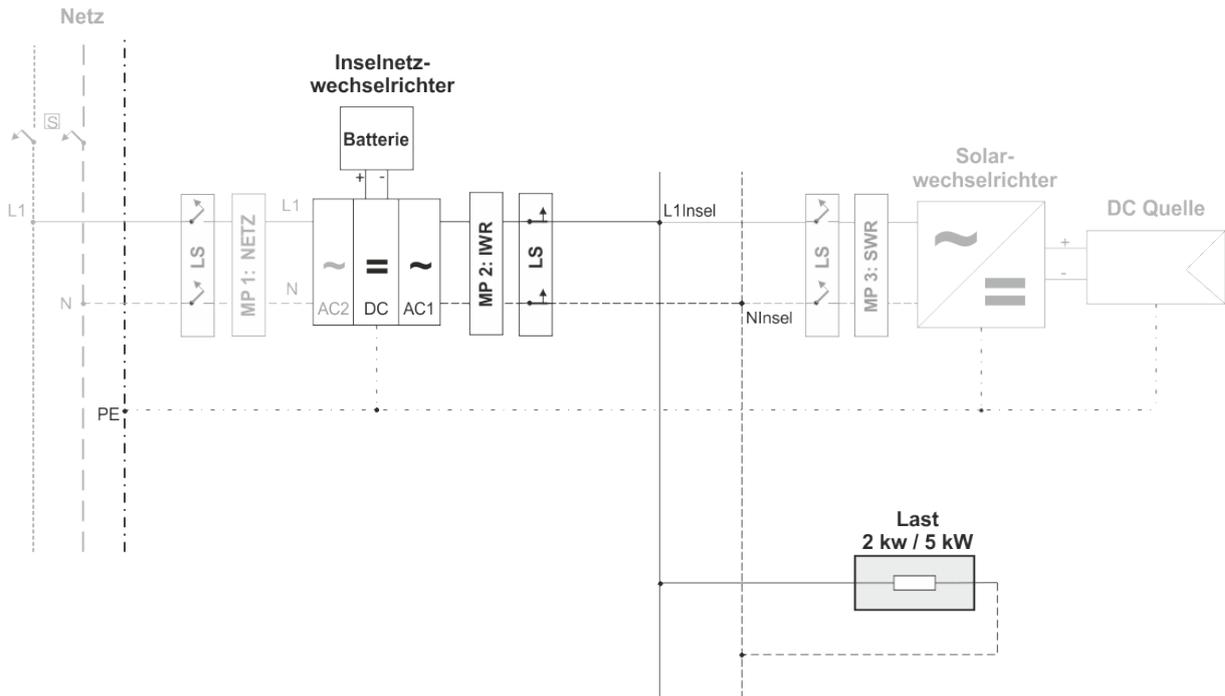


Abbildung 7.27: Inselnetzbetrieb, Last wird von Batterien gespeist

Im Batteriebetrieb ist nur der Messpunkt Inselnetzwechselrichter (MP 2) aktiv. Die Neutralleiterstrom-Messung dient zur Kontrolle. Diese muss stets denselben Wert wie der jeweilige Phasenleiterstrom ergeben. Tabelle 7.27 und Tabelle 7.28 zeigen die gemessenen Ströme für eine Belastung mit 5 kW bzw. mit 2 kW.

Tabelle 7.27: Messung Batteriebetrieb, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2), Last Stufe 5 (5 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 100 %

	MP 2: IWR GS				MP 2: IWR 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	mA	°	V	°
L1	20,68	0,7	227,3	0,0	278	2,2	3,1	-1,3
N	20,65	0,6	-	-	277	2,5	-	-

Tabelle 7.28: Messung Batteriebetrieb, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2), Last Stufe 2 (2 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 100 %

	MP 2: IWR GS				MP2: IWR 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	mA	°	V	°
L1	8,37	0,6	229,4	0,0	116	14,9	3,3	11,3
N	8,36	0,7	-	-	118	15,3	-	-

Ein dritter Versuch (Tabelle 7.29) misst die Ströme und Spannungen der dritten Oberschwingung bei 35 % Ladezustand der Batterie und einer Last von 2 kW. Im Vergleich

zum Ladezustand 100 % ergibt sich keine Veränderung. Die Höhe und Verteilung der Ströme bleibt dieselbe.

Tabelle 7.29: Messung **Batteriebetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2), Last Stufe 2 (2 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 35 %

	MP 2: IWR GS				MP 2: IWR 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	mA	°	V	°
L1	8,35	0,6	229,4	0,0	109	13,5	3,1	10,8
N	8,36	0,7	-	-	112	16,8	-	-

7.4.4.2 IWR – Inselnetzbetrieb über Batterien und zusätzlichem Solarwechselrichter

Im Batteriebetrieb erkennt der Solarwechselrichter (SWR) auf seiner Wechselspannungsseite das Inselnetz. Da an der Gleichspannungsseite die DC-Quelle anliegt, beginnt der Solarwechselrichter (SWR) mit seinem Synchronisiervorgang. Sind alle Bedingungen erfüllt, wird der Solarwechselrichter (SWR) zugeschaltet. Nun erfolgt eine Unterstützung des Batteriebetriebes, wodurch ein Teil der Last durch den Solarwechselrichter (SWR) gespeist wird. Abbildung 7.28 zeigt den Inselnetzbetrieb mit zusätzlichem Solarwechselrichter (SWR).

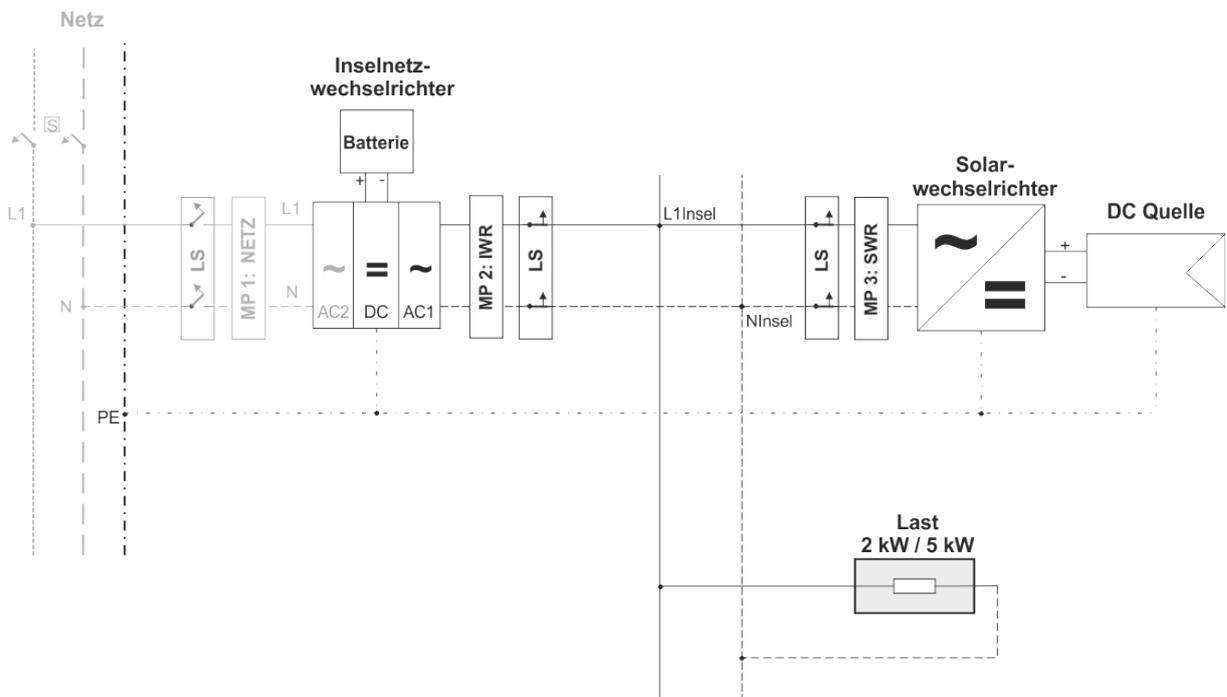


Abbildung 7.28: Inselnetzbetrieb, Speisung der Last durch Batterien und Solarwechselrichter

Da dies ein Inselnetzbetrieb mit zusätzlicher dezentraler Lastspeisung ist, sind die Messpunkte Inselnetzwechselrichter (MP 2) und Solarwechselrichter (MP 3) aktiv. Die Messung wird mit einer 5 kW Last (Tabelle 7.30) und einer 2 kW Last (Tabelle 7.31) durchgeführt.

Tabelle 7.30: Messung **Batterie- und Solarwechselrichterbetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2) und SWR (MP 3), Last Stufe 5 (5 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 100 %

		GS				3.OS			
		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
		A	°	V	°	mA	°	V	°
MP 2:	L1	17,23	0,6	228,9	0,0	294	3,5	2,7	-1,8
	IWR	N	17,21	0,7	-	-	290	2,8	-
MP 3:	L1	3,42	0,7	227,8	0,0	46	-167,3	2,7	-1,8
	SWR	N	3,44	1,1	-	-	42	-172,9	-

Tabelle 7.31: Messung **Batterie- und Solarwechselrichterbetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2) und SWR (MP 3), Last Stufe 2 (2 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 100 %

		GS				3.OS			
		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
		A	°	V	°	mA	°	V	°
MP 2:	L1	4,99	0,9	229,7	0,0	161	23,1	3,1	16,4
	IWR	N	4,99	1,0	-	-	165	22,9	-
MP 3:	L1	3,37	0,4	229,4	0,0	43	-144,9	3,1	16,4
	SWR	N	3,38	0,9	-	-	40	-142,3	-

Durch die Synchronisation des Solarwechselrichters erhöht sich der dritte Oberschwingungsstrom im Messpunkt Inselnetzwechselrichter (MP 2) um den Betrag, der durch die Synchronisation des Solarwechselrichters (MP 3) zusätzlich entsteht.

Außerdem wird ein Versuch mit entladener Batterie durchgeführt (Tabelle 7.32). Die Last beträgt dabei 2 kW. Es können keine Veränderungen im Vergleich zur Messung mit vollständig geladener Batterie festgestellt werden.

Tabelle 7.32: Messung **Batterie- und Solarwechselrichterbetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt IWR (MP 2) und SWR (MP 3), Last Stufe 2 (2 kW), Ladezustand der Batterie bei etwa 35 %

		GS				3.OS			
		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
		A	°	V	°	mA	°	V	°
MP 2: IWR	L1	4,98	1,0	229,7	0,0	146	19,6	2,8	15,4
	N	5,02	1,2	-	-	159	19,7	-	-
MP 3: SWR	L1	3,36	-0,1	229,4	0,0	49	-158,8	2,8	15,4
	N	3,38	0,4	-	-	36	-160,7	-	-

7.4.4.3 IWR – Netzparallelbetrieb, Laden der Batterien

Steht genug Energie zum Speisen der Lasten des Inselnetzes von extern (Solarwechselrichter bzw. Netz) zur Verfügung, ist der Inselnetzwechselrichter bestrebt, seine Batterien zu laden bzw. im vollgeladenen Zustand die Ladung zu erhalten. Zum Vorgang der Laderegulierung sei hier auf das Handbuch des verwendeten Inselnetzwechselrichters SUNNY ISLAND 5048 verwiesen [34].

Im gemessenen Szenario wird die Heizwicklung eines Heizlüfters als Last verwendet. Diese kann stufenweise geschaltet werden, es wird die Stufe 2 (2 kW) verwendet. Im Inselnetzbetrieb wird diese Last aus der Batterie und vom Solarwechselrichter versorgt. Zum Zeitpunkt der Netzsynchronisation wird die Netzseite (AC2) auf die Inselnetzseite (AC1) durchgeschaltet. Das Netz übernimmt den Anteil des Batteriestromes der die Last versorgt, wobei zusätzlich Netzstrom in die Batterie fließt und diese lädt. Der Messaufbau Netzparallelbetrieb mit Laden der Batterie ist in Abbildung 7.29 dargestellt.

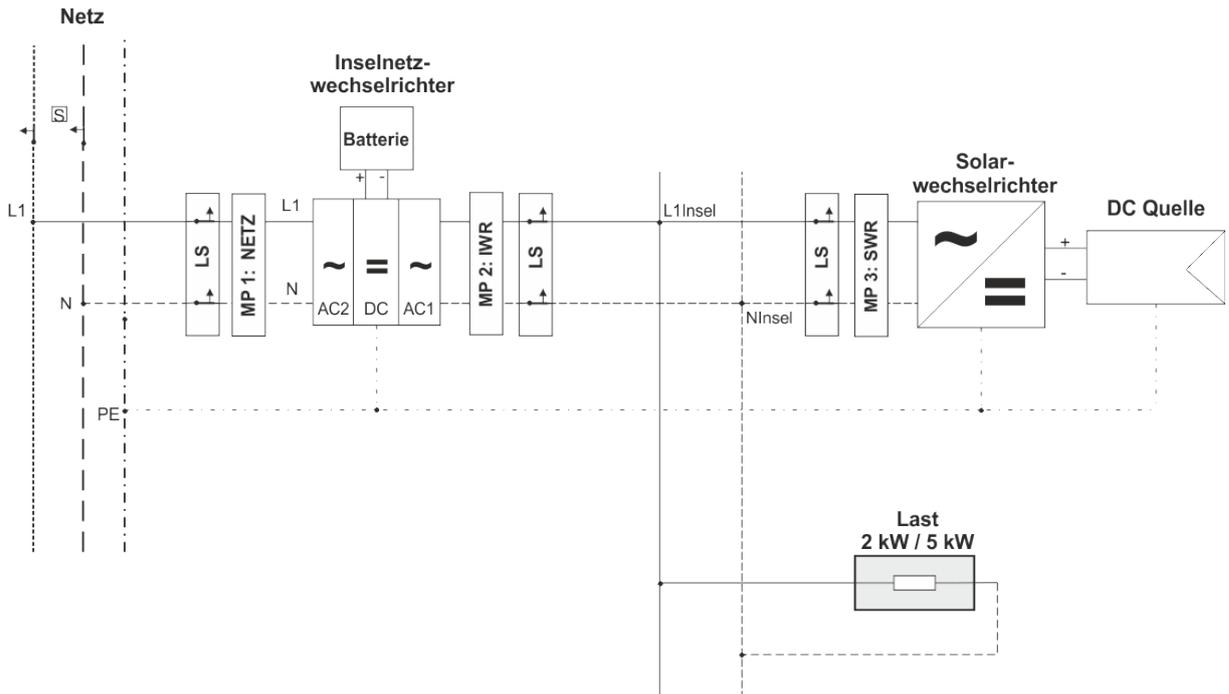


Abbildung 7.29: Netzparallelbetrieb, Last wird vom Netz und vom Solarwechselrichter gespeist, die Batterie wird geladen

Nach der Zuschaltung des Netzes sind alle drei Messpunkte aktiv. Die Strommessungen in den jeweiligen Neutralleitern dienen wie zuvor der Kontrolle.

Wird anstelle der Stufe 2 (2 kW) die Stufe 5 (5 kW) des Heizlüfters benutzt, so kommt es zu keiner Ladung der Batterien. Dies wird mit dem maximalen Strom, der vom Inselnetzwechselrichter netzseitig aufgenommen wird begründet. Der netzseitige Strom ist mit 16 A beschränkt (siehe Betriebsanleitung SUNNY ISLAND 5048 [34]). Die Last nimmt aber einen Strom von ca. 21 A auf (5 kW Last). Von Seiten des Netzes wird daher zu wenig geliefert um sowohl die Last zu versorgen als auch die Batterie zu laden.

Tabelle 7.33: Messung **Netzparallelbetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsstrom im Messpunkt NETZ (MP 1), IWR (MP 2) und SWR (MP 3), Last Stufe 2 (2 kW), Batterie wird geladen

		GS				3.OS			
		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
		A	°	V	°	mA	°	V	°
MP 1: NETZ	L1	11.03	8,4	219,5	0,0	366	-0,6	1,5	-172,0
	N	11,04	8,6	-	-	365	-0,4	-	-
MP 2: IWR	L1	4,41	1,7	218,5	0,0	22	-146,3	1,5	-172,0
	N	4,41	2,0	-	-	16	-144,8	-	-
MP3: SWR	L1	3,58	-0,5	218,2	0,0	34	176,2	1,5	-172,1
	N	3,60	-0,2	-	-	35	154,9	-	-

Aus Abbildung 7.30 ist ersichtlich, dass die Zuschaltung in den Netzparallelbetrieb (AC2 wird strombegrenzt auf AC1 durchgeschaltet) im Messpunkt Netz (MP 1) einen dritten Oberschwingungs-Stromfluss bewirkt (blaue Kurve). Auf der Inselnetzseite (AC1) im Messpunkt IWR (MP 2) sinkt der Betrag der dritten Oberschwingung zum Zeitpunkt der Synchronisation (grüne Kurve). Der dritte Oberschwingungsstrom über den Messpunkt SWR (MP 3) bleibt über die Messdauer konstant (rote Kurve). Die Synchronisation bewirkt also einen Anstieg des dritten Oberschwingungsstromes auf der Netzseite hingegen ein Absinken auf der Inselnetzseite.

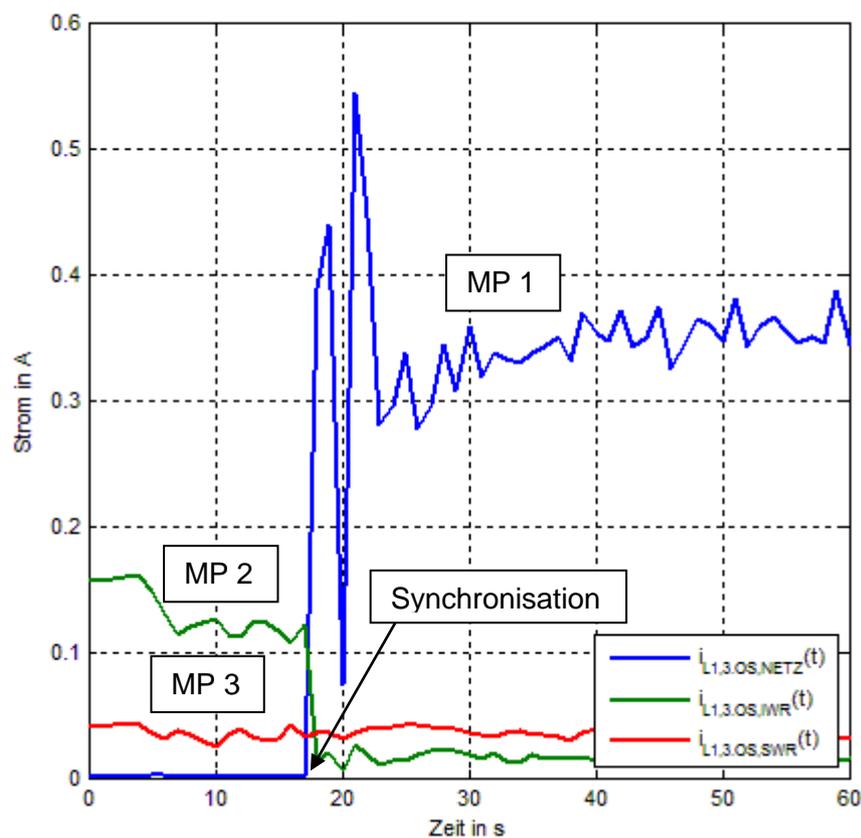


Abbildung 7.30: Zeitlicher Verlauf der Ströme der dritten Oberschwingung der Messpunkte Netz (blau, MP 1), IWR (grün, MP 2) und WR (rot, MP 3) während der Zuschaltung des Netzes

7.4.4.4 IWR – Netzparallelbetrieb, Überschusseinspeisung

Wenn man die Inselnetzseite mit einer geringeren Last (200 W Glühbirne) belastet, sodass diese geringer ist als die vom Solarwechselrichter erzeugte Leistung, wird die überschüssige Energie des Solarwechselrichters in das Netz rückgespeist. Dies geschieht jedoch erst nachdem die Batterie vollständig geladen ist und im Inselnetzwechselrichter SUNNY ISLAND 5048 der Parameter „232,08 GdMod“ auf „GridFeed“ gestellt ist.

Tabelle 7.34: Messung **Netzparallelbetrieb**, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsströme im Messpunkt NETZ (MP 1), IWR (MP 2) und SWR (MP 3), 0,2 kW Last, Überschuss des Solarwechselrichters wird in das Netz rückgespeist

		GS				3.OS			
		Strom		Spannung		Strom		Spannung	
		A	°	V	°	mA	°	V	°
MP 1: NETZ	L1	2,35	138,1	229,3	0,0	226	107,6	1,3	-144,4
	N	2,35	137,4	-	-	224	108,2	-	-
MP 2: IWR	L1	2,48	178,4	229,7	0,0	39	-12,3	1,4	-143,2
	N	2,45	178,1	-	-	44	-18,9	-	-
MP 3: SWR	L1	3,42	-0,9	229,9	0,0	43	165,8	1,4	-143,4
	N	3,43	-0,4	-	-	39	168,0	-	-

7.4.4.5 IWR – 1-poliger Fehler gegen Erde

Während des Inselnetzbetriebes vom Inselnetzwechselrichter und vom Solarwechselrichter tritt ein 1-poliger Fehler gegen Erde auf. Es fließen hohe Kurzschlussströme, die von beiden Erzeugungsanlagen getrieben werden.

Der in Abbildung 7.31 rot eingezeichnete Kurzschlussstrompfad wird vom Inselnetzwechselrichter eingepägt. Grün ist der Kurzschlussstrompfad des Solarwechselrichters markiert. Er kann jedoch nicht messtechnisch erfasst werden, da das Inselnetz im Augenblick des Kurzschlusses stark vom Normalbetrieb abweicht und dadurch der Solarwechselrichter eine Trennung vom Netz vollzieht.

Wichtig ist, um die Funktion des FI-Schalters zu gewährleisten, muss eine leitende Verbindung zwischen Neutralleiter der AC1-Seite und PE bestehen. Andernfalls würde der Fehlerstromschutzschalter im Fehlerfall nicht auslösen.

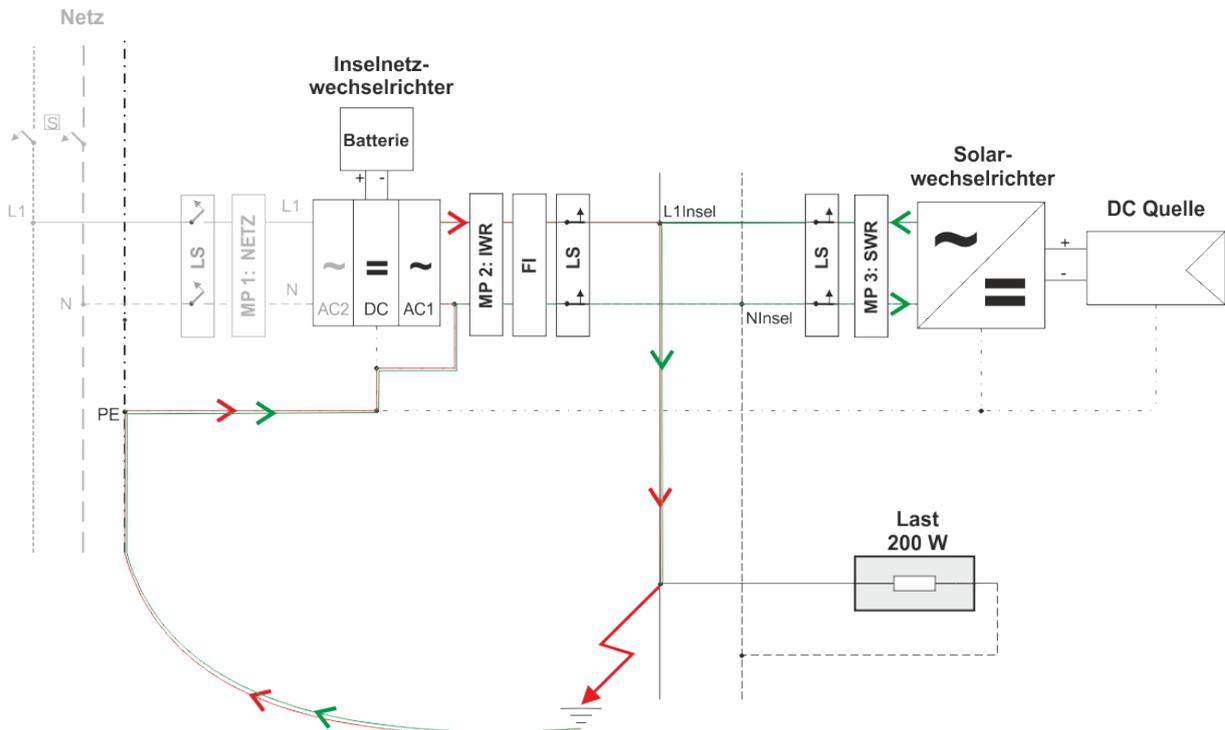


Abbildung 7.31: Inselnetzbetrieb, 1-poliger Fehler gegen Erde

Setzt man den im Handbuch des Inselnetzwechselrichters SUNNY ISLAND 5048 [34] beschriebenen Leitungsschutz ein (max.: 16 A, Auslösecharakteristik B), so ist ein Klären eines Fehlers möglich. Der Fehler wird unverzüglich abgeschaltet, da der Inselnetzwechselrichter genug Kurzschlussstrom bereitstellen kann.

Da in dieser Arbeit das Messen der dritten Oberschwingung von Interesse ist, muss eine Möglichkeit gefunden werden, um den Kurzschluss über längere Zeit aufrecht zu erhalten, damit genügend Messpunkte für die Fensterung vorhanden sind (siehe 5.4.1 Fensterung).

Dies geschieht durch die Wahl eines Leitungsschalters mit anderer Auslösecharakteristik. Gewählt wird ein Leistungsschalter mit Auslösecharakteristik C, 25 A Auslösestrom. Jedoch muss zusätzlich zu diesem Leitungsschalter eine manuelle Abschaltung des Fehlers nach ausreichender Zeit erfolgen, damit keine Überlastung der beteiligten Komponenten entsteht.

Tabelle 7.35: Messung 1-poliger Fehler gegen Erde, Grundschwingungs- und dritter Oberschwingungsströme im Messpunkt IWR WÄHREND des Fehlers, 0,2kW Last

	MP 2: IWR GS				MP 2: IWR 3.OS			
	Strom		Spannung		Strom		Spannung	
	A	°	V	°	mA	°	V	°
L1	50,61	-0,6	7,2	0,0	7500	10,5	1,1	12,5
N	50,67	-0,5	-	-	7566	10,9	-	-

Die Messung erfolgt nur im Messpunkt Inselnetzwechselrichter (MP 2), da der Messpunkt Solarwechselrichter (MP 3) sofort nach Fehlereintritt aufgrund von fehlender Spannungsvorgabe durch den Inselnetzwechselrichter abschaltet.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der dritten Oberschwingung im Messpunkt Inselnetzwechselrichter (MP 2) vor, während und nach dem Kurzschluss wie in Abbildung 7.32 dargestellt ist, so ist ein erheblicher Anstieg der dritten Oberschwingung während des Kurzschlusses erkennbar.

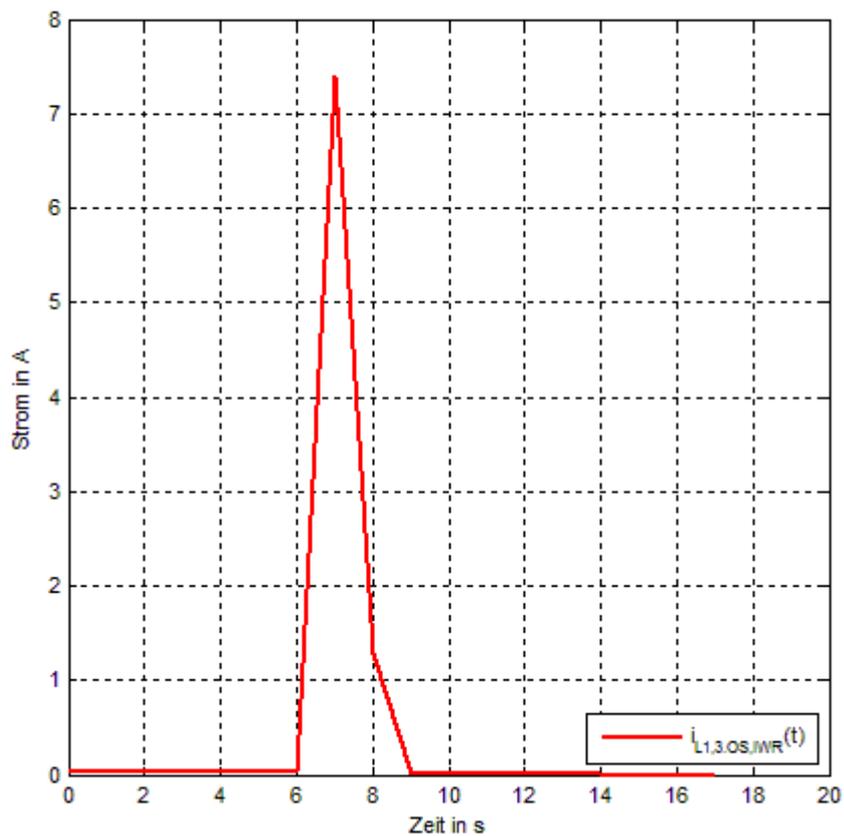


Abbildung 7.32: Zeitlicher Verlauf des Inselnetzwechselrichter-Kurzschlussstromes

8 Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse

Das Ziel der gegenständlichen Untersuchung ist es, eine möglichst umfassende Ermittlung bzw. Bestimmung der dritten Oberschwingung von dezentralen Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz durchzuführen. Diese wird mit Hilfe der Messungen

- Notstromgenerator,
- Labor-Synchrongenerator und
- Inselnetzwechselrichter

untersucht. Zusätzlich wird der Synchrongenerator (Notstromgenerator, Labor-Synchrongenerator) als dezentrale Erzeugungsanlage rechnerisch erfasst. Aus den Messergebnissen und den begleitenden Berechnungen leiten sich mehrere komplexe Fragestellungen ab, die im Folgenden beantwortet werden.

- Wie beeinflusst der Typ der dezentralen Energieerzeugungsanlage die dritte Oberschwingung?
- Welchen Einfluss hat die Last als Oberschwingungserzeuger?
- Welche Auswirkungen hat ein 1-poliger Kurzschluss gegen Erde auf die dritte Oberschwingung?

8.1 Einfluss des Typs der dezentralen Energieerzeugungsanlage auf die dritte Oberschwingung

Konkret werden zwei Arten dezentraler Erzeugungsanlagen betrachtet, der Synchrongenerator (Notstromgenerator, Labor-Synchrongenerator) und der Wechselrichter (Inselnetzwechselrichter, Solarwechselrichter).

- **Synchrongenerator**

Die stromerzeugende Einheit der Messung Notstromgenerator stellt ebenfalls wie im Laboraufbau einen Synchrongenerator dar. Der Notstromgenerator besitzt im Gegensatz zum Labor-Synchrongenerator eine um den Faktor 65 größere Leistung. Der dritte Oberschwingungsstrom, welcher nach dem Zuschalten (Synchronisation) im Netzparallelbetrieb über den Synchrongenerator (Notstromgenerator, Labor-Synchrongenerator) fließt, ist von der Größe des im Einsatz befindlichen Synchrongenerators abhängig.

- **Wechselrichter**

Der dritte Oberschwingungsstrom ist stark vom Stromrichterkonzept des Wechselrichters und dessen Halbleiterbauelementen abhängig. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Geräte und Hersteller mit stark unterschiedlichen Konzepten kann in dieser Arbeit nur das Oberschwingungsverhalten der verwendeten Wechselrichter untersucht und bestimmt werden. In der gemessenen Konstellation Inselnetzwechselrichter und Solarwechselrichter hängt die Größe und Richtung des dritten Oberschwingungsstromes vom Betriebszustand dieser Geräte ab. Beispielsweise fließt über den Solarwechselrichter ein konstanter dritter Oberschwingungsstrom, über den Inselnetzwechselrichter ist der dritte Oberschwingungsstrom von dessen Betriebsmodus (Batterie laden, Netzparallelbetrieb, etc.) abhängig.

8.2 Einfluss der Last auf die dritte Oberschwingung

Während der Messung mit dem Notstromgenerator sind im Gegensatz zur Messung im Labor die angeschlossenen Verbraucher unbekannt, somit sind die einzelnen Oberschwingungserzeuger nicht im Detail bekannt, und es kann nur das resultierende Signal bewertet werden.

Die in den Verbrauchern erzeugten Oberschwingungen können im Falle der Labor-Synchrongenerator Messungen im Netzparallelbetrieb zum Zeitpunkt vor der Synchronisation bestimmt werden. Bei ohmschen Widerständen, Induktivitäten bzw. Kapazitäten handelt es sich um Bauteile mit einem linearen Verhalten in Bezug auf die Strom- und Spannungsaufnahme. Deshalb tritt kein dritter Oberschwingungsstrom über die besagten Bauteile bei sinusförmiger Anspeisung auf. Die Spule der gemessenen ohmsch-induktiven Last geht jedoch sofort in Sättigung. In diesem Zustand erfolgt der Stromfluss in der Spule nicht mehr linear, es entstehen Oberschwingungsströme. Die in Sättigung betriebene Induktivität kann als spannungsgesteuerte Oberschwingungsstromquelle betrachtet werden.

Eine unsymmetrische Belastung, wie sie auch bei der Messung mit dem Notstromgenerator vorgefunden wurde, beeinflusst die dritte Oberschwingung von Synchrongeneratoren nicht. Um dies zu beweisen wurde die Unsymmetrie aus ohmschen Widerständen gebildet. Als lineare Elemente erzeugen diese keinen Oberschwingungsstrom, er wäre also nur von der Unsymmetrie abhängig. Jedoch erzeugt eine unsymmetrische Belastung hohe Gegensystem-Komponenten, welche wiederum hohe Ströme im Neutralleiter und dahingehend höhere Verluste verursachen [24].

Der Labor-Synchrongenerator im Inselnetzbetrieb versorgt die im Inselnetz befindlichen Lasten. Da der Verteilernetztransformator abgetrennt ist, kann der dritte Oberschwingungsstrom aus dem Labor-Synchrongenerator nur über die Last fließen. Es kommt dabei nicht nur zu einem Anstieg der dritten Oberschwingungsströme, sondern primär

auch zu einem Anstieg der dritten Oberschwingungsspannungen. Diese lassen sich jedoch auf die Spannungserzeugung im drehzahlgeregelten Betrieb der verwendeten Laboreinrichtung zurückführen. Der Labor-Synchrongenerator erzeugt hier als Slackgenerator (im Netzparallelbetrieb stellt das Netz den Slack dar) kein reines Sinussignal. Die Abweichung von der reinen Sinusform führt zur Entstehung der Oberschwingungsspannungen.

Bei der Wechselrichtermessung zeigt sich ein ähnliches Verhalten im Batteriebetrieb. Die dritte Oberschwingung kann sich nur über die ohmsche Last ausbreiten, auch hier erhöhen sich die Oberschwingungsspannungen. Außerdem ist ein Zusammenhang eines steigenden dritten Oberschwingungsstromes bei steigender Belastung des Inselnetzes erkennbar. Da der erzeugte Oberschwingungsstrom des Solarwechselrichters konstant bleibt (Einspeiseleistung und somit Einspeisestrom bleiben nach der Synchronisation konstant), verändert sich der dritte Oberschwingungsstrom proportional mit dem Inselnetzwechselrichterstrom.

8.3 Auswirkung des 1-poligen Fehlers gegen Erde auf die dritte Oberschwingung

Der Labor-Synchrongenerator treibt im Kurzschlussfall einen Strom von ca. 2,7 A (50 Hz Grundschiwingung) über die fehlerbehaftete Phase. Dabei handelt es sich um den stationären Kurzschlussstrom. Während des Verlaufs der dritten Oberschwingung beim Kurzschlussversuch des mit dem PEN-Leiter verbundenen Labor-Synchrongeneratorsternpunktes, erhöht sich der dritte Oberschwingungsstrom im Sternpunkt des Labor-Synchrongenerators bei Kurzschluss bis auf etwa das Doppelte seines normalen Betrages (von 44 mA auf 85 mA). Wenn der Labor-Synchrongeneratorsternpunkt zusätzlich zum PEN-Leiter mit Erde verbunden ist, so wird der dritte Oberschwingungsstrom im Kurzschlussfall nur dann vollständig erfasst, wenn die Messung direkt im Sternpunkt erfolgt (also zwischen Generatorsternpunkt und dessen Erdung). Ansonsten ist der gemessene Sternpunktstrom zusätzlich abhängig vom Verhältnis der Erdwiderstände der beiden Rückstrompfade. Auch bei der Kurzschlussmessung mit geerdetem Sternpunkt ist ein starker Anstieg der dritten Oberschwingung im Vergleich zum Normalbetrieb erkennbar, dieser beträgt in etwa das Doppelte des Wertes vor dem Fehlereintritt.

Aus der technischen Beschreibung des Inselnetzwechselrichters SUNNY ISLAND 5048 [34] wird ein Nennstrom von 21 A ermittelt, für 60 ms darf ein maximaler Strom von 120 A erreicht werden. Die Messung mit dem Inselnetzwechselrichter ergibt einen Kurzschlussstrom von 50,61 A (50 Hz Grundschiwingung). Es handelt sich also um ca. den doppelten Nennstrom, jedoch innerhalb der laut Datenblatt zulässigen maximalen Grenzen. Der Betrag des dritten Oberschwingungsstromes ist 7,5 A. Es kommt zu einem deutlichen Anstieg im Kurzschlussfall. Bezogen auf den Grundschiwingungsanteil ergibt sich ein dritter Oberschwingungsanteil von 14,8 % des Grundschiwingungsstromes im Kurzschlussfall.

9 Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit werden die Verteilung und das Verhalten der dritten Oberschwingung bei vermehrter Einspeisung über dezentrale Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz untersucht. Im Speziellen wird aufgrund normativer Vorgaben auf die Ströme der dritten Oberschwingung im Sternpunkt dieser dezentralen Erzeugungsanlagen eingegangen.

Dazu werden ein Notstromgenerator im Feld sowie ein Labor-Synchrongenerator und Inselnetzwechselrichter im Labor analysiert. In den Labormessungen wird neben dem normalen Betriebszustand auch das Verhalten der dritten Oberschwingung unter Variation der Last und im Falle eines 1-poligen Fehlers gegen Erde untersucht.

Alle Messergebnisse zeigen, dass die dritten Oberschwingungsstrom-Vorgaben der Normen für den Sternpunkt der gemessenen dezentralen Erzeugungsanlagen eingehalten werden. Die in den Messungen gewählte niederohmige Sternpunktterdung ist also ausreichend.

Anhand der Messungen mit dem Labor-Synchrongenerator mit linearer Last ist der Labor-Synchrongenerator als primärer Verursacher der dritten Oberschwingung hervorgegangen. Die Messungen mit nichtlinearer Last (Spule in Sättigung) zeigen, dass sich der Einfluss des Labor-Synchrongenerators zum Einfluss der Last addiert. Die in Sättigung betriebenen Spulen können als spannungsgesteuerte Oberschwingungsstromquellen angesehen werden.

10 Ausblick

Ausgehend von österreichischen, europäischen und internationalen Grid Codes und deren grundsätzlicher Empfehlung, die Synchrongeneratorsternpunkte isoliert zu betreiben, um mögliche negative Einflüsse der dritten Oberschwingung ausschließen zu können, erfordert das vermehrte Aufkommen dezentraler Energieerzeugungsanlagen in den letzten Jahren eine detaillierte Betrachtung dieser Thematik.

Die in der österreichischen TOR D4 [4] beschriebene Sternpunktbehandlung von Synchrongeneratoren wird bei allen Messversuchen eingehalten, da der dritte Oberschwingungsstrom in keinem der durchgeführten Versuche die Grenze von 20 % des Generator-Bemessungsstromes überschreitet. Die gewählte niederohmige Sternpunktbehandlung in den Messungen ist daher zur Einhaltung der in der Norm geforderten Werte ausreichend.

Aufgrund der Abhängigkeit des dritten Oberschwingungsstromes von der Synchrongeneratorenennleistung im Netzparallelbetrieb wäre in einem nächsten Schritt eine leistungsmäßig große dezentrale Erzeugungsanlage zu analysieren und diese Messergebnisse mit den in den Normen beschriebenen Werten zu vergleichen.

Bei den Messungen mit dem Inselnetzwechselrichter sind ebenfalls weitere Untersuchungen sinnvoll. In dieser Arbeit wurden lediglich einphasige Wechselrichter verschiedener Ausführungsform eines Herstellers analysiert. Es gibt jedoch eine Vielzahl verschiedener Konzepte, Typen und Leistungsklassen von Wechselrichtern unterschiedlicher Hersteller am Markt, bei denen die Betrachtung der dritten Oberschwingung im Neutralleiter sinnvoll ist, um eine allgemeine Aussage tätigen zu können, beispielsweise ein dreiphasiger Wechselrichter, welcher mittlerweile von verschiedenen Energieversorgern für Photovoltaikanlagen in Privathaushalten vorgeschrieben ist. In einem solchen dreiphasigen Wechselrichter addieren sich die drei Phasenströme der dritten Oberschwingung (wie aus den Messungen Notstromgenerator bzw. Labor-Synchrongenerator bekannt) im Neutralleiter. Somit wird sich der Einfluss des dritten Oberschwingungsstromes im Neutralleiter des Wechselrichters zu den in dieser Arbeit gemessenen Wechselrichtern unterscheiden.

11 Literatur

- [1] Energie-Control GmbH: "Studie: Dezentrale Erzeugung in Österreich", 2005
- [2] ELWOG 2010, "Gesamte Rechtsvorschrift für Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010, Fassung vom 23.01.2013", Jänner 2013
- [3] L. Fickert: "Vorlesungsskriptum: Dezentrale Energieerzeugung und Kraftwärmekopplung", Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2010
- [4] Energie-Control GmbH, "Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen - Version 2.0", Dezember 2008
- [5] Energie-Control GmbH, "Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen - Version 2.1", September 2013
- [6] Energie-Control GmbH, "Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Hauptabschnitt D2: Richtlinien zur Beurteilung von Netzurückwirkungen", September 2006
- [7] DIN EN 50438 (VDE 0435-901), "Anforderungen für den Anschluss von Klein-Generatoren an das öffentliche Niederspannungsnetz; Deutsche Fassung EN 50438:2007", August 2008
- [8] DIN VDE 0126-1-1, "Selbsttätige Freischaltstelle zwischen einer netzparallelen Eigenerzeugungsanlage und dem öffentlichen Niederspannungsnetz", Mai 2005
- [9] CLC/FprTS 50549-1, "Requirements for generating plants larger than 16 A per phase to be connected in parallel with a low-voltage distribution network", Dezember 2012
- [10] E VDE-AR-N 4105, "Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz", August 2011
- [11] DIN VDE 0100-551, "Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-55: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Andere Betriebsmittel - Abschnitt 551: Niederspannungsstromerzeugungseinrichtungen (IEC 60364-5-55:2001/A2:2008 (Abschnitt 551)); Deutsche Übernahme HD 60364-5-551:2010 + Cor.:2010", Juni 2011
- [12] A. J. Schwab: "Elektroenergiesysteme; Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie", Springer-Verlag; SpringerLink (Online service), Berlin Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-21957-3; 9783642219580
- [13] D. Oeding, B. R. Oswald: "Elektrische Kraftwerke und Netze", Springer-Verlag; SpringerLink (Online service), Berlin Heidelberg, 2011, ISBN: 978-3-642-19245-6; 9783642192463
- [14] J. Schlabbach: "Sternpunktbehandlung", VDE-Verl., Berlin, 2002, ISBN: 3-8007-2705-6; 3-8022-0677-0

- [15] C. L. Fortescue: "METHOD OF SYMMETRICAL CO-ORDINATES APPLIED TO THE SOLUTION OF POLYPHASE NETWORKS", American Institute of Electrical Engineers, Transactions of The, vol. XXXVII, 1918, pp. 1027-1140
- [16] L. Fickert: "Vorlesungsskriptum: Elektrische Energiesysteme 1", Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2008
- [17] B. R. Oswald: "Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit Symmetrischen Komponenten und Raumzeigern", Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009, ISBN: 383480617X, 9783834806178
- [18] K. Heuck, K. Dettmann, D. Schulz: "Elektrische Energieversorgung; Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis", Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; SpringerLink (Online service), Wiesbaden, 2010, ISBN: 978-3-8348-0736-6; 9783834897619
- [19] L. Fickert: "Vorlesungsskriptum: Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme", Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2008
- [20] D. Chapman, "Leitfaden Netzqualität: Oberschwingungen - Ursachen und Auswirkungen", <http://leonardo-web.org/de/emv/anwendungs-leitfaeden/3oberschwingungen/>, 20.05.2013
- [21] G. Höck, "„Dirty Power“ Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher", http://www.gmc-instruments.ch/src/download/dDirty_Power.pdf, 10.10.2013
- [22] ABB Control, "Handbuch der dritten Oberwelle", [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/1016CD3399BD99FFC1256C550026948D/\\$File/THFOP-DE.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/1016CD3399BD99FFC1256C550026948D/$File/THFOP-DE.pdf), 20.05.2013
- [23] DIN EN 61000-3-2, "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2005 + A1:2008 + A2:2009; Deutsche Fassung EN 61000-3-2:2006 + A1:2009 + A2:2009", März 2010
- [24] H. Renner, M. Sakulin: "Vorlesungsskriptum: SPANNUNGSQUALITÄT UND VERSORGUNGSSICHERHEIT", Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2007
- [25] C. Rauscher, V. Janssen, R. Minihold: "Grundlagen der Spektrumanalyse", Rohde & Schwarz GmbH&Co, München, 2000, ISBN: 978-3939837008
- [26] T. Butz: "Fouriertransformation für Fußgänger", Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH; SpringerLink (Online service), Wiesbaden, 2009, ISBN: 978-3-8348-0538-6; 9783834896094
- [27] A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, J. R. Buck: "Zeitdiskrete Signalverarbeitung", Pearson Studium, München [u.a.], 2004, ISBN: 3-8273-7077-9
- [28] K. Bonfert: "Betriebsverhalten der Synchronmaschine; Bedeutung der Kenngrößen für Planung und Betrieb elektrischer Anlagen und Antriebe", Springer, Berlin [u.a.], 1962, ISBN: 978-3540027928

- [29] J. Specovius: "Grundkurs Leistungselektronik; Bauelemente, Schaltungen und Systeme", Springer Fachmedien Wiesbaden; SpringerLink (Online service), Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-2448-6; 9783834824486
- [30] Caterpillar: "Datenblatt: OLYMPIAN GEP65-2 (3-Phase)", 2007
- [31] M. Germeroth: "Kurs "EEF 5 Drehstrom Mehrfunktionsmaschinen"", Lucas-Nülle GmbH, 2009
- [32] T. Wieland: "Verhalten von Niederspannungs-Synchrongeneratoren im Fehlerfall", Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, Graz, 2011
- [33] SMA Solar Technology AG: "Bedienungsanleitung: Inselnetz-Wechselrichter SUNNY ISLAND 5048", 2011
- [34] FirstPower Technology Co. Ltd.: "Datenblatt: LFP12250(12V250Ah)"
- [35] SMA Solar Technology AG: "Bedienungsanleitung: PV-Wechselrichter SUNNY BOY 1200/1700", 2012
- [36] D. L. Mills: "Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol", Communications, IEEE Transactions On, vol. 39, 1991, pp. 1482-1493

12 Anhang

12.1 Messung Notstromgenerator

Hier sind die bei der Messung Notstromgenerator verwendeten Messgeräte detailliert angeführt.

Der Messaufbau erfolgt anhand des Messkonzeptes (Abbildung 7.2). Vor Ort (im Keller des Bürogebäudes) sind die Messpunkte Transformator und Residuallast im selben Raum zugänglich. Der Messpunkt Notstromgenerator kann zwei Räume weiter ausgeführt werden.

Die Messgeräte werden nach Tabelle 12.1 den einzelnen Messpunkten zugewiesen. Die Abtastrate der gemessenen Signale beträgt 5000 Hz.

Tabelle 12.1: Verwendete Messgeräte der Messung „Notstromgenerator“

	Messpunkt:	Messgerät:
1.	Transformator	DEWE 2600
2.	Notstromgenerator	DEWE 3010
3.	Residuallast	DEWE 3020

In Tabelle 12.2, Tabelle 12.3 und Tabelle 12.4 sind die in den einzelnen Dewetron Messgeräten verwendeten Messkarten angeführt. Die Spannungsmessung erfolgt direkt, unter Einbindung einer Schmelzsicherung. Die Strommessung passiert mit Hilfe von Stromzangen vom Typ: CHAUVIN ARNOUX C173 (CHAUVIN ARNOUX Group, Paris, Frankreich) bzw. mit Rogowskispulen vom Typ: FLUKE i3000s (FLUKE AG, Everett, USA).

Tabelle 12.2: Messpunkt Transformator, Dewetron DEWE 2600

Messung:	Kanal:	Bezeichnung:	Messkarte:	Messung mit:	Übersetzungs- verhältnis:
Phase 1	0	U_L1	DAQP-HV	direkt	-
	1	I_L1	DAQP-LV	Rogowskispule	1 mV/1 A
Phase 2	2	U_L2	DAQP-HV	direkt	-
	3	I_L2	DAQP-LV	Rogowskispule	1 mV/1 A
Phase 3	4	U_L3	DAQP-HV	direkt	-
	5	I_L3	DAQP-LV	Rogowskispule	1 mV/1 A
Neutral	7	I_N	DAQP-LV	Rogowskispule	1 mV/1 A

Tabelle 12.3: Messpunkt Notstromgenerator, Dewetron DEWE 3010

Messung:	Kanal:	Bezeichnung:	Messkarte:	Messung mit:	Übersetzungsverhältnis:
Phase 1	0	U_L1	DAQP-HV	direkt	-
	1	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Phase 2	2	U_L2	DAQP-HV	direkt	-
	3	I_L2	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Phase 3	4	U_L3	DAQP-HV	direkt	-
	5	I_L3	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Neutral	7	I_N	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A

Tabelle 12.4: Messpunkt Residuallast, Dewetron DEWE 3020

Messung:	Kanal:	Bezeichnung:	Messkarte:	Messung mit:	Übersetzungsverhältnis:
Phase 1	0	U_L1	DAQP-DMM	direkt	-
	1	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Phase 2	2	U_L2	DAQP-DMM	direkt	-
	3	I_L2	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Phase 3	4	U_L3	DAQP-DMM	direkt	-
	5	I_L3	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A
Neutral	7	I_N	DAQP-LV	Stromzange	1 mV/1 A

12.1.1 Zeitsynchronisation – Phasenkorrektur

Im Falle der Messung des Notstromgenerators erfolgt die Zeitsynchronisation mit Hilfe des NTP-Protokolls [37], welches auch von DeweSoft unterstützt wird. Hierzu muss zuerst eine Netzwerkverbindung zwischen den drei Messcomputern aufgebaut werden. DEWE 2600 am Messpunkt Transformator ist über USB mit einem internetfähigen UMTS-WLAN-Router verbunden. Die beiden anderen Messgeräte (DEWE 3010, DEWE 3020) sind mit einem USB-WLAN-Stick ausgestattet. Über diesen sind sie mit dem Router des DEWE 2600 verbunden. Abbildung 12.1 zeigt den symbolischen Aufbau des beschriebenen WLAN-Netzwerkes.

Aufbauend auf das ausgeführte Netzwerk wird das DEWE 2600 als NTP-Server deklariert. Dieser NTP-Server bezieht seinen Zeitstempel über das Internet und gleicht ihn mit der internen Systemzeit des Computers ab. Die beiden anderen, DEWE 3010 und DEWE 3020, sind als NTP-Clients ausgeführt. Sie kommunizieren mit dem NTP-Server und erhalten von diesem dessen Zeitstempel.

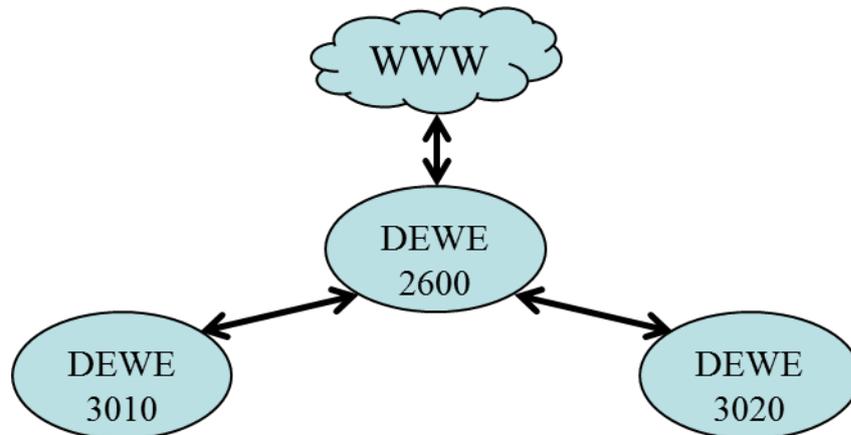


Abbildung 12.1: Aufbau des Netzwerkes für die Zeitsynchronisation via NTP

Bei exakter Synchronisation soll die Auswertung der Spannungen der Grundschiwingung (50 Hz) an allen drei Messpunkten zum selben Zeitpunkt, dieselben Phasenlagen ergeben. Ist dies nicht der Fall, laufen die Spannungen verschiedener Messgeräte zeitlich auseinander und ein Synchronisationsproblem tritt auf. Die Zeitstempel der drei Messgeräte sind daher verschieden.

12.2 Messung Labor-Synchrongenerator

Hier sind die bei der Messung Labor-Synchrongenerator verwendeten Messgeräte detailliert angeführt. Aufgebaut ist die Messung mit Hilfe einer DEWETRON DEWE-30-16 Messbox. Die Messbox ist mit einem Laptop über USB + RS232 Schnittstelle verbunden. Sie verfügt über 16 Kanäle und kann beide Messpunkte (je 7 Kanäle pro Messpunkt) im selben Messgerät aufzeichnen. Zudem ist die räumliche Nähe der Messpunkte im Labor gegeben. Das Messgerät ist mit dem Messlaptop verbunden, auf diesem läuft die Auswertesoftware DeweSoft 7.1.

Tabelle 12.5 zeigt die Belegung der einzelnen Kanäle des DEWE-30-16 sowie deren zugeordnete Messstellen.

Tabelle 12.5: Messaufbau Labor-Synchrongenerator mit Messgerät DEWE-30-16

Mess-Punkt:	Kanal:	Bezeichnung:	Messkarte:	Messung mit:	Übersetzungsverhältnis:
MP 1: Transformator	0	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	1	I_L2	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	2	I_L3	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	3	I_N	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	4	U_L1	DAQP-DMM	direkt	-
	5	U_L2	DAQP-DMM	direkt	-
	6	U_L3	DAQP-DMM	direkt	-
MP 2: Labor-Synchrongenerator	7	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	8	I_L2	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	9	I_L3	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	10	I_N	DAQP-LV	Stromzange	100 mV/1 A
	11	U_L1	DAQP-DMM	direkt	-
	12	U_L2	DAQP-DMM	direkt	-
	13	U_L3	DAQP-DMM	direkt	-

12.3 Messung Labor Inselnetzwechselrichter

Hier sind die bei der Messung Inselnetzwechselrichter verwendeten Messgeräte detailliert angeführt. Der Messaufbau erfolgt mit Hilfe einer DEWETRON DEWE-30-16 Messbox. Die Messbox ist mit einem Laptop über USB + RS232 Schnittstelle verbunden. Sie hat 16 mögliche Kanäle. Da pro Messpunkt nur drei Kanäle benötigt werden und der Laboraufbau räumlich kompakt ist, können alle drei Messpunkte (9 Kanäle) mit einer einzigen Messbox aufgenommen werden.

Tabelle 12.6: Messaufbau Messung Inselnetzwechselrichter mit Messgerät DEWE-30-16

Mess-Punkt:	Kanal:	Bezeichnung:	Messkarte:	Messung mit:	Übersetzungs-verhältnis:
Netz	0	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A
Netz	1	I_N	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A
IWR	2	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A
IWR	3	I_N	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A
Netz	4	U_L1	DAQP-DMM	direkt	-
IWR	5	U_L2	DAQP-DMM	direkt	-
WR	6	U_L3	DAQP-DMM	direkt	-
WR	7	I_L1	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A
WR	8	I_N	DAQP-LV	Stromzange	10 mV/1 A