



Roland Schweiger, BSc

Netzemulatoren und deren Einsatzbereich zur Überprüfung des Netzanschlussverhaltens von Betriebsmitteln

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

Ing. Dipl.-Ing. Manuel Galler, BSc

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Dipl.-Ing. Dr.techn. Erwin Reisinger

Externer Betreuer

Graz, Dezember 2020



IEAN



Netzemulatoren und deren Einsatzbereich zur Überprüfung des Netzanschlussverhaltens von Betriebsmitteln

Eine Masterarbeit von
Roland Schweiger

Betreuer
Herwig Renner
Manuel Galler
Erwin Reisinger

Dezember 2020

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/I
8010 Graz
Austria

Institutsleiter
Robert Schürhuber

Betreuer
Herwig Renner
Manuel Galler
Erwin Reisinger

Eine Masterarbeit von
Roland Schweiger

Dezember 2020

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 16.12.2020

Roland Schweiger

Danksagung

Diese Arbeit entstand in Firmenkooperation am Institut für elektrische Anlagen und Netze und stellt den Abschluss meines Studiums dar. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Fertigstellung unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei Manuel Galler bedanken, der mich fachlich bei der Erstellung der Arbeit und bei den Versuchen im Labor unterstützte. Auch während der COVID-19-Pandemie konnte er viele meiner Fragen beantworten.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Herwig Renner für die Betreuung der Arbeit und deren Begutachtung.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Dr. Erwin Reisinger der die Arbeit betreute und durch den diese überhaupt zustande kam.

Zum Abschluss möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir erst ermöglichten, dieses Studium an der technischen Universität Graz zu absolvieren und mich während diesem unterstützten.

Kurzfassung

Durch den vermehrten Einsatz von Frequenzumrichtern bei Erzeugern und Verbrauchern im elektrischen Energieversorgungsnetz wird die Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität vor neue Herausforderungen gestellt. Um diese weiterhin zu gewährleisten, müssen Betriebsmittel, die mit dem Netz verbunden werden sollen, auf ihr Verhalten bei verschiedenen Netzsituationen geprüft werden. Solche Prüfungen werden mit einem Netzemulator durchgeführt, damit können die unterschiedlichen Netzbedingungen erzeugt und die Netzimpedanz simuliert werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden Normen und Richtlinien auf vorhandene Test- und Prüfverfahren untersucht, die mit einem Netzemulator erzeugt werden können. Des Weiteren wurde eine Analyse durchgeführt, welche Netzemulatoren für den Niederspannungsbereich bereits am Markt angeboten werden. Um ausgewählte genormte Prüfverfahren auszuführen, wurde ein digitales Netz-Modell entwickelt, das in die Regelung der Ausgangsspannungen eines Leistungsverstärkers integriert werden soll. Durch Rückkopplung des Stroms kann mit diesem die Netzimpedanz simuliert werden. Das Modell wurde anschließend in einem Aufbau eines Power-Hardware-in-the-Loop Systems verwendet um die Funktion überprüfen und verschiedene Versuche durchzuführen.

Schlüsselwörter: Netzemulator, Leistungsverstärker, PHIL

Abstract

Due to the increased use of converters for generators and consumers in the electrical power supply network, maintaining the quality of supply is facing new challenges. In order to ensure this further on, equipment which will be connected to the grid must be tested for its behaviour on different grid situations. Such tests are carried out with a grid emulator which generates different grid conditions and simulates the grid impedance. For this thesis, standards and guidelines for tests and test procedures that can be generated with a grid emulator were investigated. In addition, an analysis of the grid emulators for the low voltage range which are already available on the market was carried out. In order to carry out some of the standardised tests, a model was developed which controls the output voltages of a power amplifier. By feeding back the current, it can also be used to simulate the mains impedance. The model was then used in a setup of a power hardware-in-the-loop system to check the function and carry out various tests.

Keywords: Grid emulator, power amplifier, PHIL

Abkürzungsverzeichnis

AR	Anwenderregel
EN	Europäische Norm
ENA	Energy Networks Association
ER	Engineering Recommendation
FPGA	Field Programmable Gate Array
HDL	Hardware Description Language
HUT	Hardware under Test
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ITM	Ideal Transformer Method
PCC	Point of Common Coupling
PHIL	Power Hardware in the Loop
RMS	Root Mean Square (Effektivwert)
TOR	Technische und organisatorische Richtlinien
TR	Technical Report
UL	Underwriters Laboratories
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VO	Verordnung

Symbolverzeichnis

A	Systemmatrix
A_d	Systemmatrix des diskreten Systems
α	Faktor für das Spannungslimit
B	Eingangsmatrix
B_d	Eingangsmatrix des diskreten Systems
C	Kapazität
C	Kapazitätsmatrix
C_{12}, C_{23}, C_{31}	Kapazitive Kopplungen
C_{E1}, C_{E2}, C_{E3}	Erdkapazitäten
f_1	Frequenz der Grundschiwingung
f_N	Nennfrequenz des Netzes
f_v	Frequenz des Schwingens dass durch die Verzögerungszeit auftritt
h	Oberschwingungs-Ordnung
$\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{I}_3$	Spitzenwerte der Ströme in allen drei Phasen
$\dot{i}_{1,1}, \dot{i}_{2,1}, \dot{i}_{3,1}$	Zeitveränderliche Phasenströme, Eingangsströme des Modells
$\dot{i}_{1,2}, \dot{i}_{2,2}, \dot{i}_{3,2}$	Zeitveränderliche Phasenströme die an der HUT gemessen werden
$\dot{i}_{C12}, \dot{i}_{C23}, \dot{i}_{C31}$	Zeitveränderliche Ströme die aufgrund der Koppelkapazitäten fließen
$\dot{i}_{CE1}, \dot{i}_{CE2}, \dot{i}_{CE3}$	Zeitveränderliche Ströme die aufgrund der Erdkapazitäten fließen
I_L	Phasenstrom
$\dot{i}_{RL1}, \dot{i}_{RL2}, \dot{i}_{RL3}$	Zeitveränderliche Ströme durch die Längsimpedanz
\dot{i}_N	Neutralleiterstrom
K_{12}	Faktor zur Berechnung eines Spannungseinbruchs der Spannung U_{12}
K_{u1}	Amplitudenfaktor für die Grundschiwingung
K_{UL1}	Amplitudenfaktor der Spannung U_{L1}
K_y	Amplitudenfaktor nach Norm
L	Induktivität

L	Induktivitätsmatrix
L_1, L_2, L_3	Induktiver Anteil der Längsimpedanz
L_{12}, L_{23}, L_{31}	Induktive Kopplungen
$L_{HUT1}, L_{HUT2}, L_{HUT3}$	Induktivitäten aller drei Phasen der HUT
L_N	Induktivität des Neutralleiters
n	Gerade Zahl 0, 1, 2, ...
φ_{l1}	Phasenverschiebung des Stroms zur Spannung in Phase L1
φ_{UL1}	Phasenwinkel der Spannung U_{L1} zu Prüfungsbeginn
$\varphi_{\text{prüf}}$	Phasenverschiebung während einer Prüfung
R	Ohm'scher Widerstand
R	Widerstandsmatrix
R_1, R_2, R_3	Ohm'scher Anteil der Längsimpedanz
R_A	Widerstand der Außenleiter
R_{HUT1}	Ohmscher Widerstand der Phase L1 der HUT
R_N	Widerstand des Neutralleiters
T_S	Abtastzeit des zeitdiskreten Systems
t_v	Verzögerungszeit zwischen Vorgabe, Ausgabe und Messung
$t_{v,1N}$	Verzögerungszeit in der Phase L1
U	Spannung
$U(s)$	Laplace-transformierter Eingangsvektor
$U(z)$	Eingangsvektor im z-Bereich
U	Eingangsvektor
U_{12}, U_{23}, U_{31}	Verkettete Spannungen (Phase-Phase)
U_{1N}, U_{2N}, U_{3N}	Phase-Neutralleiter Spannungen, Ausgangsspannung des Modells
u_{1N}, u_{2N}, u_{3N}	Zeitveränderliche Phase-Neutralleiter Spannungen, Ausgangsspannung
U_a, U_b, U_c	Vorgabewerte für die Phasenspannungen
U_h	Effektivwert der Oberschwingungsspannung der Ordnung h

U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}	Effektivwert der Phasenspannung, Spannungsvorgabe des Modells
$U_{L1,neu}$	Resultierende Phasenspannung in L1, bei Einbruch der Spannung U_{L2}
u_{L1}, u_{L2}, u_{L3}	Zeitveränderliche Phasenspannung, Spannungsvorgabe des Modells
$u_{L1,2}, u_{L2,2}, u_{L3,2}$	Zeitveränderliche Phasenspannung die an die HUT angelegt wird
$u_{L1,add}$	Überlagerte Spannung in Phase L1 während einer Prüfung
$u_{L1,res}$	Resultierende Spannung während einer Prüfung in Phase L1
U_{L-N}	Phasen-Neutralleiter Spannung
U_N	Nennspannung des Netzes
\hat{U}_N	Spitzenwert der Nennspannung
u_N	Zeitveränderlicher Spannungsabfall an der Neutralleiterimpedanz
U_{res}	Effektivwert der resultierenden Spannung
$u_{res}(t)$	Zeitveränderliche resultierende Spannung
U_T	Bemessungsspannung des Prüflings
$X(s)$	Laplace-transformierter Zustandsvektor
$X(z)$	Zustandsvektor im z-Bereich
X	Zustandsvektor
X_A	Außenleiterreaktanz
X_{ges}	Gesamtreaktanz von Netz und HUT
X_N	Neutralleiterreaktanz
Z	Impedanzmatrix
Z_0, Z_1, Z_2	Impedanz im Null-, Mit- und Gegensystem
Z_{ges}	Gesamtimpedanz von Netz und HUT
Z_{HUT}	Impedanz der HUT
Z_{Netz}	Netzimpedanz
Z_{ref}	Referenzimpedanz für Ströme $< 100A$
Z_{test}	Referenzimpedanz für Ströme $\geq 100A$
ω_N	Kreisfrequenz der Nennspannung des Netzes

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Markterhebung	3
3	Normen	5
3.1	Störfestigkeit von elektrischen Verbrauchern	5
3.2	Störaussendung von elektrischen Verbrauchern	6
3.3	Störfestigkeit und -aussendung von elektrischen Erzeugern	6
3.4	Anforderungen an einen Netzemulator.....	7
3.4.1	Innenimpedanz des Prüfgenerators	8
3.5	Ausgewählte Prüfverfahren	9
3.5.1	Prüfung der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüchen nach IEC 61000-4-11	10
3.5.2	Prüfverfahren „Flache Kurve“ nach IEC 61000-4-13.....	12
3.5.3	Prüfverfahren „Überschwingen“ nach IEC 61000-4-13	13
3.5.4	Prüfung der Störfestigkeit gegen Unsymmetrie nach IEC 61000-4-27	14
3.5.5	Bewertung der Prüfungsergebnisse	16
4	Modellbildung	17
4.1	Herleitung des mathematischen Modells.....	17
4.1.1	Dreiphasiges Modell mit einer Netzimpedanz nach IEC/TR 60725	18
4.1.2	Dreiphasiges Modell mit kapazitiven und zusätzlichen induktiven Kopplungen	20
4.2	Modellierung in Simulink®	24
4.2.1	Erstellung der Netzspannung	26
4.2.2	Erstellung der Prüfungen	27
4.2.3	Prüfung von Spannungseinbrüchen	28
4.2.4	Prüfung „Flache Kurve“	30
4.2.5	Prüfung „Überschwingen“	31
4.2.6	Prüfung mit unsymmetrischer Spannungsversorgung	33
4.2.7	Modell der Netzimpedanz.....	35
5	Ergebnisse	37
5.1	Ergebnisse der Simulation.....	37

5.2	Ergebnisse aus den Laborversuchen	41
5.2.1	Labora Aufbau.....	41
5.2.2	Ergebnisse des Leerlauf tests	43
5.2.3	Ergebnisse aus Versuchen mit ohmscher Last	46
5.2.4	Ergebnisse aus Versuchen mit ohmsch-induktiver Last.....	52
6	Diskussion	55
7	Literatur	59
8	Appendix	62
8.1	Initialisierungsdatei zur Simulation	62
8.2	Simulink® Blöcke.....	67

1 Einleitung

Der Zuwachs von erneuerbarer Energieerzeugung und EV-Ladestationen im elektrischen Versorgungsnetz, in denen Leistungselektronik zum Einsatz kommt, führen zu neuen Anforderungen an Betriebsmittel, die mit dem Netz verbunden sind [1]. Um diese zu erfüllen und die Versorgungsqualität und -sicherheit aufrecht zu erhalten, ist es nötig, das Verhalten der angeschlossenen Geräte bei unterschiedlichen Netzsituationen zu prüfen. Solche besonderen Zustände können durch Fehler oder andere Betriebsmittel im Netz hervorgerufen werden, einige davon sind nachfolgend aufgezählt und beschrieben.

- **Spannungseinbrüche und -schwankungen**

Das kurzzeitige teilweise oder völlige Einbrechen der Netzspannung wird Spannungseinbruch genannt. Ein solches Verhalten kann durch Fehler wie Kurzschlüsse oder große Lastschwankungen ausgelöst werden. Änderungen des Effektivwerts der Spannung, die sich innerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenzen ($\pm 10\% U_N$ am Anschlusspunkt) befinden, werden Spannungsschwankungen genannt, sie werden durch Laständerungen hervorgerufen [2]–[4].

- **Oberschwingungen und Zwischenharmonische**

Als Oberschwingung wird eine Sinusschwingung bezeichnet, die als Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz f_N besitzt. Oberschwingungen können in den Strömen und Spannungen im Netz auftreten. Hervorgerufen werden sie von Leistungselektronik oder nicht linearen Netzkomponenten. Schwingungen, die weder Netzfrequenz noch ein ganzzahliges Vielfaches davon besitzen, werden als Zwischenharmonische bezeichnet. Diese können erwünscht als Signal für Rundsteueranlagen oder auch unerwünscht als Störung im Netz auftreten [5].

- **Unsymmetrie**

Spannungen, deren Amplitude oder Phasenwinkel von den Werten bei symmetrischer Drehstrom-Versorgung abweichen, werden als Unsymmetrie bezeichnet. Ausgelöst werden sie durch Lasten die zwischen einer Phase und dem Neutralleiter oder zwischen zwei Phasen an das Netz angeschlossen sind. Besonders starke Unsymmetrien können außerdem durch Netzfehler ausgelöst werden, die nicht in allen drei Phasen gleichzeitig auftreten [6].

- **Frequenzschwankungen**

Die Netzfrequenz hängt vom Gleichgewicht zwischen Erzeugern und Verbrauchern elektrischer Wirkleistung ab. Im Verbundnetz treten Änderungen der Frequenz f_N nur in kleinem Ausmaß auf, da die Frequenz durch die Regelung der Wirkleistungseinspeisung in den Kraftwerken annähernd konstant gehalten wird. Beispielsweise durch Leitungsabschaltungen können aber Frequenzsprünge auftreten. Bei Inselnetzen, die nicht mit dem Verbundnetz synchronisiert sind, können auch größere Frequenzschwankungen auftreten [7].

Mit einem Netzemulator soll das reale Verhalten des Versorgungsnetzes sowie die soeben beschriebenen Zustände des Netzes nachgebildet werden. Es handelt sich dabei um eine gesteuerte dreiphasige Wechselspannungsquelle, die im Vier-Quadranten-Betrieb arbeitet. Damit sollen Betriebsmittel wie z. B. Umrichter, die für den Anschluss an das Netz vorgesehen sind, auf ihr Verhalten bei den verschiedenen Situationen im Netz getestet werden. Ein Netzemulator muss daher in der Lage sein, diese Netzzustände zu erzeugen sowie eine realistische Netzimpedanz nachzubilden.

In Abbildung 1 wird das Prinzip eines Netzemulators gezeigt. Mit einem Signalgenerator können verschiedene Spannungsformen erzeugt werden, welche mit einem Leistungsverstärker auf das entsprechende Niveau verstärkt werden. Dadurch wird ein künstlicher Netzanschlusspunkt (PCC) für die getestete Hardware (HUT) erzeugt. Durch Veränderung der erzeugten Spannung aufgrund der gemessenen Ströme kann die Netzimpedanz und so das Verhalten des Netzes emuliert werden. Dieses Konzept wird Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) genannt.

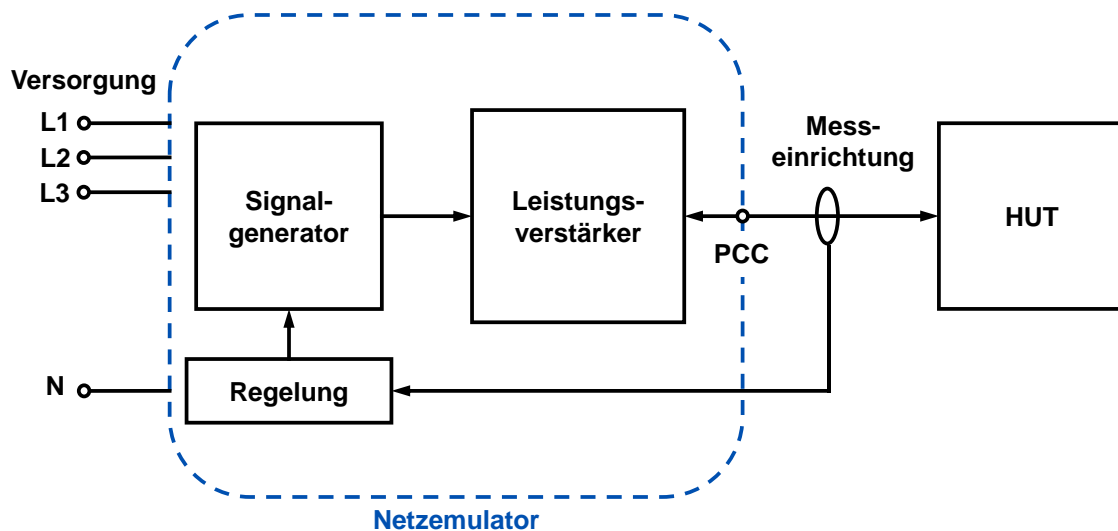


Abbildung 1 Prinzipschaltbild eines Netzemulators

Am Anfang dieser Arbeit wird ein Überblick über verschiedene Hersteller von Systemen zur Netzemulation und den aktuellen Stand der Normung im Niederspannungsbereich geboten. Dazu wurde eine Erhebung von internationalen Normen und Richtlinien für das Testen von Geräten und Betriebsmitteln durchgeführt. Diese soll Aufschluss über die Anforderungen geben, die ein Netzemulator erfüllen muss.

In weiterer Folge wurde ein Modell mit der Software Simulink[®] erstellt, welches die Spannung eines Leistungsverstärkers in der zuvor beschriebenen Weise regelt. Mit diesem können verschiedene Prüfverfahren aus den Normen durchgeführt werden und die Netzimpedanz eines Niederspannungsnetzes kann simuliert werden. Die Ergebnisse, die aus verschiedenen Tests hervorgingen, werden am Ende der Arbeit diskutiert.

2 Markterhebung

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Hersteller von Netzemulatoren und deren Kenndaten, welche Leistungsverstärker im Niederspannungsbereich herstellen und diese als Netzemulator bezeichnen. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der Recherche und mit welchen Leistungen die Geräte angeboten werden, diese reichen von wenigen kVA bis über ein MVA. Die höheren Leistungen werden meist durch Parallelschaltung von mehreren Modulen erreicht.

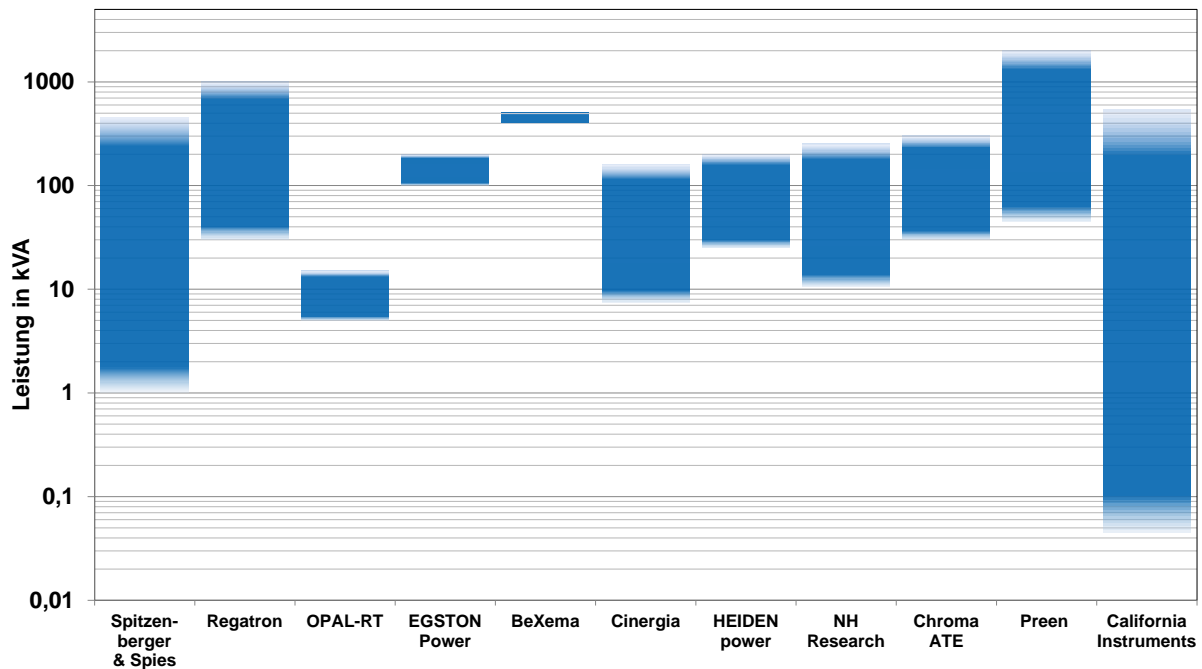


Abbildung 2 Grafische Einteilung der Leistungen von verschiedenen Netzemulatoren

Die genauen Kenndaten der einzelnen Geräte sind in Tabelle 1 zusammengefasst, sie wurden aus den entsprechenden Datenblättern ermittelt. Da die Bezeichnung Netzemulator von den Herstellern unterschiedlich eingesetzt wird, wird in der Tabelle unterschieden, ob eine PHIL Simulation möglich ist oder ob es sich um eine reine Spannungsquelle mit vordefinierten Signalformen handelt. Um einen Leistungsverstärker in eine PHIL Simulation zu integrieren, muss die Möglichkeit einer externen Spannungsvorgabe bestehen, um dessen Ausgangsspannung aktiv regeln zu können. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um eine ideale Spannungsquelle, mit dieser können zwar unterschiedliche Signalformen erzeugt werden, eine realitätsnahe Netzemulation kann damit aber nicht durchgeführt werden.

Die meisten der angeführten Hersteller bieten einen Leistungsverstärker an, welcher durch einen eingebauten Signalgenerator in der Lage ist, Spannungsformen wie z. B. Spannungseinbrüche zu erzeugen. Spitzenberger & Spies, Regatron, Cinergia, Chroma und Ametek geben dabei an, dass in dieser Weise normenkonforme Prüfungen durchgeführt werden können [8]–[14]. Besteht zusätzlich die Möglichkeit einer externen Spannungsversorgung, kann der Leistungsverstärker mit einem Echtzeitsystem verbunden werden, um eine PHIL Simulation aufzubauen. Ein Gesamtsystem wird z.

B. vom Hersteller OPAL-RT angeboten. Bei der Hardware der Firma HEIDEN Power ist es möglich, den enthaltenen FPGA frei zu programmieren, dadurch können ebenso verschiedene Simulationen durchgeführt werden [15]. Mit dem Leistungsverstärker der Firma Regatron wurden in Verbindung mit einem Echtzeitsystem verschiedene Versuche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt, deren Ergebnisse werden im Abschnitt 5 näher erläutert.

Hersteller	Name	Spannung U_{L-N}	Frequenz- bereich	Slew Rate	PHIL
Spitzenberger & Spies	PAS Serie	0-270 V	0-5 kHz	52 V/ μ s	Ja
	APS Serie	0-270 V	0-10 kHz	52 V/ μ s	Ja
Regatron	TC.ACS	0-305 V	0-1000 Hz	< 4 V/ μ s	Ja
OPAL-RT Technologies	OP1400	0-240 V	0-10 kHz	5 V/ μ s	Ja
EGSTON Power	CSU 200 – 1GAMP6	0-300 V	0-5 kHz	-	Ja
BeXema	-	100-600 V	40-100 Hz	-	k.A.
Cinergia	GE&EL + vAC	0-277 V	10-100 Hz	< 0,25 V/ μ s	Ja
HEIDEN power	HGE15	0-254 V	40-70 Hz	-	Ja
NH Research	Model 9420	10-350 V	30-880 Hz	1 V/ μ s	Nein
Chroma ATE	Model 61800	0- 500 V	30-100 Hz	-	Ja
Preen	PAS Series	0-300 V	45-65 Hz	-	Nein
AMETEK	CTS Series 3.2	150-300 V	45-65 Hz	-	Nein
	MX CTS Series	150-300 V	45-65 Hz	-	Nein

Tabelle 1 Übersicht über die Nenndaten verschiedener Netzemulatoren und deren Hersteller

Die Technologien, die in den angeführten Leistungsverstärkern zum Einsatz kommen, lassen sich in zwei größere Gruppen unterteilen. Jene, die auf linearen Transistorverstärkern basieren und jene, die Halbleiterschalter verwenden. Bei Transistorverstärkern, wie sie Spitzenberger & Spies verwendet, wird das Ausgangssignal zuerst mit niedriger Spannung erzeugt und dann mittels Verstärker auf die gewünschte Ausgangsspannung gebracht. Die meisten anderen Hersteller nutzen geschaltete Leistungselektronik. Dabei wird zuerst mit einem Gleichrichter ein Gleichspannungsspannungs-Zwischenkreis versorgt. Die Gleichspannung wird wiederum in eine dreiphasige Wechselspannung mit einem entsprechenden Wechselrichter gewandelt. Durch Regelung des PWM-Signals welches die Halbleiterschalter ansteuert, können unterschiedliche Signalformen erzeugt werden. Nach Herstellerangaben können bei dieser Technologie höhere Wirkungsgrade als bei linearen Verstärkern erzeugt werden. Cinergia und Heiden Power geben an, zweistufige Halbbrücken mit IGBT's zu verwenden, während Regatron einen mehrstufigen Wechselrichter verwendet. Die restlichen Hersteller geben keine genaueren Informationen zur verbauten Technologie an [16]–[20].

3 Normen

Für das Testen von Niederspannungsgeräten mit einem Netzemulator müssen verschiedene Normen beachtet werden. Um dies besser zu ermöglichen, wurde eine Erhebung der bestehenden internationalen Normen durchgeführt. Es wird zwischen Normen für die Störfestigkeit und Störaussendung von Verbrauchern und jenen für Generatoren unterschieden. Tests für die Aussendung von leitungsgeführten Störungen stellen zwar geringere Anforderungen an die Prüfspannungsquelle als jene für die Störfestigkeit, können aber ebenfalls mit einem Netzemulator durchgeführt werden und sind deshalb auch angeführt.

Für elektrische Verbraucher gelten die Teile drei und vier der internationalen Norm IEC 61000. Diese wurden auch als europäische Norm und somit auch als nationale Norm in Österreich übernommen. In der Norm werden Grenzwerte und Prüfverfahren für die Störfestigkeit und -aussendung von elektrischen Betriebsmitteln, die für den Anschluss an das Niederspannungsnetz vorgesehen sind, festgelegt.

Während für elektrische Verbraucher schon länger IEC Standards existieren, werden für Generatoren von den Ländern eigene nationale Richtlinien und Normen erstellt [21]. Diese stellen hinsichtlich der Prüfverfahren geringere Anforderungen als die Normen für Verbraucher, aufgrund des Anstiegs von dezentraler Energieerzeugung im Niederspannungsbereich werden diese Normen aber laufend erweitert.

Einige der Prüfverfahren die in den Normen beschrieben sind, wurden ausgewählt um diese mit einem Netzemulator auszuführen. Diese werden am Ende des Kapitels beschrieben.

3.1 Störfestigkeit von elektrischen Verbrauchern

Die Überprüfung der Störfestigkeit von elektrischen Betriebsmitteln und Geräten gegen leitungsgeführte Störungen stellt die Hauptanforderung an einen Netzemulator dar. Dafür müssen verschiedene Störgrößen wie Oberschwingungen, unsymmetrische Versorgung, Spannungsschwankungen etc. von der Prüfspannungsquelle erzeugt werden [2]–[7]. Die betreffenden Teile der Norm IEC 61000-4 sind in Tabelle 2 zusammengefasst, sie geben Grenzwerte, Prüfpegel, Prüfabläufe sowie Anforderungen an die Prüfspannungsquelle vor.

IEC 61000-4-11	Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen	$\leq 16 \text{ A}$
IEC 61000-4-13	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	$\leq 16 \text{ A}$
IEC 61000-4-14	Spannungsschwankungen innerhalb Betriebsgrenzen	$\leq 16 \text{ A}$
IEC 61000-4-27	Unsymmetrie	$\leq 16 \text{ A}$
IEC 61000-4-28	Frequenzschwankungen	$\leq 16 \text{ A}$
IEC 61000-4-34	Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen	$> 16 \text{ A}$

Tabelle 2 Überblick über die Normen für die Störfestigkeit von Lasten

Wie ebenfalls in der Tabelle zu sehen ist, gelten die meisten Teile nur für Geräte, deren Bemessungsstrom nicht höher als 16 A pro Phase liegt. Nur für Spannungseinbrüche besteht auch eine Norm, die für Phasenströme höher als 16 A gilt.

Bezüglich der Verbindlichkeit die angeführten Grenzwerte auch einzuhalten, werden keine exakten Angaben gemacht. Generell wird bei allen oben angeführten Teilen vermerkt, dass die Entscheidung, die Norm anzuwenden, einem Produktkomitee obliegt.

3.2 Störaussendung von elektrischen Verbrauchern

Im dritten Teil der IEC 61000 werden Grenzwerte und die damit verbundenen Prüfungen für die Begrenzung von Störaussendungen für die mit dem Netz verbundenen elektrischen Betriebsmitteln festgelegt, siehe Tabelle 3. Die Überprüfung dieser Grenzwerte erfordert eine ausreichend genaue und konstante Spannungsquelle, es müssen aber keine besonderen Spannungsformen durch den Prüfgenerator erzeugt werden [22]–[25]. Da die Forderungen dieses Teils gleichzeitig mit denen aus IEC 61000-4 erfüllt werden können, wurden diese auch berücksichtigt.

IEC 61000-3-2	Oberschwingungsströme	≤ 16 A
IEC 61000-3-3	Spannungsschwankungen, -änderungen und Flicker	≤ 16 A
IEC 61000-3-11	Spannungsschwankungen, -änderungen und Flicker	16 - 75 A
IEC 61000-3-12	Oberschwingungsströme	16 - 75 A

Tabelle 3 Überblick über die Normen für die Störaussendung von Lasten

Die Prüfschaltung, die in der Norm vorgeschlagen wird, besteht aus einer Spannungsquelle mit definierter Innenimpedanz.

3.3 Störfestigkeit und -aussendung von elektrischen Erzeugern

Für Stromerzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz gibt es verschiedenste nationale Standards und Richtlinien, siehe Tabelle 4. Diese müssen ebenfalls berücksichtigt werden, wenn mit einem Netzemulator solche Geräte getestet werden sollen.

IEC/TR 61000-3-15	Störfestigkeits- und -aussendungs-Anforderungen für verteilte Erzeugung	≤ 75 A
EU-VO 2016/631	Network Code: Requirement for Generators	
EN 50549-1	Anforderungen an Generatoren im Verteilnetz	
VDE-AR-N 4105	Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz	
TOR Erzeuger	Anschluss und Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen	
ENA ER G98	Mikro-Generatoren am Niederspannungsnetz	≤ 16 A
ENA ER G99	Generatoren am Verteilnetz	> 16 A
IEEE 1547	Verteilte Erzeugung	
IEEE 1547.1	Konformitätsprüfungen	
UL 1741	Standard für Umrichter für verteilte Erzeugung	

Tabelle 4 Überblick über die Normen für die Störfestigkeit und -aussendung von Generatoren

In der EU setzen die nationalen Richtlinien [26]–[30] die Anforderungen des EU Network Codes „Requirement for Generators“ [31] um. Während in den USA und in Kanada der IEEE Standard 1547 [32], [33] als nationale Norm übernommen wird [34]. Von der IEC existiert nur eine Empfehlung [21] Normen für Verbraucher (61000-3/-4) auch für Generatoren anzuwenden.

Der Inhalt aller hier angeführten Normen bezieht sich hauptsächlich auf Themen wie Fault-Ride-Through und Einstellwerte für die Schutzeinrichtungen der Erzeugungsanlagen. Also Vorgaben, wie lange im Falle eines Fehlers eine Erzeugungsanlage am Netz bleiben muss. Die Überprüfung solcher Vorgaben kann ebenfalls mit einem Netzemulator durchgeführt werden. Da es sich hierbei um keine schnellen Änderungen der Versorgungsspannung handelt, stellt dies keine besonderen Anforderungen an die Prüfspannungsquelle dar.

3.4 Anforderungen an einen Netzemulator

Der folgende Abschnitt enthält eine Zusammenfassung aller Vorgaben für die Eigenschaften eines Prüfgenerators. Werden also alle Werte in Tabelle 5 von einem Netzemulator eingehalten, lassen sich damit alle oben genannten Teile der IEC Standards 61000-3 und -4 einhalten. Da die Normen für die Prüfung von Generatoren keine Anforderungen an die Prüfspannungsquelle stellen, sind diese nicht in der Tabelle berücksichtigt.

Ausgangsspannungsbereich	0 % - 115 % von U_N
Ausgangsspannungsgenauigkeit o. Belastung	$\pm 1 \%$
Spannungsänderung bei Belastung	$\pm 5 \%$ des verbleibenden Effektivwerts der Spannung
Ausgangsstromtragfähigkeit	Bis zu 100 A
Spitzen-Einschaltstromtragfähigkeit	Bis zu 1000 A
Augenblicks-Spitzenwert für Über-/Unterschwingen der Spannung (100 Ω Last)	kleiner als 5 % der Prüfspannung
Anstiegs- und Abfallzeit für Spannungsänderungen	1 μ s bis 5 μ s
Phasenverschiebung	0° bis 360°
Phasenfehler der Spannungseinbrüche	kleiner als $\pm 5^\circ$
Nulldurchgangsgenauigkeit	$\pm 10^\circ$
Max. Fehler des Winkels zwischen den drei Phasen	1°
Frequenzgenauigkeit	$\pm 0,3 \%$ von 50/60 Hz
Prüfdauergenauigkeit	$\pm 10 \%$
Max. Oberschwingungs-Spannungsverzerrung U_h	$U_3 = 0,9\% \cdot U_1$, $U_5 = 0,4\% \cdot U_1$, $U_7 = 0,3\% \cdot U_1$, $U_9 = 0,2 \cdot U_1$, $U_{2-10} = 0,2\% \cdot U_1$, $U_{11-40} = 0,1\% \cdot U_1$
Oberschwingungs-Ordnung	2 bis 40
Oberschwingungs-Spannung	0 % bis 14 % von U_1
Oberschwingungs-Genauigkeit	$\pm 5 \%$ von U_h o. $\pm 0,1 \%$ von $U_1 \rightarrow$ größerer Wert
Oberschwingungs-Phasenwinkel	für $h = 2$ bis 9 : 0°, 180°
Genauigkeit Nulldurchgangsabweichung	$\pm 2 \%$ der Grundschwingung
Zwischenharmonische-Spannung	0 % bis 10 % von U_1
Zwischenharmonische-Genauigkeit	$\pm 5 \%$ von U_h o. $\pm 0,1 \%$ von $U_1 \rightarrow$ größerer Wert

Zwischenharmonische-Bereich	$0,33 \cdot f_1$ bis $40 \cdot f_1$
Zwischenharmonische-Einstellungsschritte	$0,1 \cdot f_1$ ($0,33$ bis $2 \cdot f_1$); $0,2 \cdot f_1$ (2 bis $20 \times f_1$); $0,5 \cdot f_1$ ($> 20 \times f_1$)
max. Fehler des eingestellten Wertes	$\pm 0,5 \% f$

Tabelle 5 Zusammengefasste Anforderungen an die Prüfspannungsquelle aus IEC 61000-3/-4

Dass der Prüfgenerator die genannten Eigenschaften auch besitzt, muss mit einer ohmschen Last nachgewiesen werden. Der ohmsche Widerstand muss aber groß genug sein, sodass der maximale Ausgangsstrom nicht überschritten wird. Außerdem soll an einer einphasigen ohmschen Last nachgewiesen werden, dass der Prüfgenerator einen Ausgangsstrom mit einem Crest-Faktor von mindestens drei liefern kann. Was bedeutet, dass beim maximalen Effektivwert des Ausgangsstroms dessen Spitzenwert dreimal höher sein darf. Dies muss für alle Phasen der Prüfspannungsquelle einzeln an einem Brückengleichrichter, der mit einem ohmschen Widerstand belastet ist, nachgewiesen werden. Weitere Kriterien, die ein Prüfgenerator und die darin eingesetzte Technik erfüllen müssen, werden in den Normen nicht angeführt.

3.4.1 Innenimpedanz des Prüfgenerators

Um das Verhalten eines realen Netzes nachbilden zu können, ist es nötig, dessen Impedanz zu kennen. Abgesehen von den Vorgaben für Spannungs-, Winkel- oder Frequenzgenauigkeit werden für einige Prüfungen zwar auch Forderungen an die Innenimpedanz des Prüfgenerators gestellt, dabei wird aber meist ein geringer Wert gefordert um eine möglichst ideale Spannungsquelle zu erhalten. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick in welchen der Normen Angaben über die Innenimpedanz gemacht werden.

IEC 61000-4-11	Rein ohmsch, niedrig, nicht näher definiert
IEC 61000-4-13	Bei Bedarf nach IEC 60725 für Resonanzen
IEC 61000-4-14	Niedrig, nicht näher definiert
IEC 61000-4-27	Nicht festgelegt
IEC 61000-4-28	Nicht festgelegt
IEC 61000-4-34	Rein Ohmsch, niedrig, nicht näher definiert
IEC 61000-3-2	Nicht festgelegt
IEC 61000-3-3	Nach IEC 60725
IEC 61000-3-11	Nach IEC 60725
IEC 61000-3-12	Nicht festgelegt

Tabelle 6 Überblick über die Vorgaben für die Innenimpedanz des Prüfgenerators

Wenn Angaben enthalten sind dann verweisen sie auf den technischen Bericht IEC/TR 60725 [35]. Darin werden Referenzwerte für die Netzimpedanz für das Testen von Geräten, die an das öffentliche Niederspannungsnetz angeschlossen werden sollen. Die Werte stammen aus internationalen Untersuchungen und sind für verschiedene Versorgungssysteme (dreiphasig, einphasig) zusammengefasst. Bei einer dreiphasigen Versorgung mit Neutralleiter, wie es auch in Österreich üblich ist, unterscheiden sie sich je nach Bemessungsstrom des zu testenden Geräts und der Versorgungskapazität des Netzes. Für Geräte mit einem Bemessungsstrom bis 75 A je Phase, die in

einem Netz mit einem maximalen Phasenstrom von 100 A angeschlossen werden sollen, gelten die Werte aus Tabelle 7.

Leiter	Z_{ref} in Ω
Außenleiter $R_A + jX_A$	$0,24 + j0,15$
Neutralleiter $R_N + jX_N$	$0,16 + j0,10$

Tabelle 7 Referenzimpedanzen für Ströme < 100 A pro Phase nach IEC/TR 60725

Sollen Geräte bis 75 A in einem Netz angeschlossen werden, dass höhere Ströme als 100 A liefern kann, sollen auch niedrigere Werte für die Referenzimpedanz verwendet werden (siehe Tabelle 8).

Leiter	Z_{test} in Ω
Außenleiter $R_A + jX_A$	$0,15 + j0,15$
Neutralleiter $R_N + jX_N$	$0,10 + j0,10$

Tabelle 8 Referenzimpedanzen für Ströme ≥ 100 A pro Phase nach IEC/TR 60725

Wenn ein Impedanznetzwerk zwischen Prüfgenerator und Prüfobjekt verwendet werden soll, wird eines bestehend aus Längswiderstand und -induktivität vorgeschlagen, wie Abbildung 3 zeigt. Bei dem vorgeschlagenen Netzwerk werden keine Kapazitäten vorgesehen, bei Prüfungen mit Oberschwingungen können mit diesem daher kein korrektes Verhalten erzielt werden.

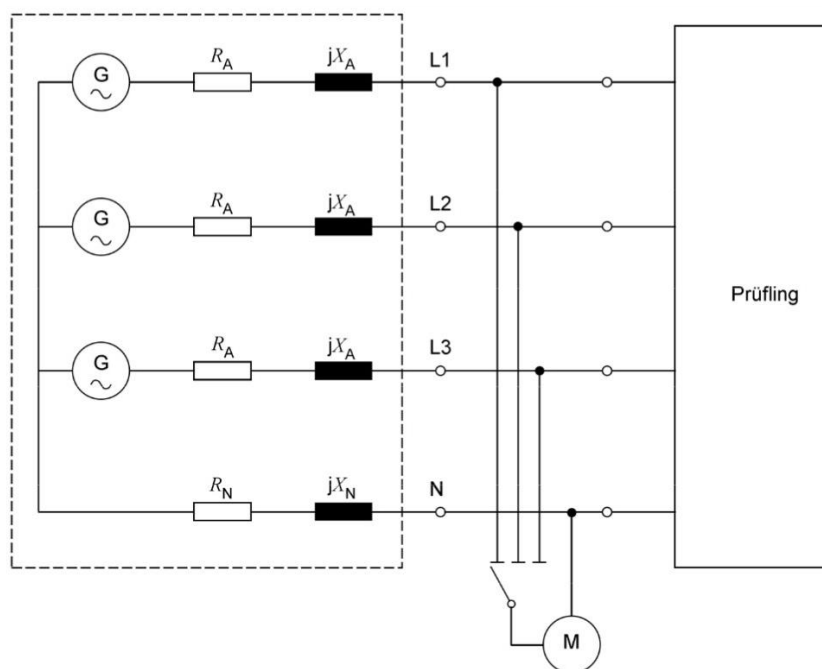


Abbildung 3 Impedanznetzwerk nach IEC 61000-3-11 (M = Messeinrichtung)

Quelle: ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3:2014

3.5 Ausgewählte Prüfverfahren

Zur späteren Anwendung und Prüfung im Labor wurden vier der Prüfabläufe aus IEC 61000-4 ausgewählt. Ein Prüfungsablauf mit Spannungseinbrüchen, einer mit unsymmetrischer Spannungsversorgung und zwei aus der Norm für Oberschwingungen. Das Ausmaß der Fehler wie z.

B. Spannungseinbrüche während der Prüfung wird durch Prüfklassen bestimmt, die durch IEC 61000-2-4 [36] festgelegt sind. Die Prüfklasse wird je nach Art des Geräts und wie empfindlich es auf leitungsgeführte Störungen reagiert, ausgewählt. Da deren Auswahl entscheidend für die angewandten Prüfpegel und die Prüfdauer bei allen folgenden Prüfungen ist, wird auf diese hier näher eingegangen.

- **Klasse 1** ist für sehr empfindliche Geräte gedacht und weist somit die geringsten Prüfpegel und Prüfdauern auf. Geräte dieser Klasse sind normalerweise mit zusätzlichen Schutzeinrichtungen versehen.
- **Klasse 2** ist für Betriebsmittel, die am öffentlichen Netz angeschlossen werden, vorgesehen und gilt allgemein am Anschlusspunkt (Point of Common Coupling PCC).
- **Klasse 3** ist für Geräte in industriellen Umgebungen, die höhere Verträglichkeitspegel gegenüber Störungen erfordern als jene im öffentlichen Netz.

Zusätzlich zu den genannten Prüfklassen besteht bei allen Prüfungen auch die Möglichkeit, gewisse Parameter frei zu wählen, diese werden mit Klasse X bezeichnet. Die gewählten Werte für Geräte, die für den Anschluss an das Niederspannungsnetz bestimmt sind, dürfen aber die aus Klasse 2 nicht unterschreiten.

3.5.1 Prüfung der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüchen nach IEC 61000-4-11

Der Prüfling wird bei dieser Prüfung mit einer Reihe aus Spannungseinbrüchen beaufschlagt. Das Ausmaß des Spannungseinbruchs und dessen Dauer wird nach Tabelle 9 ausgewählt. Die Höhe der Prüfpegel ist im Verhältnis zur Bemessungsspannung des Prüflings angegeben.

Prüfungsdauer	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse X
N · Perioden (bei 50/60 Hz)	U/U_T	U/U_T	U/U_T	U/U_T
0,5/0,5	Einzelfall- prüfung	0 %	0 %	X
1/1		0 %	0 %	X
10/12		-	40 %	X
25/30		70 %	70 %	X
250/300		-	80 %	X

Tabelle 9 Prüfpegel für Spannungseinbrüche nach IEC 61000-4-11

Mit den ausgewählten Prüfpegeln sollen dann alle verfügbaren Spannungen des zu testenden Geräts beaufschlagt werden. Ist also ein Neutraleiter verfügbar, müssen alle Phasenspannungen (U_{1N} , U_{2N} , U_{3N}) und alle verketteten Spannungen (U_{12} , U_{23} , U_{31}) nacheinander geprüft werden. Ist dies nicht der Fall reicht es aus die verketteten Spannungen zu testen, wie in Abbildung 4 dargestellt. Ein Einbruch der Außenleiterspannungen kann auch so erfolgen, dass zwei Phasen gleichzeitig betroffen sind. Die in der Abbildung 4 gezeigte Variante wird jedoch bevorzugt.

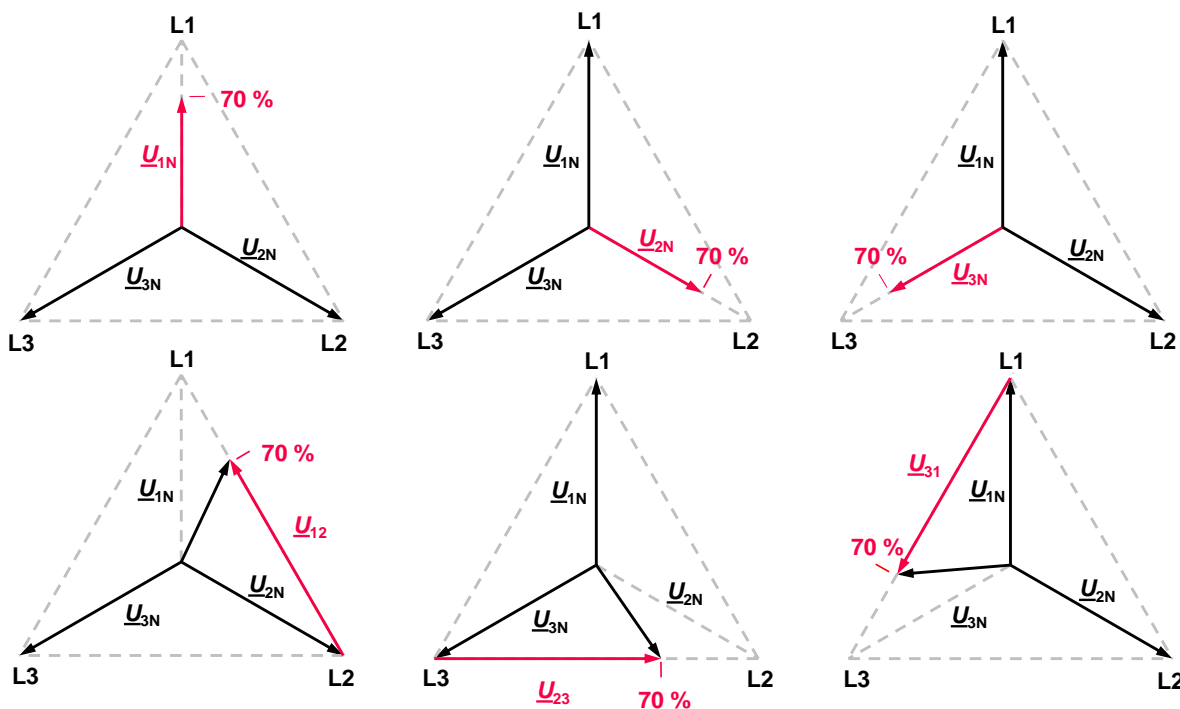


Abbildung 4 Beispiel für 70 % Spannungseinbrüche in allen Phasenspannungen und verketteten Spannungen

Der Übergang von der fehlerfreien Spannung zu einem Spannungseinbruch muss bei einem Prüfablauf im Nulldurchgang der betroffenen Phase erfolgen. Zusätzlich muss der Prüfablauf bei weiteren Phasenwinkeln, bei denen ein Einbruch der Versorgungsspannung eintritt, durchgeführt werden. Vorzugsweise sollen dabei die Winkel 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° und 315° gewählt werden.

Außerdem wird festgelegt, dass jeder Prüfpegel, der aus der Tabelle ausgewählt wurde, für jede Betriebsart dreimal wiederholt werden muss. Zwischen einzelnen Prüfungen muss eine Pause von mindestens zehn Sekunden erfolgen, in der zur fehlerfreien Spannung zurückgekehrt wird.

In Abbildung 5 ist schematisch dargestellt, wie ein Prüfablauf unter Beachtung aller genannten Kriterien aussieht. Vor Prüfungsbeginn wird der Prüfpegel U/U_T , die Dauer des Spannungseinbruchs und die Phasenlage, bei dem er erfolgen soll, gewählt und anschließend der Prüfablauf gestartet. Ist ein Neutralleiter vorhanden, setzt sich der gesamte Ablauf aus 18 Einzelprüfungen zusammen.

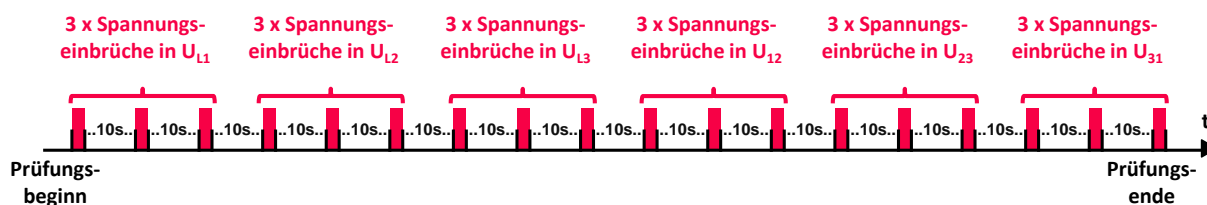


Abbildung 5 Darstellung eines vollständigen Prüfablaufs

3.5.2 Prüfverfahren „Flache Kurve“ nach IEC 61000-4-13

Da die Norm für die Störfestigkeit gegen Oberschwingungen eine ganze Reihe von Prüfverfahren enthält, wurden zwei davon ausgewählt, um sie später mit einem Netzemulator auszuführen. Das Erste der beiden wird als „Flache Kurve“ bezeichnet und wird nachfolgend beschrieben.

Während der Prüfung wird der Prüfling mit einem speziellen Signal versorgt, das sich aus einem sinusförmigen und einem konstanten Anteil zusammensetzt. Für den sinusförmigen Teil wird die fehlerfreie Netzspannung mit einem Faktor K_y multipliziert, um den Effektivwert des gesamten Signals gegenüber dem der Netzspannung nicht zu verändern. Ab einem gewissen Wert, der durch den Faktor α bestimmt wird, geht das Signal in einen konstanten Verlauf über. Die resultierende Kurvenform lässt sich mathematisch durch die Formeln 3.1 beschreiben.

$$u(t) = \begin{cases} K_y \cdot \hat{U}_k \cdot \sin(\omega_N \cdot t) & \text{für } 0 \leq |\sin(\omega_N t)| \leq \alpha \\ \pm \alpha \cdot K_y \cdot \hat{U}_N & \text{für } \alpha \leq |\sin(\omega_N t)| \leq 1 \end{cases} \quad \text{mit } \hat{U}_N = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_N \quad (3.1)$$

Die genaue Größe der beiden Faktoren K_y und α wird wieder durch die Prüfklasse bestimmt, wie in Tabelle 10 veranschaulicht wird. Wie zuvor können aber auch wieder von den Klassen abweichende Werte gewählt werden.

Klasse	Spannungsverhältnis K_y	Faktor für den flachen Teil α
1	1,0133	0,95
2	1,0379	0,9
3	1,1117	0,8
X	X	X

Tabelle 10 Prüfpegel für die Bestimmung der „flachen Kurve“ nach IEC 61000-4-13

Abbildung 6 zeigt eine Periode der resultierenden Prüfspannung mit den Parametern für eine Prüfung der Klasse 2, um deren Verlauf zu verdeutlichen.

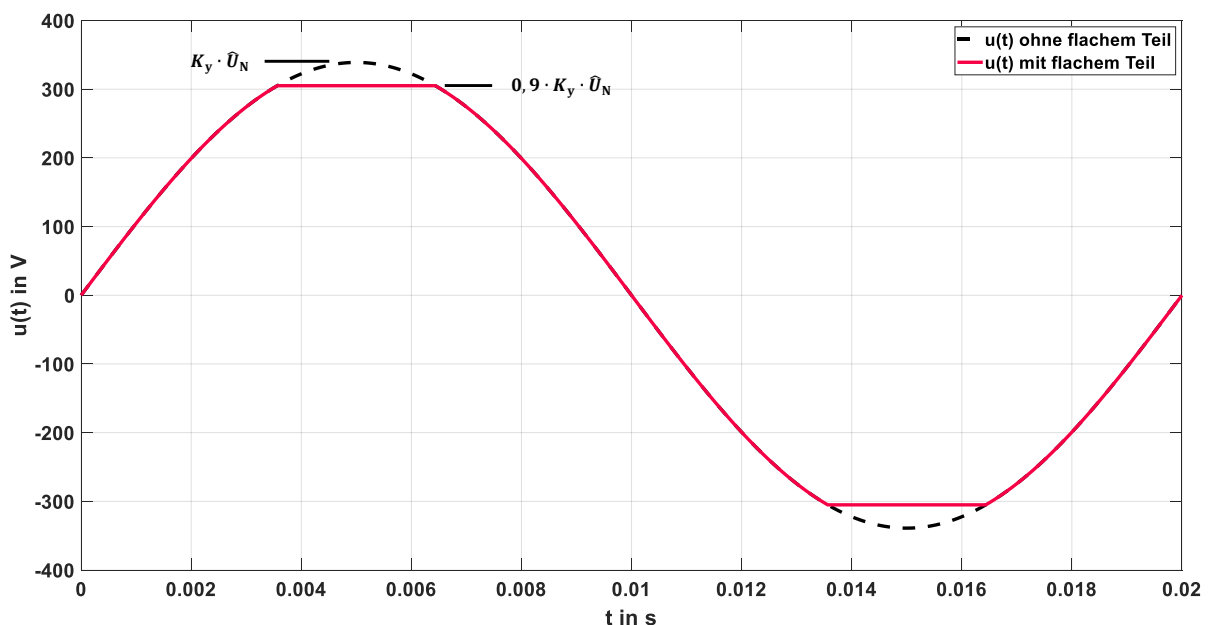


Abbildung 6 Signalverlauf der Spannung bei der Prüfung „Flache Kurve“ bei Prüfling der Klasse 2

Die schwarz strichlierte Linie zeigt die Netzspannung, multipliziert mit dem Faktor $K_y = 1,0379$, die rote Linie zeigt das gesamte Signal mit dem flachen Teil. Diese Kurvenform soll auf alle drei Phasen des zu testenden Geräts für mindestens zwei Minuten angewendet werden.

3.5.3 Prüfverfahren „Überschwingen“ nach IEC 61000-4-13

Ein weiteres Prüfverfahren aus dem IEC Standard 61000-4-13 für die Störfestigkeit gegen Oberschwingungen wird als „Überschwingen“ bezeichnet. Dabei wird die Grundschwingung der Netzspannung mit ihrer dritten und fünften Oberschwingung in einer Weise überlagert. Die dritte Oberschwingung wird 180° phasenverschoben, um eine Erhöhung der Amplitude der resultierenden Spannung gegenüber der Grundwelle zu erreichen.

$$u_{\text{res}}(t) = \hat{U}_1 \cdot \left[\sin(\omega_N t) + \frac{U_3}{U_1} \cdot \sin(3 \cdot \omega_N t + \pi) + \frac{U_5}{U_1} \cdot \sin(5 \cdot \omega_N t) \right] \quad (3.2)$$

Der Spitzenwert der Grundschwingung U_1 muss allerdings so gewählt werden, dass sich der Effektivwert der Prüfspannung nicht gegenüber dem der unbeeinflussten Netzspannung ändert. Dafür wird ein Faktor K_{u1} eingeführt, da es dazu keine Werte in der Norm gibt.

$$\hat{U}_1 = K_{u1} \cdot \hat{U}_N \quad (3.3)$$

Wie groß der Faktor sein muss, kann aus der geometrischen Summe der Verhältnisse der Oberschwingungseffektivwerte zum Nennspannungseffektivwert abgeleitet werden. Die Indizes der Spannungen stehen in den folgenden Formeln für die Ordnungszahl der Oberschwingungen.

$$\left(\frac{U_{\text{res}}}{U_N} \right)^2 = \left(\frac{U_1}{U_N} \right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_N} \right)^2 + \left(\frac{U_5}{U_N} \right)^2 = 1 \quad (3.4)$$

$$\text{mit } K_{u1} = \frac{U_1}{U_N} \Rightarrow 1 = K_{u1}^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2 \right]$$

$$K_{u1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{U_5}{U_1} \right)^2}} \quad (3.5)$$

Die Tabelle 11 zeigt, wie hoch die Amplituden der Oberschwingungsanteile je nach Wahl der Prüfklasse sein müssen. Die Werte können dann direkt in Gleichung (3.5) eingesetzt werden, um den Faktor K_{u1} zu berechnen.

Klasse	h = 3		h = 5	
	U_h/U_1	Winkel zu U_1	U_h/U_1	Winkel zu U_1
1	4%	180°	3%	0°
2	6%	180°	4%	0°
3	8%	180°	5%	0°
X	X	180°	X	0°

Tabelle 11 Parameter für die Prüfung "Überschwingen"

In Abbildung 7 wird eine Periode der resultierenden Prüfspannung in Rot und die verschiedenen Anteile aus denen sie zusammengesetzt wird, in Graustufen gezeigt. Die dritte Oberschwingung wird 180° phasenverschoben, um eine Erhöhung der Amplitude zu erreichen. Wie bei der Prüfung „Flache Kurve“ müssen alle drei Phasen des Prüflings für mindestens zwei Minuten mit der Prüfspannung beaufschlagt werden.

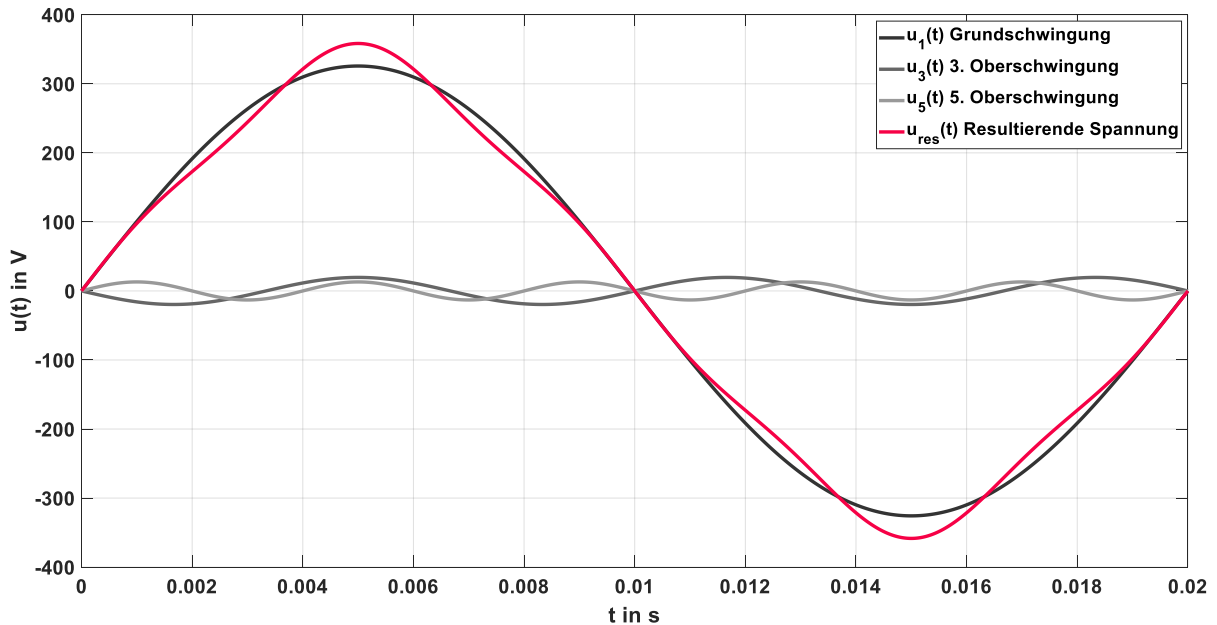


Abbildung 7 Zusammensetzung der Spannung bei der Prüfung „Überschwingen“ für Prüfling der Kl. 2

3.5.4 Prüfung der Störfestigkeit gegen Unsymmetrie nach IEC 61000-4-27

Beim vierten Prüfverfahren, das ausgewählt wurde, wird der Prüfling mit einer Folge aus Unsymmetrien beaufschlagt. Ausgehend von der fehlerfreien Betriebsspannung werden die Spannungsamplituden und -winkel der drei Phasen (L1, L2, L3) mit unsymmetrischen Werten betrieben, siehe Tabelle 12.

Nr.	Klasse 2				Klasse 3				Klasse X
	Phase	Amplitude (U/U _N)	Winkel	Zeit in s	Phase	Amplitude (U/U _N)	Winkel	Zeit in s	
1	U _a	100 %	0°	30	U _a	100 %	0°	60	
	U _b	95,2 %	125°		U _b	93,5 %	127°		
	U _c	90 %	240°		U _c	87 %	240°		
2	U _a	100 %	0°	15	U _a	100 %	0°	15	
	U _b	90 %	131°		U _b	87 %	134°		
	U _c	80 %	239°		U _c	74 %	238°		
3	U _a	110 %	0°	0,1	U _a	110 %	0°	2	
	U _b	66 %	139°		U _b	66 %	139°		
	U _c	71 %	235°		U _c	71 %	235°		

Tabelle 12 Prüfpegel für die Prüfung der Störfestigkeit gegen Unsymmetrie nach IEC 61000-4-27

Für die Klassen 2 und 3 sind jeweils drei verschiedene Prüfungen mit unterschiedlichen Prüfpegeln und -dauern definiert. Für Geräte der Klasse 1 ist keine Prüfung erforderlich. Außerdem können auch hier eigene Prüfpegel definiert werden, dabei wird nur vorgegeben dass die Werte mindestens denen von Klasse 2 entsprechen müssen wenn das zu testende Gerät an das öffentliche Niederspannungsnetz angeschlossen werden soll.

Wird eine Prüfung durchgeführt, müssen die Spannungswerte aus der Tabelle (U_a , U_b , U_c) nacheinander auf die drei Phasen (L1, L2, L3) angewendet werden, wie in Abbildung 8 verdeutlicht wird. Zwischen zwei Unsymmetriefolgen muss für drei Minuten zur symmetrischen Versorgungsspannung zurückgekehrt werden.

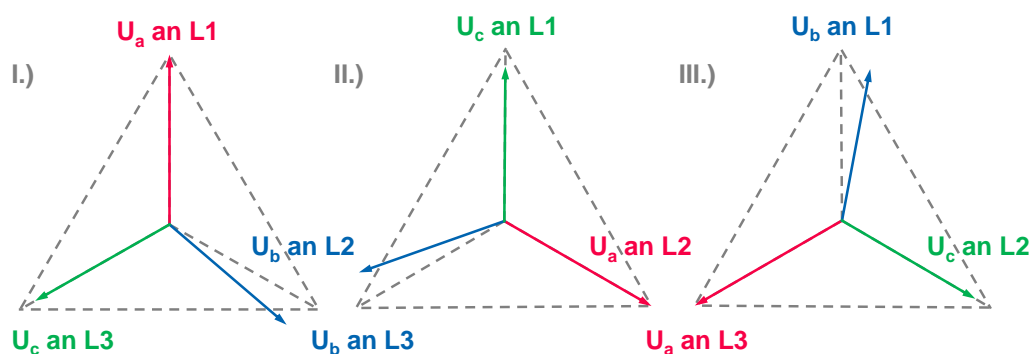


Abbildung 8 Beispiel des Ablaufs der Prüfung 3 für ein Gerät der Klasse 2

Der Übergang von der normalen Betriebsspannung zur Prüfspannung muss immer im Nulldurchgang der Phase, die keiner Phasenverschiebung unterliegt, geschehen bzw. die mit dem Prüfpegel U_a versorgt wird. Dies wird am Beispiel des Übergangs bei Prüfung 2 für ein Gerät der Klasse 2 in Abbildung 9 gezeigt.

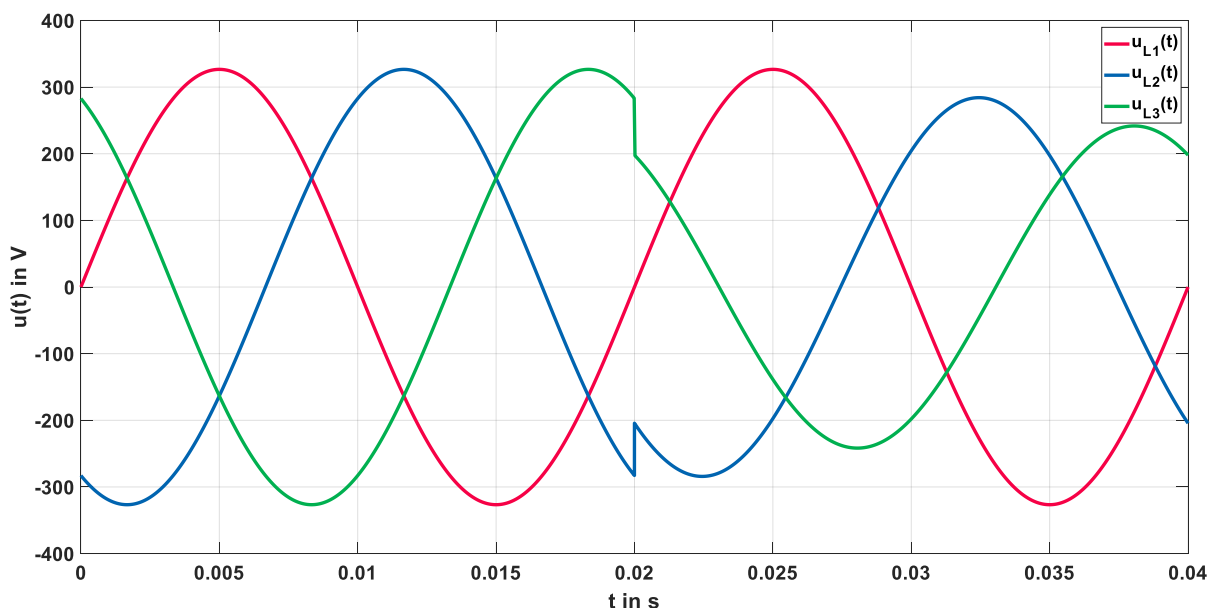


Abbildung 9 Übergang von fehlerfreier Betriebsspannung zu unsymmetrischer Prüfspannung

3.5.5 Bewertung der Prüfungsergebnisse

Es gibt keine genauen Kriterien, die festlegen, ob eine durchgeführte Prüfung bestanden oder nicht bestanden wurde. In den Normen wird lediglich eine Empfehlung angegeben, wie die Prüfungsergebnisse klassifiziert werden können. Diese ist in allen genannten Normen gleich und richtet sich danach, wie stark ein geprüftes Gerät von den getesteten Störungen beeinflusst wurde:

- Das geprüfte Gerät wurde durch die Prüfung nicht beeinträchtigt.
- Die Funktion des geprüften Geräts wurde während der Prüfung beeinträchtigt, nach Ende der Prüfung wurde ohne Eingreifen wieder ein normaler Betriebszustand erreicht.
- Die Funktion des geprüften Geräts wurde während der Prüfung beeinträchtigt, nach Ende der Prüfung konnte ohne Eingreifen aber nicht wieder ein normaler Betriebszustand erreicht werden.
- Das Gerät wurde dauerhaft beschädigt oder zerstört und es konnte kein normaler Betriebszustand mehr erreicht werden.

Welche Auswirkungen der Störgrößen auf das Gerät noch akzeptabel sind, kann vom Hersteller spezifiziert werden.

4 Modellbildung

Es wurde als Ziel gesetzt, ein Modell mit der Software Simulink[®] aufzubauen, mit dem Referenzspannungswerte für einen Leistungsverstärker berechnet werden. Die vom Modell berechneten Spannungswerte sollen dabei nicht starr vorgegeben werden, sondern sich durch die Belastung und die Netzimpedanz ändern. Außerdem sollen die zuvor genannten Prüfverfahren in das Modell implementiert werden.

Um das genannte Verhalten der Spannungsquelle zu erreichen wird aus einer Ersatzschaltung des Netzes ein System abgeleitet, das mit der Software nachgebildet werden kann. Im folgenden Abschnitt wird auf die mathematische Herleitung des Modells aus einem Ersatzschaltbild eingegangen. Anschließend wird beschrieben, wie das Modell mit MATLAB[®] und Simulink[®] aufgebaut wurde.

4.1 Herleitung des mathematischen Modells

Die Simulation der Netzimpedanz wird durch Verwendung des Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Konzepts erreicht. Es handelt sich dabei um eine Kombination aus Simulation und dem Einsatz von realer Hardware [37]. Die Simulation wird dabei von einem Echtzeitrechner durchgeführt welcher die Spannungen berechnet die an der HUT anliegen sollen. Die berechneten Spannungswerte werden einem Leistungsverstärker vorgegeben, der diese an seinen Ausgängen ausgibt. Die Ströme und Spannungen die sich an der HUT ergeben, werden gemessen und an den Echtzeitrechner zurückgegeben. Dieser berechnet mit dem implementierten Modell die neuen Spannungswerte. Durch dieses System ist es möglich eine veränderbare Netzimpedanz und verschiedene Netzzustände zu simulieren.

Die obere Darstellung in Abbildung 10 zeigt die einphasige Ersatzschaltung des Netzes und stellt den Ausgangspunkt der folgenden Herleitungen dar. Es handelt sich dabei um die Ersatzschaltung einer realen Spannungsquelle. Die Netzimpedanz Z_{Netz} entspricht der Innenimpedanz der Quelle, welche durch die HUT belastet wird. Die Spannung, die sich am Anschlusspunkt (PCC) ergibt, hängt von der Netzimpedanz und der angeschlossenen Belastung ab. Um die Netzimpedanz in einer Simulation darzustellen, wird das Ersatzschaltbild am PCC aufgeteilt. Die Form, wie sie in der Darstellung gezeigt wird, wird Ideal Transformer Methode ITM genannt. Dabei handelt es sich um eine einfache, aber ausreichend genaue Art, die Verbindung zwischen Hardware und Software zu realisieren [38].

Die gesteuerte Spannungsquelle auf der rechten Seite stellt die Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers dar. Die gesamte linke Seite entspricht einer Phase der Simulation, für die dann ein Modell in Simulink erstellt wird. Mit der Spannungsquelle u_{L1} wird die Netzspannung vorgegeben oder während eines Tests die Prüfspannung berechnet. Der Strom i_2 der durch die HUT fließt, wird gemessen und an den Echtzeitrechner zurückgegeben. Dies wird durch eine gesteuerte Stromquelle, die den Strom i_1 generiert, dargestellt. Die Spannung u_1 über der Stromquelle ergibt sich aus der

Netzspannung u_{L1} abzüglich des Spannungsabfalls an der Netzimpedanz, die durch den rückgekoppelten Strom bestimmt wird. Diese Spannung ist das Ergebnis der Simulation im Echtzeitrechner und dient als Referenzwert für die Spannungsausgabe des Leistungsverstärkers.

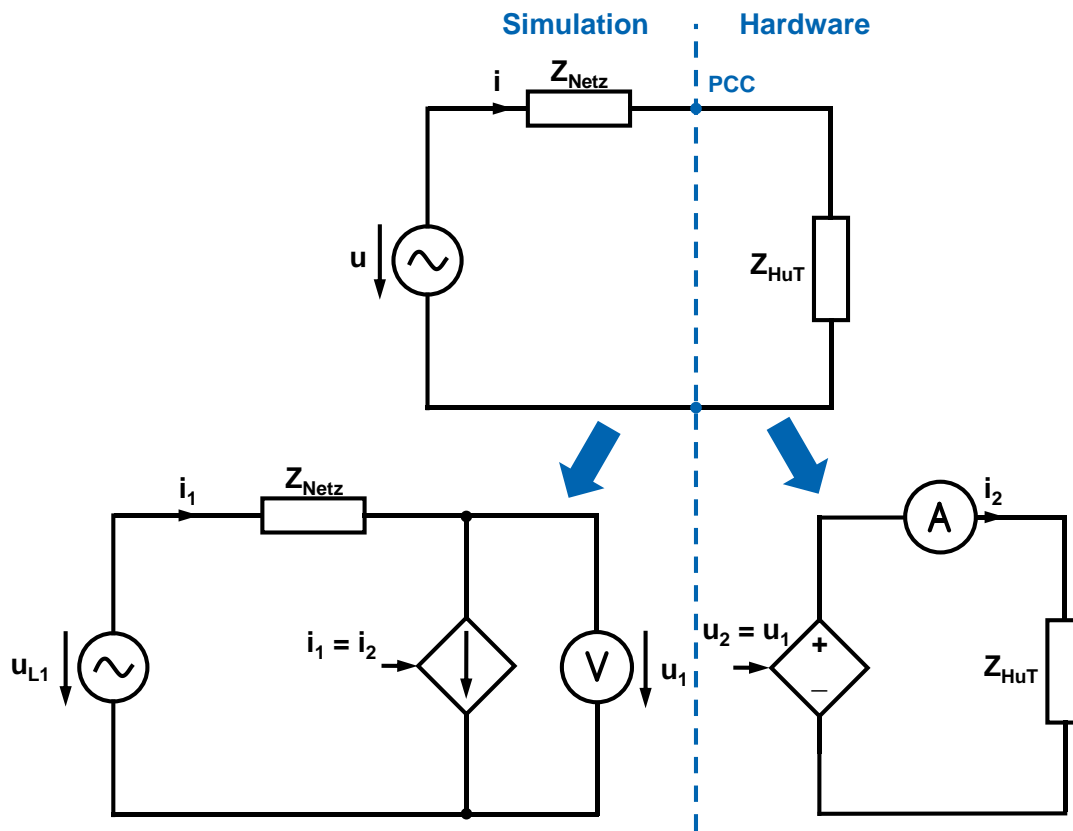


Abbildung 10 Einphasige Darstellung des PHIL-Konzepts

Bei dem Aufbau eines solchen Systems muss außerdem stets das Stabilitätskriterium eingehalten werden, dieses wird nach [39] aus dem Verhältnis der Netzimpedanz und der Impedanz der HUT bestimmt. Die Stabilität des Systems sollte also unter der Einhaltung folgender Bedingung gegeben sein:

$$\frac{Z_{\text{Netz}}}{Z_{\text{HUT}}} < 1 \quad (4.1)$$

4.1.1 Dreiphasiges Modell mit einer Netzimpedanz nach IEC/TR 60725

Das zuvor vorgestellte Konzept wird nun auf eine dreiphasige Spannungsversorgung angewendet, dies wird in Abbildung 11 gezeigt. Auf der rechten Seite wird das zu testende Gerät durch die drei Impedanzen $Z_{\text{HUT}1-3}$, die in Stern geschaltet sind, dargestellt. Die linke Seite, für die es ein Modell zu erstellen gilt, zeigt die Netzimpedanzen und die drei Quellen für die Versorgungsspannung. In einem ersten Schritt werden nur Längsimpedanzen vorgesehen wie beim Impedanznetzwerk, für welches vom technischen Bericht IEC/TR 60725 Referenzwerte vorgeschlagen werden, siehe Tabelle 7 und

Tabelle 8, wobei in diesem Modell zusätzlich die Möglichkeit besteht alle Impedanzen auch unsymmetrisch zu wählen.

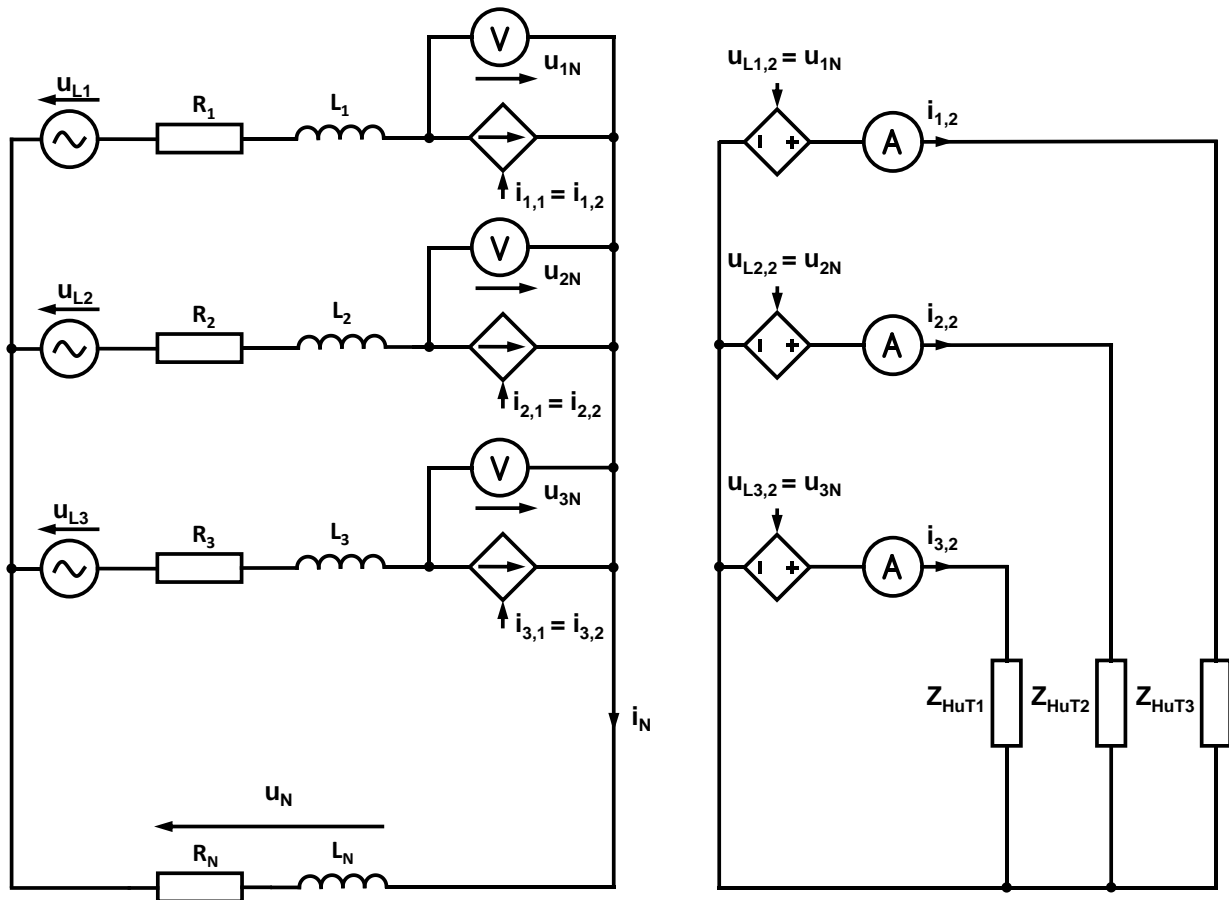


Abbildung 11 Schaltungsvorlage für die Modellierung mit Impedanznetzwerk nach IEC 61000-3-3

Die Gleichungen, die zur Modellbildung benötigt werden, erhält man durch die Bildung der Maschengleichungen auf der linken Seite. Die gesuchten Größen sind die Spannungen U_{1N} , U_{2N} und U_{3N} , welche auch die Ausgangsgrößen des Modells darstellen. Im komplexen dargestellt und in Matrixschreibweise angeschrieben sehen diese wie folgt aus:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{1N} \\ \underline{U}_{2N} \\ \underline{U}_{3N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{pmatrix} - \underline{\mathbf{Z}} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Wobei $\underline{\mathbf{Z}}$ die Impedanz-Matrix darstellt deren Elemente sich aus den Widerständen und Induktivitäten zusammensetzen.

$$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} R_1 + R_N + j\omega(L_1 + L_N) & R_N + j\omega L_N & R_N + j\omega L_N \\ R_N + j\omega L_N & R_2 + R_N + j\omega(L_2 + L_N) & R_N + j\omega L_N \\ R_N + j\omega L_N & R_N + j\omega L_N & R_3 + R_N + j\omega(L_3 + L_N) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Daraus ist ersichtlich dass durch die Induktivität L_N im Neutralleiter die induktiven Kopplungen zwischen den Leitern berücksichtigt werden. Die Impedanz des Mit- und Gegensystems kann dann mit der folgenden Formel berechnet werden unter der Annahme dass auch die Elemente der Hauptdiagonale dieselben Werte besitzen [40].

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12} = R_1 + j\omega L_1 \quad (4.4)$$

Die Impedanz des Nullsystems erhält man mit der folgenden Formel.

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_{11} + 2 \cdot \underline{Z}_{12} = R_1 + j\omega L_1 + 3 \cdot (R_N + j\omega L_N) \quad (4.5)$$

Für die weiteren Berechnungen wird zuerst auf die Schreibweise im Zeitbereich übergegangen:

$$\begin{pmatrix} u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 + R_N & R_N & R_N \\ R_N & R_2 + R_N & R_N \\ R_N & R_N & R_3 + R_N \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 + L_N & L_N & L_N \\ L_N & L_2 + L_N & L_N \\ L_N & L_N & L_3 + L_N \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{i}_{1,1} \\ \dot{i}_{2,1} \\ \dot{i}_{3,1} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Dieses Differenzialgleichungssystem kann so modelliert werden, allerdings nur im Bildbereich. Da zur Weiterverwendung auf Echtzeitrechnern nur Code verwendet werden kann, welcher zeitdiskrete Signale verwendet, wird zuerst gezeigt, wie auf diese übergegangen werden kann. Die beiden Matrizen werden dabei verkürzt dargestellt.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 + R_N & R_N & R_N \\ R_N & R_2 + R_N & R_N \\ R_N & R_N & R_3 + R_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 + L_N & L_N & L_N \\ L_N & L_2 + L_N & L_N \\ L_N & L_N & L_3 + L_N \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Mittels Laplace-Transformation wird in den Bildbereich übergegangen:

$$\begin{pmatrix} U_{1N}(s) \\ U_{2N}(s) \\ U_{3N}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{L1}(s) \\ U_{L2}(s) \\ U_{L3}(s) \end{pmatrix} - \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} I_{1,1}(s) \\ I_{2,1}(s) \\ I_{3,1}(s) \end{pmatrix} - s\mathbf{L} \cdot \begin{pmatrix} I_{1,1}(s) \\ I_{2,1}(s) \\ I_{3,1}(s) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Um dieses zeitkontinuierliche System zu diskretisieren, wird die Rückwärts-Euler-Approximation angewendet [41]. Damit wird durch Ersetzen von s vom Laplace-Bereich in den z -Bereich übergegangen, wobei T_S die Abtastzeit des verwendeten Systems ist.

$$s = \frac{z - 1}{z \cdot T_S} = \frac{1 - z^{-1}}{T_S} \quad (4.9)$$

Man erhält das resultierende Gleichungssystem (4.10), welches genauso in Simulink[®] modelliert werden kann.

$$\begin{pmatrix} U_{1N}(z) \\ U_{2N}(z) \\ U_{3N}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{L1}(z) \\ U_{L2}(z) \\ U_{L3}(z) \end{pmatrix} - \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} I_{1,1}(z) \\ I_{2,1}(z) \\ I_{3,1}(z) \end{pmatrix} - \mathbf{L} \cdot \frac{1}{T_S} \begin{pmatrix} I_{1,1}(z) - I_{1,1}(z) \cdot z^{-1} \\ I_{2,1}(z) - I_{2,1}(z) \cdot z^{-1} \\ I_{3,1}(z) - I_{3,1}(z) \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

4.1.2 Dreiphasiges Modell mit kapazitiven und zusätzlichen induktiven Kopplungen

Um das Verhalten eines realen Netzes noch besser nachzubilden, wird das Modell noch um Kapazitäten zwischen den einzelnen Leitern (C_{12} , C_{23} , C_{31}) und zwischen den Leitern und der Erde (C_{E1} , C_{E2} , C_{E3}) erweitert. Die Kapazitäten der Leitung werden mit ihrem vollen Wert nur ausgangsseitig hinzugefügt (Γ -Ersatzschaltung), nicht wie beim klassischen Π -Ersatzschaltbild [42] auf beiden Seiten je zur Hälfte. Dies liegt daran dass eingangsseitig eine Spannungsvorgabe erfolgt und an Kapazitäten die Spannung nicht beliebig vorgegeben werden kann. Eine sprunghafte Änderung der Spannung

würde theoretisch zu einem unendlich hohen Strom führen. Das resultierende Ersatzschaltbild ist in Abbildung 12 dargestellt.

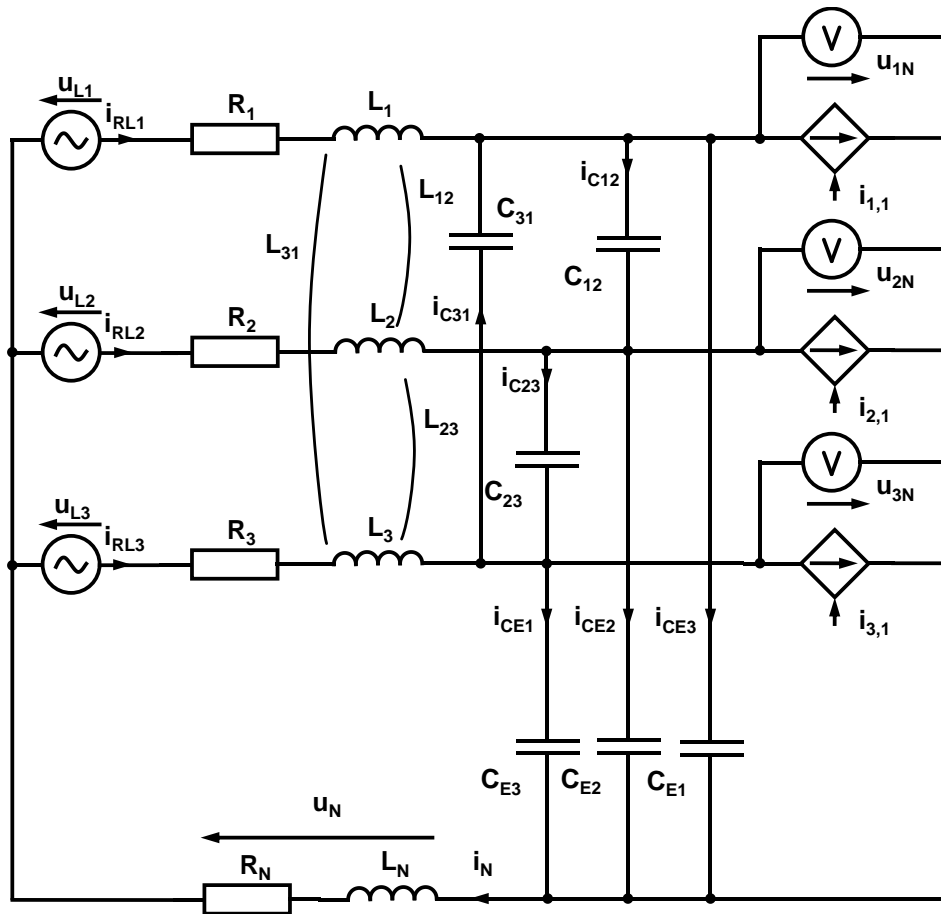


Abbildung 12 Erweitertes Modell mit zusätzlichen induktiven und kapazitiven Kopplungen

Wie in Abschnitt 4.1.1 werden hierbei wieder die Maschengleichungen aufgestellt und in Matrixform gebracht, um die Lösungen für die gesuchten Spannungen u_{1-3N} zu erhalten. Im Unterschied zu vorher ist der Strom durch die Längsimpedanz i_{RL} jetzt unbekannt.

$$\begin{pmatrix} u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{pmatrix} - \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} i_{RL1} \\ i_{RL2} \\ i_{RL3} \end{pmatrix} - \mathbf{L} \cdot \begin{pmatrix} \dot{i}_{RL1} \\ \dot{i}_{RL2} \\ \dot{i}_{RL3} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die Induktivitätsmatrix \mathbf{L} wird bei diesem Modell noch um die induktiven Kopplungen L_{12} , L_{23} und L_{31} . Diese haben grundsätzlich dieselbe Funktion wie die Induktivität L_N , für sie kann aber je für zwei Leiter ein unterschiedlicher Wert verwendet werden. Es handelt sich daher nur um eine Alternative die induktiven Kopplungen zu definieren im Vergleich zum ersten Modell. Die Widerstandsmatrix \mathbf{R} bleibt unverändert.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 + R_N & R_N & R_N \\ R_N & R_2 + R_N & R_N \\ R_N & R_N & R_3 + R_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 + L_N & L_N + L_{12} & L_N + L_{31} \\ L_N + L_{12} & L_2 + L_N & L_N + L_{23} \\ L_N + L_{31} & L_N + L_{23} & L_3 + L_N \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Um den unbekanntem Strom i_{RL} zu erhalten, werden nun die Knotengleichungen auf der Ausgangsseite benötigt.

$$\begin{aligned} i_{RL1} &= i_{CE1} + i_{C12} - i_{C31} + i_{1,1} \\ i_{RL2} &= i_{CE2} + i_{C23} - i_{C12} + i_{2,1} \\ i_{RL3} &= i_{CE3} + i_{C31} - i_{C23} + i_{3,1} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Die kapazitiven Ströme können durch die jeweiligen Strom-Spannungsbeziehungen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} i_{RL1} &= C_{E1} \cdot \dot{u}_{1N} + C_{12} \cdot (\dot{u}_{1N} - \dot{u}_{2N}) - C_{31} \cdot (\dot{u}_{3N} - \dot{u}_{1N}) + i_{1,1} \\ i_{RL2} &= C_{E2} \cdot \dot{u}_{2N} + C_{23} \cdot (\dot{u}_{2N} - \dot{u}_{3N}) - C_{12} \cdot (\dot{u}_{1N} - \dot{u}_{2N}) + i_{2,1} \\ i_{RL3} &= C_{E3} \cdot \dot{u}_{3N} + C_{31} \cdot (\dot{u}_{3N} - \dot{u}_{1N}) - C_{23} \cdot (\dot{u}_{2N} - \dot{u}_{3N}) + i_{3,1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Werden die Ströme wieder als Vektor dargestellt und die Knotengleichungen entsprechend umgeformt, erhält man eine Matrixform. Für die Kapazitätsmatrix \mathbf{C} ergeben sich dann die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_{RL1} \\ i_{RL2} \\ i_{RL3} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \end{pmatrix} + \mathbf{C} \cdot \begin{pmatrix} u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix} \\ \text{mit } \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} C_{E1} + C_{12} + C_{31} & -C_{12} & -C_{31} \\ -C_{12} & C_{E2} + C_{23} + C_{12} & -C_{23} \\ -C_{31} & -C_{23} & C_{E3} + C_{31} + C_{23} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Mithilfe der Gleichungen (4.11) und (4.15) werden nun die gesuchten Spannungen u_{1N} , u_{2N} und u_{3N} berechnet. Es handelt sich dabei um ein lineares zeitinvariantes System, welches in die folgende Form gebracht wird [43].

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \quad (4.16)$$

Dafür werden die beiden Gleichungen (4.8) und (4.12) umgeformt:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{i}_{RL1} \\ \dot{i}_{RL2} \\ \dot{i}_{RL3} \end{pmatrix} &= \mathbf{L}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{pmatrix} - \mathbf{L}^{-1} \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} i_{RL1} \\ i_{RL2} \\ i_{RL3} \end{pmatrix} - \mathbf{L}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix} &= \mathbf{C}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} i_{RL1} \\ i_{RL2} \\ i_{RL3} \end{pmatrix} - \mathbf{C}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Der Zustandsvektor \mathbf{x} besteht aus den gesuchten Spannungen u_{1N} , u_{2N} und u_{3N} und den Strömen durch die Längsimpedanz i_{RL1} , i_{RL2} und i_{RL3} . Die Zustandsmatrix \mathbf{A} wird aus der Widerstands-, Induktivitäts- und Kapazitätsmatrix zusammengesetzt.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} i_{RL1} \\ i_{RL2} \\ i_{RL3} \\ u_{1N} \\ u_{2N} \\ u_{3N} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L}^{-1} \cdot \mathbf{R} & -\mathbf{L}^{-1} \\ \mathbf{C}^{-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Der Eingangsvektor \mathbf{u} enthält die Netzspannungen u_{L1} , u_{L2} und u_{L3} sowie die Ströme $i_{1,1}$, $i_{2,1}$ und $i_{3,1}$ die von der HUT rückgekoppelt werden. Die Eingangsmatrix \mathbf{B} wird ähnlich wie \mathbf{A} zusammengesetzt.

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \\ i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{C}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Hier ist ersichtlich, dass die Kapazitäten in diesem Modell nicht einfach Null gesetzt werden dürfen um ein rein ohmsch-induktives Verhalten zu erreichen, da die Kapazitätsmatrix \mathbf{C} sonst singulär wird und die Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} nicht mehr berechnet werden können. Außerdem würde ein Nullsetzen der Kapazitäten ein Entfallen der Gleichung (4.15) bedeuten. Dies ist auch ein Grund dafür warum zwei Modelle für die Netzimpedanz erstellt wurden.

Zur Lösung des obigen Systems wird durch Anwendung der Laplace-Transformation in den Bildbereich übergegangen.

$$\mathbf{X}(s) \cdot s = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(s) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(s) \quad (4.19)$$

Davon kann mit der bereits erwähnten Rückwärts-Euler-Approximation (4.9) in den z-Bereich übergegangen werden.

$$\mathbf{X}(z) \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_S} \right) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(z) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(z) \quad (4.20)$$

Das Gleichungssystem kann nun durch Umformung gelöst werden, wobei $\mathbf{X}(z)z^{-1}$ zu den bekannten Größen zählt, da es das Ergebnis des letzten Rechenschritts darstellt.

$$\mathbf{X}(z) - \mathbf{X}(z)z^{-1} = T_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(z) + T_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(z)$$

$$\mathbf{X}(z) \cdot (\mathbf{E} - T_S \mathbf{A}) = \mathbf{X}(z)z^{-1} + T_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(z)$$

$$\mathbf{X}(z) = (\mathbf{E} - T_S \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{X}(z)z^{-1} + T_S (\mathbf{E} - T_S \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(z)$$

Damit können die Systemmatrix \mathbf{A}_d und die Eingangsmatrix \mathbf{B}_d des zeitdiskreten Systems definiert werden.

$$\mathbf{A}_d = (\mathbf{E} - T_S \mathbf{A})^{-1} \quad \text{und} \quad \mathbf{B}_d = T_S (\mathbf{E} - T_S \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \quad (4.21)$$

Somit erhält man das vollständige zeitdiskrete System im z-Bereich, welches das Verhalten des obigen Modells der Netzimpedanz beschreibt. In dieser zeitdiskreten Form kann das Modell mit Hilfe von weiterer Software auf einem Echtzeitrechner implementiert werden.

$$\begin{pmatrix} I_{RL1}(z) \\ I_{RL2}(z) \\ I_{RL3}(z) \\ U_{1N}(z) \\ U_{2N}(z) \\ U_{3N}(z) \end{pmatrix} = \mathbf{X}(z) = \mathbf{A}_d \cdot \mathbf{X}(z)z^{-1} + \mathbf{B}_d \cdot \mathbf{U}(z) \quad \text{mit} \quad \mathbf{U}(z) = \begin{pmatrix} U_{L1}(z) \\ U_{L2}(z) \\ U_{L3}(z) \\ I_{1,1}(z) \\ I_{2,1}(z) \\ I_{3,1}(z) \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

4.2 Modellierung in Simulink®

In diesem Teil wird der Aufbau des Modells mit der Software Simulink® und auf die Einbindung der zuvor beschriebenen Gleichungen und Prüfungen eingegangen. Damit das Modell in definierten Zeitschritten verarbeitet werden kann, wurde es mit zeitdiskreten Blöcken aufgebaut. Außerdem wurde bei der Modellierung darauf geachtet, nur HDL-kompatible Blöcke zu verwenden. Damit ist es möglich aus dem Simulink Modell HDL Code zu erzeugen. Dies bietet die Möglichkeit das Modell später auf einem FPGA zu integrieren.

Das Gesamtsystem, welches simuliert wurde, wird in Abbildung 13 gezeigt. Der linke Block enthält die Berechnung der Spannungswerte, die an die gesteuerten Spannungsquellen weitergegeben werden, an welche die HUT angeschossen ist. Als Eingangsgröße erhält er die Phasenströme, die aufgrund der Versorgungsspannung durch die HUT fließen. Der Block „Netzsimulation“ ist dann für die weitere Verwendung in einem Echtzeitrechner bestimmt.

Die rechte Seite, welche blau hinterlegt ist, stellt die HUT dar. In diesem Fall besteht sie aus drei ohmsch-induktiven Lasten. Dieser Teil wird nicht in dem Echtzeitrechner verwendet, sondern dient nur zu Simulationszwecken, daher konnten die Standardkomponenten der Simscape Bibliothek benutzt werden. Dieser Block repräsentiert die reale HUT, welche an einem spannungsgeregelten Leistungsverstärker angeschossen ist.

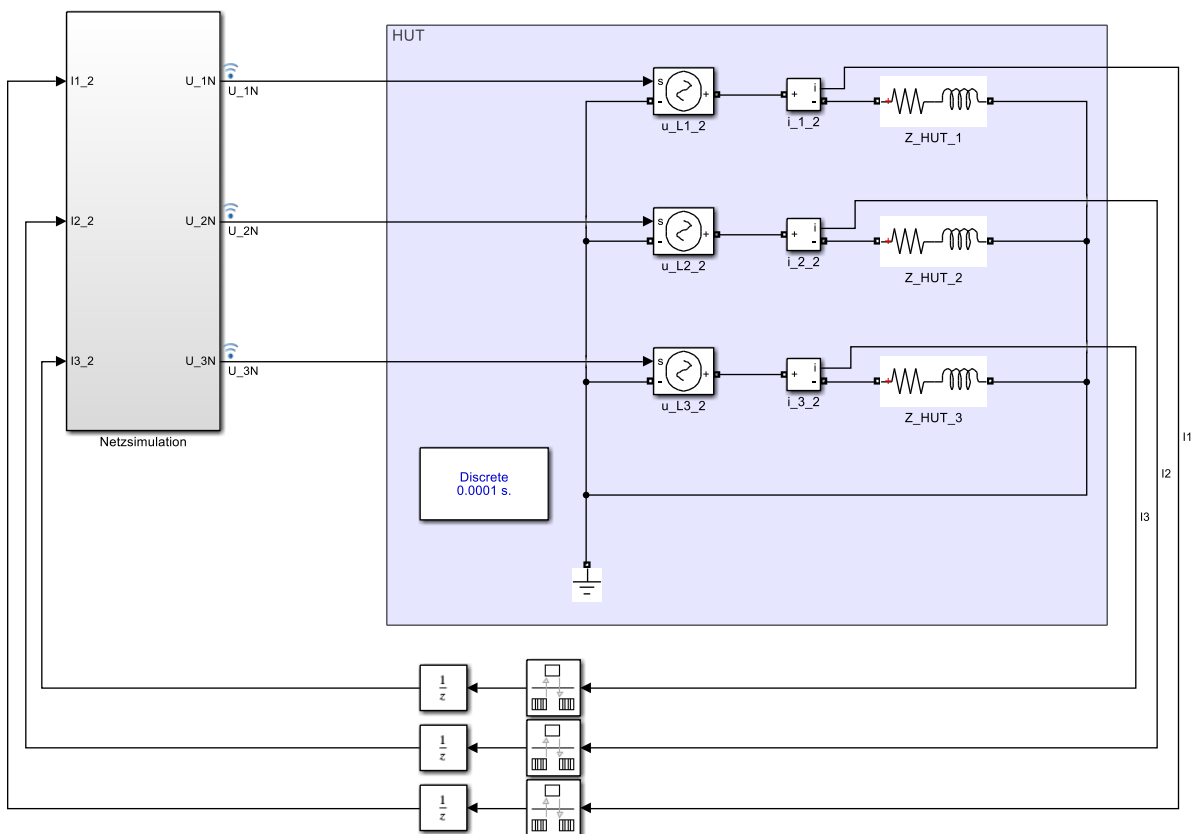


Abbildung 13 Überblick über das simulierte Gesamtsystem

Die rückgekoppelten Messwerte werden in der Simulation um einen Zeitschritt verzögert um algebraische Schleifen aufzulösen. In der Realität wird diese Zeit durch die Verzögerung des Messsystems zur Bestimmung der Phasenströme abgelöst.

Der Inhalt des Blockes „Netzsimulation“ wird in Abbildung 14 näher dargestellt. Er kann im Wesentlichen in drei Teile unterteilt werden: der Erzeugung der Prüfpegel in Abhängigkeit der Zeit, der Erstellung der dreiphasigen Prüfspannung und die Simulation der Netzimpedanz.

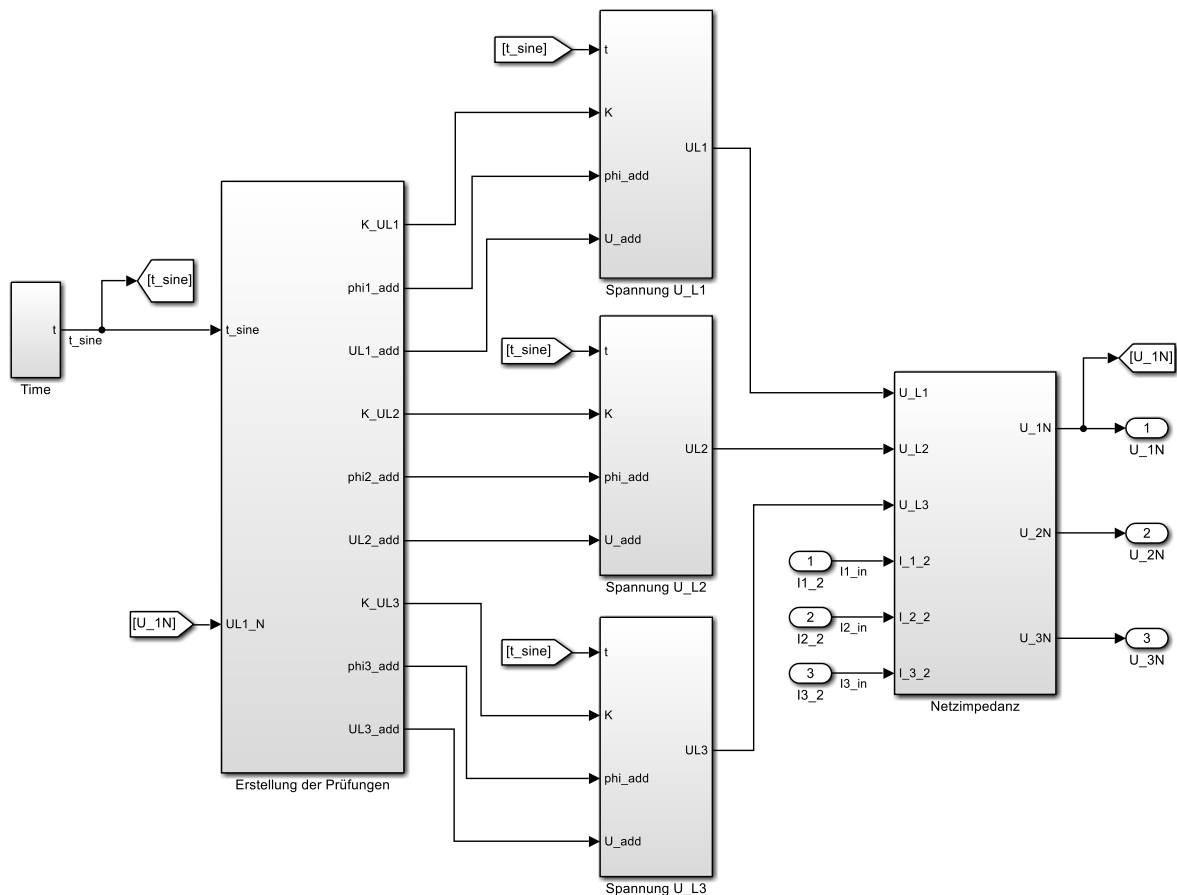


Abbildung 14 Überblick über den Inhalt des Blockes "Netzsimulation"

Die Erzeugung der Netzspannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} wird durch die mittleren Blöcke im Bild dargestellt. Mit den Blöcken „Spannung U_L1-2-3“ wird die fehlerfreie Netzspannung erzeugt. Diesem wird während einer Prüfung vom Block „Erstellung der Prüfungen“ ein Verstärkungsfaktor für die Amplitude, eine Phasenverschiebung oder ein überlagertes Signal vorgegeben, um die benötigte Prüfspannung zu generieren. Die erstellten Spannungen werden dann an den Block „Netzimpedanz“ übergeben, dieser berechnet mithilfe der gemessenen Ströme an der HUT und den vorgegebenen Spannungen den Spannungsabfall an einer fiktiven Netzimpedanz. Dessen Ausgang bildet dann das Ergebnis des Modells und wird als Spannungsvorgabe für den Leistungsverstärker genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Leistungsverstärker in der Lage ist, die vorgegebenen Spannungen zu erstellen. Dessen Regelung muss daher schnell genug sein um diese Anforderung zu erfüllen. Auf den genauen Inhalt der jeweiligen Blöcke wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

4.2.1 Erstellung der Netzspannung

Ausgangspunkt für die Erstellung der Prüfspannung ist die fehlerfreie Netzspannung, der Inhalt des Blocks „Spannung U_L1“, wird in Abbildung 15 dargestellt. Für den Fall, wenn keine Prüfung durchgeführt wird, wird damit die zeitdiskrete Ausgangsspannung nach Formel (4.20) berechnet.

$$u_{L1}(nT_S) = \hat{U}_N \cdot \sin(\omega_N \cdot n \cdot T_S + \varphi_{UL1}) \quad (4.23)$$

Für die Umsetzung der Prüfverfahren wird (4.23) dann noch um einige Parameter erweitert, welche vom vorgeschalteten Block „Erzeugung der Prüfverfahren“ vorgegeben werden. Durch den Eingang K kann so z. B ein Verstärkungsfaktor für die Amplitude vorgegeben werden, im fehlerfreien Fall ist dieser eins. Mit dem Eingang „phi_add“ kann eine Phasenverschiebung erreicht werden und mit dem Eingang „U_add“ kann die fehlerfreie Spannung mit einem zusätzlichen Signal überlagert werden. Sie werden dann je nach Prüfverfahren zeitabhängig vorgegeben:

$$u_{L1}(nT_S) = K_{UL1} \cdot \hat{U}_N \cdot \sin(\omega_N \cdot n \cdot T_S + \varphi_{UL1} + \varphi_{prüf}) + u_{L1,add} \quad (4.24)$$

So wird zum Beispiel für einen Spannungseinbruch um 30 % in Phase L1, der Faktor K_{UL1} zu einem definierten Zeitpunkt von 1 auf 0,7 verändert. Dementsprechend wird dies auch mit dem Phasenwinkel $\varphi_{prüf}$ oder der Spannung $u_{L1,add}$ durchgeführt.

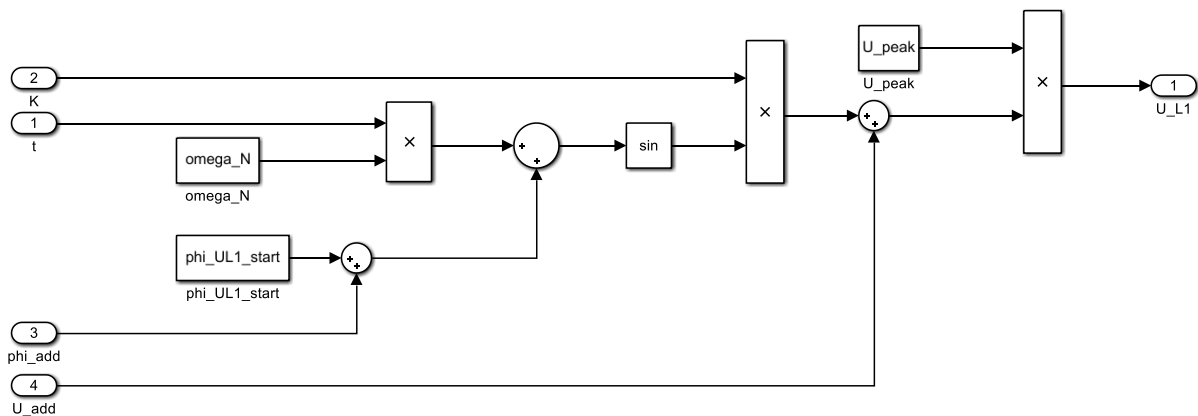


Abbildung 15 Inhalt des Blockes zur Erzeugung der Spannung U_{L1}

Die Spannungen U_{L2} und U_{L3} werden analog dazu erzeugt, wobei ihre Phasenlage um 120° verschoben wird. Die dabei benötigten Parameter sind in Tabelle 13 beschrieben. werden mittels einer Sie werden vor Simulationsstart mit einer MATLAB® Datei initialisiert welche im Anhang in Abschnitt 8.1 angeführt ist. Es ist also möglich, Amplitude, Frequenz und Phasenlage frei einzustellen. Dies wurde dann auch bei der Erstellung der Prüfverfahren beachtet, da besonders eine variable Frequenz die Anfangs- und Endzeitpunkte einer Prüfung beeinflusst.

Parameter	Beschreibung
U_peak	Amplitude der Netzspannung \hat{U}_N
omega_N	Kreisfrequenz der Netzspannung ω_N
phi_UL1_start	Startwinkel der Netzspannung φ_{UL1}

Tabelle 13 Parameter für die Berechnung der Netzspannung

4.2.2 Erstellung der Prüfungen

Mit diesem Block werden die vier Prüfverfahren, die in Abschnitt 3.5 beschrieben wurden, umgesetzt. Er gibt, der im Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Spannungserzeugung, Werte für den Amplitudenfaktor und die Phasenverschiebung oder eine Spannung, die der Netzspannung überlagert wird, vor. Als Eingang dienen die Simulationszeit und die Ausgangsspannung des Gesamtsystems. Die Simulationszeit wird für die Prüfungen „Flache Kurve“ und „Überschwingen“ benötigt, um die entsprechenden Signalverläufe zu erstellen. Die Ausgangsspannung der Phase L1 wird für die Prüfungen „Spannungseinbrüche“ und „Unsymmetrie“ benötigt, um den Prüfungsbeginn mit dem Nulldurchgang der Ausgangsspannung zu synchronisieren. Da es durch die simulierte Netzimpedanz zu einer Phasenverschiebung zwischen der berechneten Spannung U_{L1} und der Ausgangsspannung des gesamten Modells U_{1N} kommt, kann U_{L1} nicht für den Prüfungsbeginn herangezogen werden.

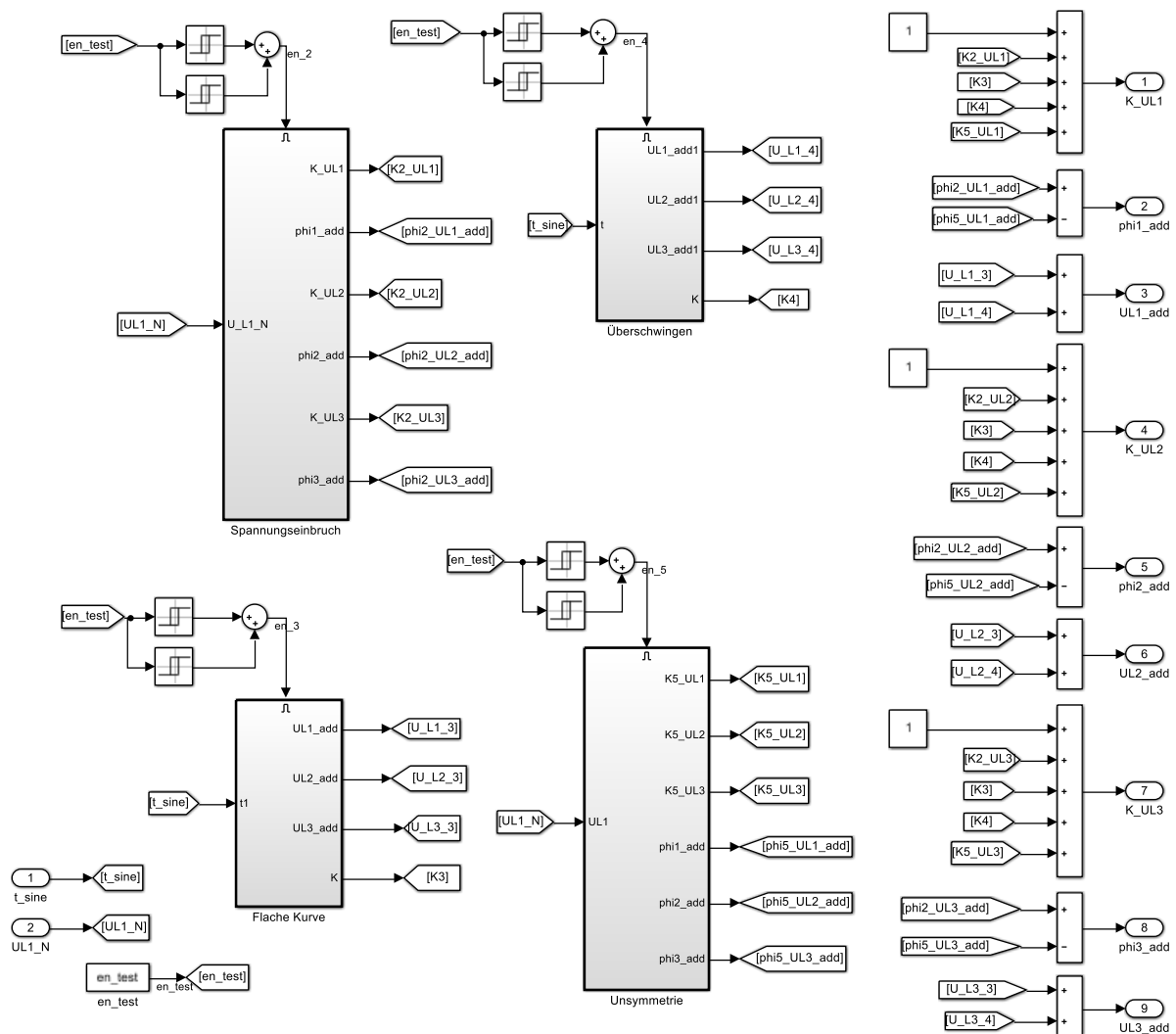


Abbildung 16 Simulink Block "Erstellung der Prüfungen"

Mit dem in Tabelle 14 beschriebenen Parameter (en_test) wird ausgewählt, welche der Prüfungen durchgeführt werden soll, wobei es auch möglich ist die unveränderte Netzspannung auszugeben. Die Prüfungen „Flache Kurve“ und „Überschwingen“ werden unmittelbar nach Wahl des entsprechenden

Werts gestartet. Die Prüfungen „Spannungseinbruch“ und „Unsymmetrie“ enthalten einen ganzen Prüfablauf, der nach Wahl des Parameters mit Verzögerung gestartet wird und automatisch abläuft.

Parameter	Wert	Beschreibung
en_test =	1	Keine Prüfung
	2	Prüfung „Spannungseinbruch“ wird ausgeführt
	3	Prüfung „Flache Kurve“ wird ausgeführt
	4	Prüfung „Überschwingen“ wird ausgeführt
	5	Prüfung „Unsymmetrie“ wird ausgeführt

Tabelle 14 Parameter zur Prüfungsauswahl

4.2.3 Prüfung von Spannungseinbrüchen

Das Prüfverfahren für Spannungseinbrüche wird durch Block „Spannungseinbruch“ in Abbildung 16 erzeugt. Die detaillierte Zusammenschaltung der Blöcke ist in Abbildung 17 dargestellt. Es erzeugt eine Folge von Spannungseinbrüchen in allen drei Strängen sowie in allen verketteten Spannungen, ein Überblick über den gesamten Prüfablauf ist in Abbildung 5 gegeben. Die Spannungseinbrüche werden durch Vorgabe eines Wertes für den Amplitudenfaktor K_{UL1-3} für den Block zur Erzeugung der Netzspannung, siehe Abbildung 15, erzeugt.

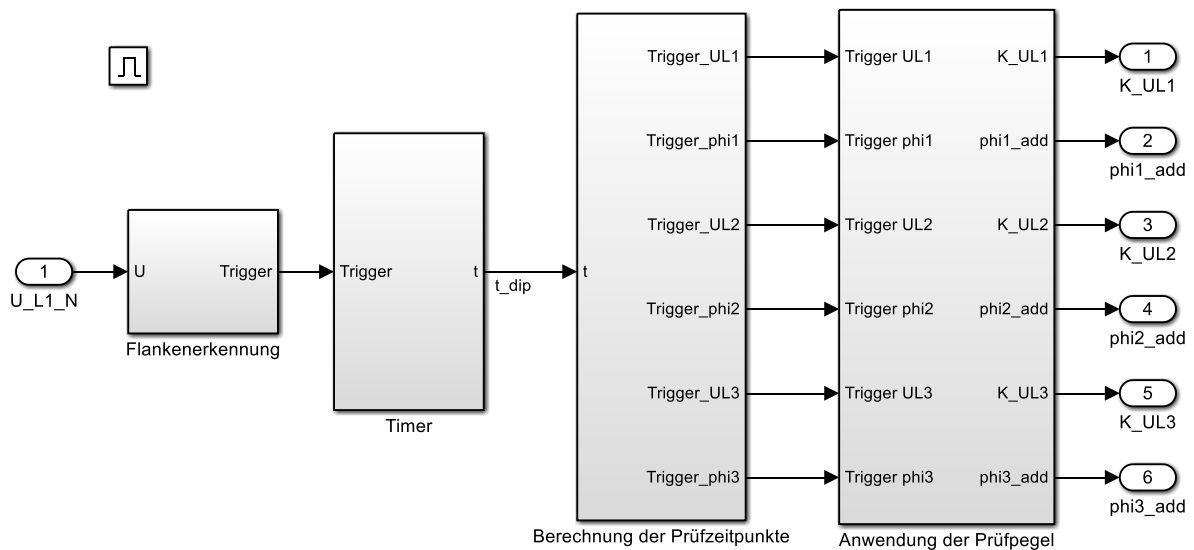


Abbildung 17 Inhalt des Blocks "Spannungseinbruch"

Als Eingangssignal dient die zurückgeführte Ausgangsspannung des Modells U_{1N} . Wird die Prüfung durch Wahl eines definierten Wertes des Parameters en_test aktiviert, erkennt die Flankenerkennung den ersten positiven Nulldurchgang der Spannung und startet den Timer. Dieser gibt die Prüfungszeit, beginnend bei null am Prüfungsbeginn, aus und wird benötigt um Anfang und Ende eines Spannungseinbruchs zu definieren. Seine Funktion sowie die Funktion der Flankenerkennung ist im Anhang in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt. Die Flankenerkennung ist deshalb nötig, da die Spannungseinbrüche bei einem definierten Phasenwinkel der Spannung erfolgen müssen. Die Ausgangsspannungen des gesamten Modells (u_{1N} , u_{2N} , u_{3N}) sind durch die simulierte Netzimpedanz aber phasenverschoben zu der idealen Spannung (u_{L1} , u_{L2} , u_{L3}). Ein Einbruch der idealen Spannung

bei einem vorgegebenen Phasenwinkel würde also zu einem Einbruch der Ausgangsspannung bei einem anderen Phasenwinkel führen. Da die genaue Phasenlage der Ausgangsspannung unbekannt ist, wird diese zurückgeführt und mit der Flankenerkennung detektiert, um die Prüfzeitpunkte mit der Ausgangsspannung des gesamten Modells zu synchronisieren.

Der Block „Berechnung der Prüfzeitpunkte“ enthält eine Reihe von Triggern, welche die Spannungseinbrüche zu den entsprechenden Zeitpunkten der Prüfung auslösen. Sein genauer Inhalt ist im Anhang in Abbildung 51 dargestellt.

Die genauen Zeitpunkte werden mit einem MATLAB® Skript, siehe Anhang 8.1, vor Prüfungsbeginn berechnet. Dabei muss beachtet werden, dass die Spannungseinbrüche bei einem definierten Phasenwinkel der Spannung erfolgen sollen. Da das System mit dem positiven Nulldurchgang der Phase L1 gestartet wird, muss für einen Spannungseinbruch der beiden anderen Phasenspannungen die Phasenverschiebung dazwischen bei der Berechnung der Prüfzeitpunkte berücksichtigt werden. Außerdem sind sie von der gewählten Fehlerdauer, Pausenzeit und vom Phasenwinkel bei Fehlereintritt abhängig. Die entsprechenden Parameter, die in der Initialisierungsdatei gewählt werden, um die Höhe und Dauer der Spannungseinbrüche zu bestimmen, sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Durch die Wahl dieser Parameter können die Prüfpegel für Spannungseinbrüche aus Tabelle 9 eingestellt und erzeugt werden.

Parameter	Beschreibung
U_rest	Restspannung während der Prüfung in U/U_N
N	Fehlerdauer in Anzahl der Perioden der Netzspannung
T_pause2	Dauer der Pause zwischen den Spannungseinbrüchen
phi_fail	Phasenwinkel bei dem der Spannungseinbruch eintritt

Tabelle 15 Parameter zur Bestimmung der Spannungseinbrüche

Der vierte Block dient dazu, aufgrund des Trigger-Signals vom vorgelagerten Block „Berechnung der Prüfzeitpunkte“ den dazugehörigen Prüfpegel einer der drei Phasen zuzuweisen. Der Ausgang des Blocks besteht nicht nur aus den Amplitudenfaktoren, sondern auch aus der Vorgabe der Phasenverschiebung, dies ist nötig, um auch einen Spannungseinbruch in der verketteten Spannung zu erzeugen, obwohl nur die Phasenspannung verändert wird. Da es sich bei dem Block um eine reine Zuweisung von Parametern zu den Ausgängen handelt wird sein Inhalt im Anhang in Abbildung 53 dargestellt. Beispielsweise wird für einen Einbruch der Spannung U_{12} die Spannung U_{L1} in Amplitude und Winkel angepasst um dies zu ermöglichen, siehe Abbildung 4. Die Umrechnung eines solchen Spannungseinbruches erfolgt mit komplexer Rechnung, wie nachfolgend gezeigt wird:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1,neu} &= K_{12} \cdot \underline{U}_{12} + \underline{U}_{L2} \\ K_{UL1} \hat{U} \cdot e^{j(0 + \varphi_{UL1})} &= K_{12} \sqrt{3} \hat{U} \cdot e^{\frac{j\pi}{6}} + \hat{U} \cdot e^{-\frac{j2\pi}{3}} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Aus dieser Beziehung kann dann abgeleitet werden, wie Amplitude und Phase der Spannung U_{L1} verändert werden müssen, um den vorgegebenen Faktor für die Restspannung der Verketteten zu erreichen. Die berechneten Werte sind für alle drei Phasen gleich und werden mittels der Initialisierungsdatei, siehe Abschnitt 8.1, ermittelt.

$$K_{UL1} = \left| K_{12}\sqrt{3} \cdot e^{\frac{j\pi}{6}} + e^{-\frac{j2\pi}{3}} \right|$$

$$\varphi_{UL1} = \arctan \left(\frac{\operatorname{Im} \left\{ K_{12}\sqrt{3} \cdot e^{\frac{j\pi}{6}} + e^{-\frac{j2\pi}{3}} \right\}}{\operatorname{Re} \left\{ K_{12}\sqrt{3} \cdot e^{\frac{j\pi}{6}} + e^{-\frac{j2\pi}{3}} \right\}} \right) \quad (4.26)$$

4.2.4 Prüfung „Flache Kurve“

Bei diesem Prüfverfahren handelt es sich um ein Oberschwingungsprüfverfahren, welches in dem Modell enthalten ist. Dabei wird in allen drei Phasen der Prüfspannung eine Spannungsform entsprechend der Abbildung 6 vorgegeben. Um diese mit Simulink[®] zu generieren, wird die erzeugte Netzspannung um einen Faktor K_y , siehe Tabelle 10, multipliziert und dann ein entsprechendes Signal addiert. Dies wird für die Phase L1 anhand der folgenden Formeln gezeigt:

$$u_{L1,res}(nT_s) = K_y \cdot u_{L1}(nT_s) + u_{L1,add}(nT_s) \quad (4.27)$$

Die Spannung $u_{L1,add}$ wird der Netzspannung überlagert, um den flachen Teil der Kurve zu erhalten.

$$u_{L1,add}(nT_s) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq |\sin(\omega_N t)| \leq \alpha \\ K_y \cdot \hat{U}_N \cdot \sin(\omega_N \cdot n \cdot T_s + \varphi_{UL1}) & \text{für } \alpha \leq |\sin(\omega_N t)| \leq 1 \end{cases} \quad (4.28)$$

Die einzelnen Komponenten der resultierenden Spannungsform sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Werte für K_y und α für die Erstellung des Diagramms wurden dabei nach Klasse 3 in Tabelle 10 gewählt. Die resultierende Signalform wird mit dem eingestellten Amplitudenwert der Netzspannung multipliziert, welcher bei Nennspannung 325 V beträgt. In den anderen beiden Phasen L2 und L3, wird dieselbe Signalform angewendet, wobei die dementsprechende Phasenverschiebung der jeweiligen Phase mitberücksichtigt wird.

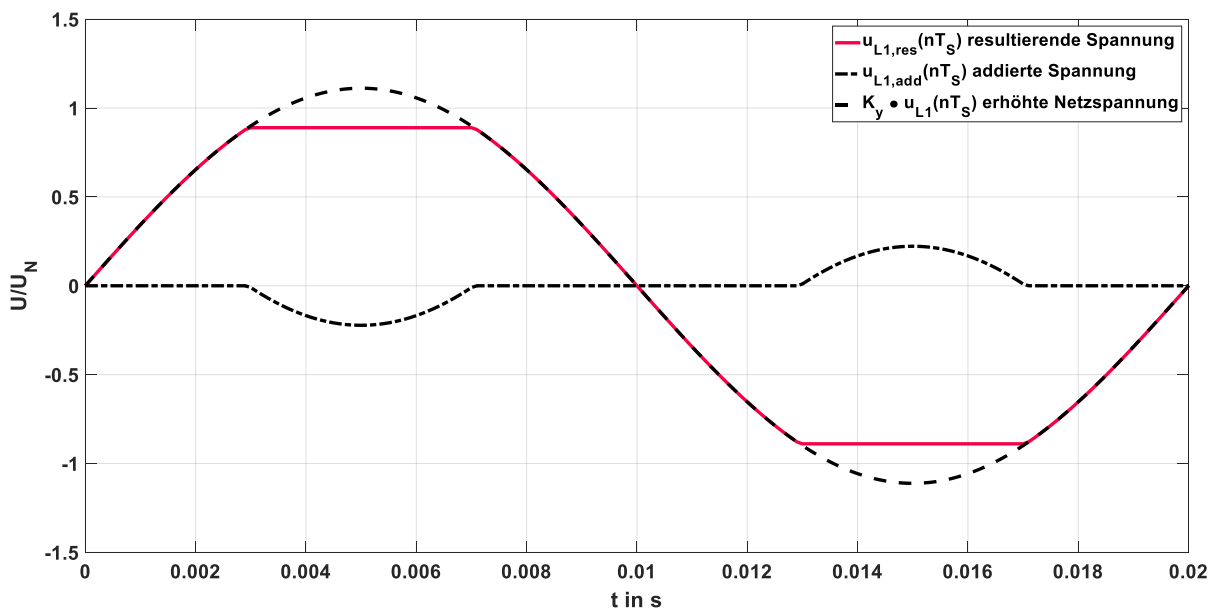


Abbildung 18 Bestandteile der Prüfspannungsform "Flache Kurve" für Phase L1

Abbildung 19 zeigt die Kurvenverläufe, wie die Erstellung der Prüfspannung mit Simulink® modelliert wurde. Wie bei der Prüfung für Spannungseinbrüche in Abschnitt 4.2.3 wird das Prüfverfahren durch entsprechende Wahl des Parameters en_test , siehe Tabelle 14, gestartet. Danach wird ohne Verzögerung die Prüfspannung auf alle drei Phasen angewendet. Als Eingang wird nur die Simulationszeit benötigt, um die Überlagerungsspannung zu erzeugen. An den Ausgängen werden die Spannungen ausgegeben, die zu den drei Netzspannungen addiert werden und der Faktor K_y , um den die Netzspannung ab Prüfungsbeginn erhöht wird.

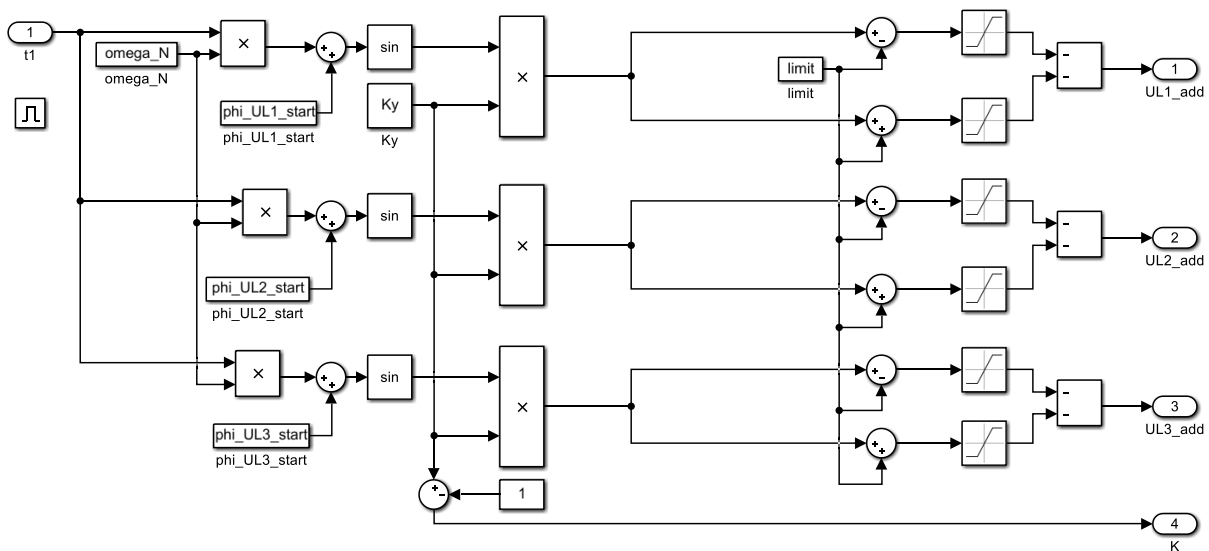


Abbildung 19 Modell zur Erzeugung der Prüfung "Flache Kurve"

Die Parameter, welche in der Initialisierungsdatei gewählt werden und die Kurvenform beeinflussen, sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet. Durch die Wahl der Klasse werden die Begrenzung der flachen Kurve α und der Amplitudenfaktor K_y nach Tabelle 10 bestimmt, zusätzlich können sie aber auch frei bestimmt werden.

Parameter	Beschreibung
class	Auswahl der Prüfklasse (1, 2, 3)
limit	Begrenzung α der flachen Kurve in $U/(K_y \cdot U_N)$
Ky	Amplitudenfaktor

Tabelle 16 Parameter zur Bestimmung der „flachen Kurve“

4.2.5 Prüfung „Überschwingen“

Das Prüfverfahren „Überschwingen“ ist das zweite Prüfverfahren für Oberschwingungen, welches aus den Normen übernommen und mit Simulink® modelliert wurde. Wie beim Prüfverfahren „Flache Kurve“ wird die Prüfspannung auf alle drei Phasen gleichzeitig angewendet. Die in Abschnitt 3.5.3 gezeigte Spannungsform wird durch Überlagerung der fehlerfreien Netzspannung mit der dritten und fünften Oberschwingung erreicht. Die Überlagerungsspannung wird dabei durch die folgende Formel bestimmt.

$$u_{L1,add}(nT_S) = \frac{U_3}{U_1} \cdot \sin(3 \cdot \omega_N \cdot n \cdot T_S + \pi + \varphi_{UL1}) + \frac{U_5}{U_1} \cdot \sin(5 \cdot \omega_N \cdot n \cdot T_S + \varphi_{UL1})] \quad (4.29)$$

Zusätzlich zu den Überlagerungsspannungen wird der Faktor K_{U1} vorgegeben, dieser dient dazu, die Grundschiwingung der Netzspannung anzupassen, um den Effektivwert des resultierenden Signals bei 230 V zu belassen. Er wird mittels Formel (3.5) vorab in MATLAB® berechnet. Diese Spannungsform wird, mit Ausnahme der Phasenverschiebung, für alle drei Phasen gleich erstellt. Eingang des Systems in Abbildung 20 ist nur die Simulationszeit, die benötigt wird um die drei Ausgangssignale zu erzeugen. Durch Parameter „u_h3“ und „u_h5“ wird das Verhältnis der Oberschwingungsamplituden zur Grundschiwingungsamplitude bestimmt.

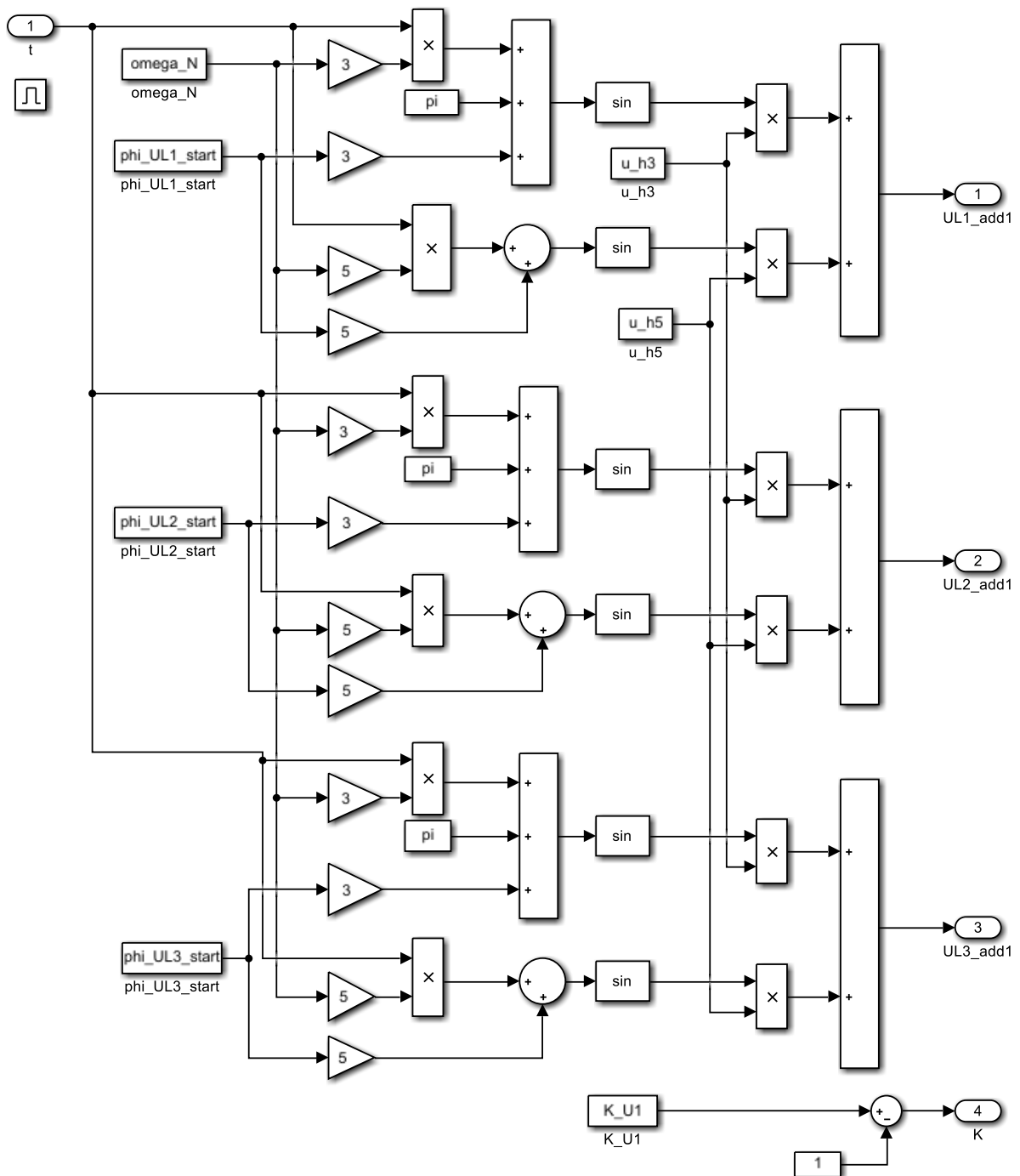


Abbildung 20 Modell zur Erzeugung der Prüfung "Überschwingen"

Die Kurvenform wird wieder durch die Wahl der Prüfklasse bestimmt, durch sie wird die Höhe der überlagerten Oberschwingungen anhand Tabelle 11 bestimmt. Zusätzlich können abweichende Parameter für die Oberschwingungen verwendet werden, welche ebenfalls in der folgenden Tabelle aufgezählt sind.

Parameter	Beschreibung
class	Auswahl der Prüfklasse (1, 2, 3)
u_h3	Amplitude der 3. Oberschwingung im Verhältnis zur Grundschwingung U_3/U_1
u_h5	Amplitude der 5. Oberschwingung im Verhältnis zur Grundschwingung U_5/U_1

Tabelle 17 Parameter zur Bestimmung des "Überschwingens"

Die einzelnen Bestandteile der resultierenden Spannung während einer Prüfung werden in Abbildung 21 beispielhaft für die Phase L1 bei einer Prüfung der Klasse 3 gezeigt.

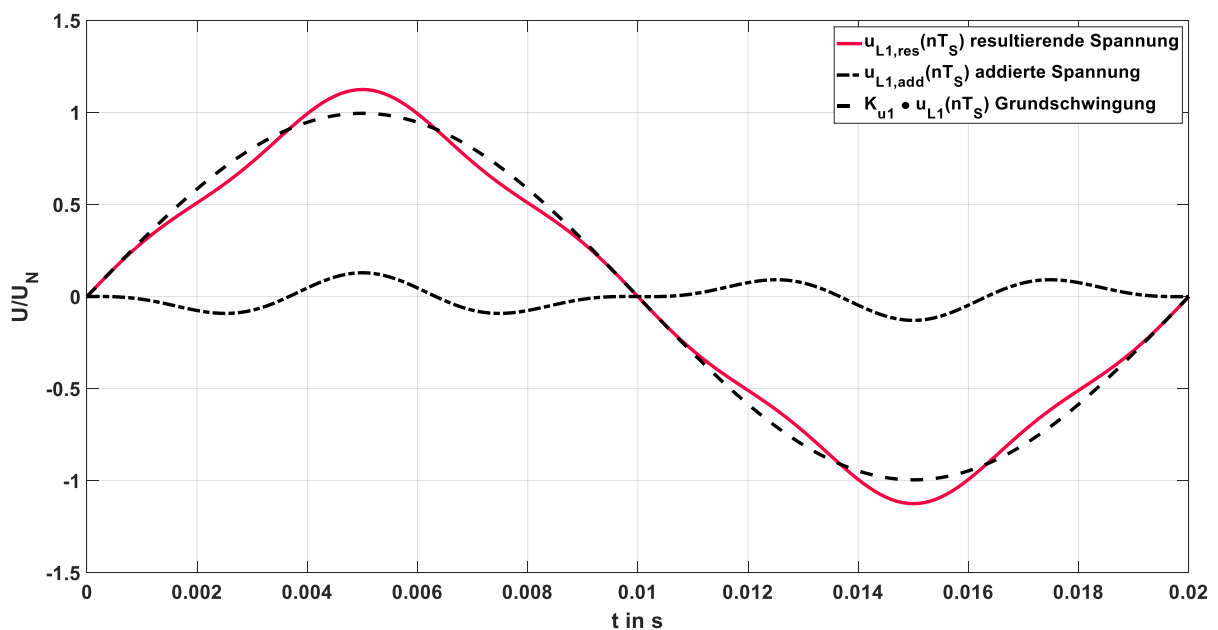


Abbildung 21 Bestandteile der Prüfspannungsform "Überschwingen"

4.2.6 Prüfung mit unsymmetrischer Spannungsversorgung

Die Erstellung des vierten Prüfverfahrens erfolgt ähnlich wie beim Prüfverfahren für Spannungseinbrüche. Wird die Prüfung durch Wahl des entsprechenden Parameters gestartet, beginnt die Zeit des Timers ab dem nächsten darauffolgenden positiven Nulldurchgang der Ausgangsspannung U_{1N} zu laufen.

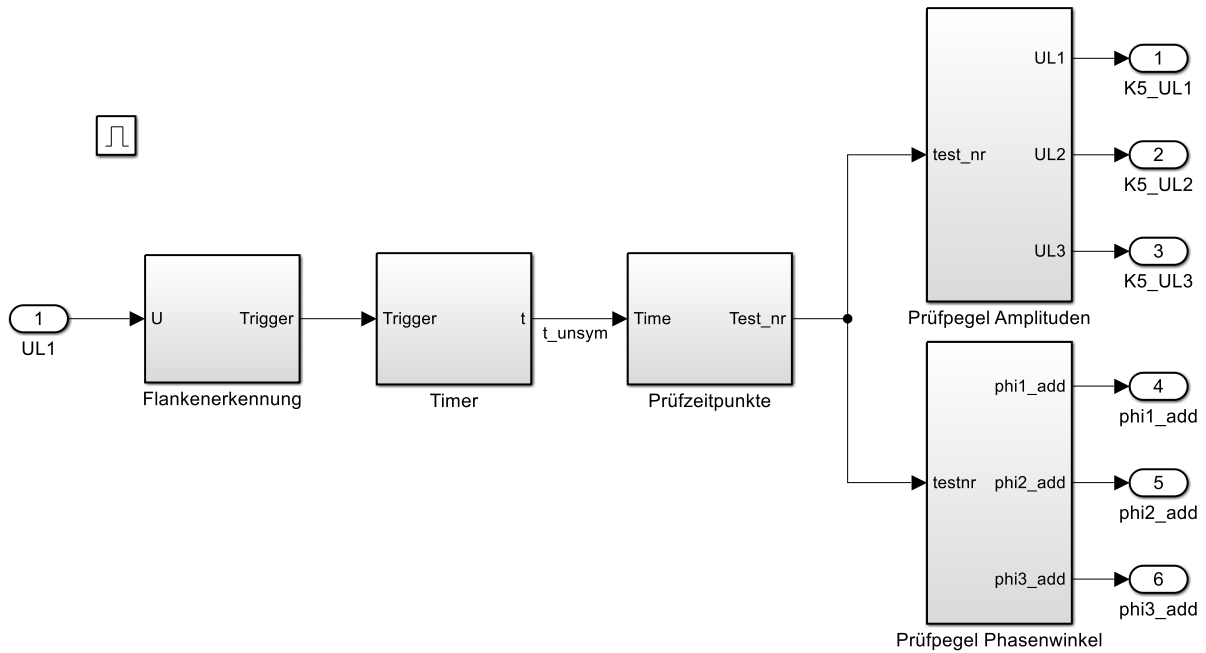


Abbildung 22 Modell zur Erstellung der Prüfung mit unsymmetrischer Spannungsversorgung

In dem Block „Prüfzeitpunkte“ befindet sich dann eine Reihe von Triggern, die bei vorab initialisierten Zeitpunkten zu Prüfungsangang und -ende ausgelöst werden. Zur besseren Übersichtlichkeit wird der Inhalt im Anhang, siehe Abbildung 54, angeführt. Sie führen zu dem in Abbildung 23 gezeigten Ausgangssignal, welches für die Dauer einer Prüfung die Prüfnummer annimmt.

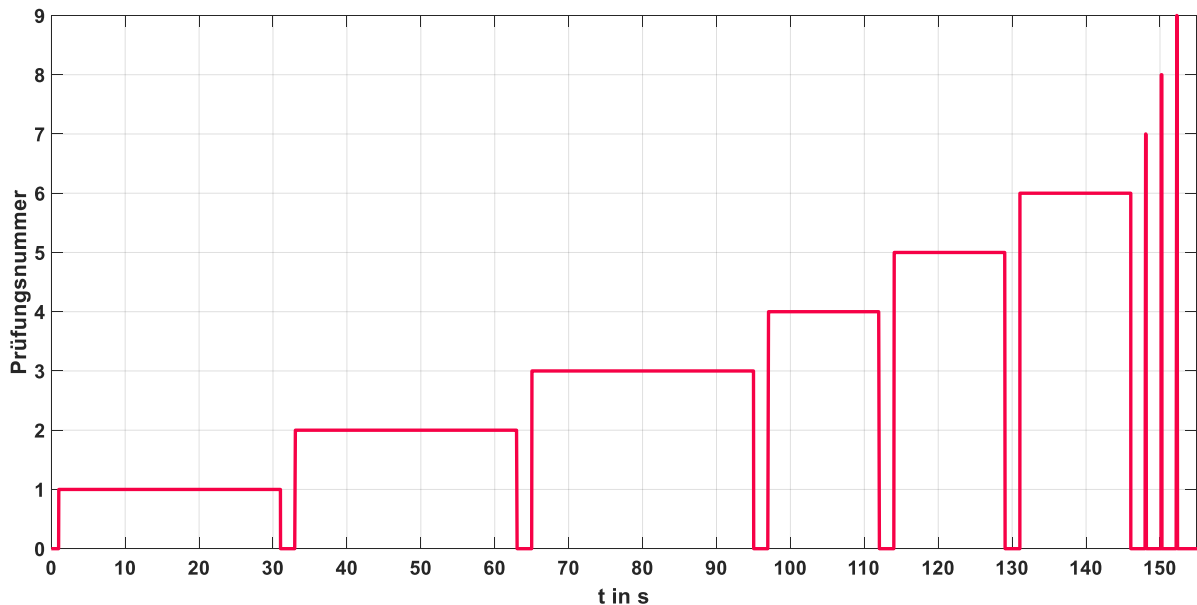


Abbildung 23 Ausgangssignal des Blocks "Prüfzeitpunkte" bei Prüfung der Klasse 2 (Pausenzeit 2s)

Aufgrund dieses Signals werden dann den drei Phasen Werte für die Spannung und den Phasenwinkel in den beiden darauffolgenden Blöcken vorgegeben. Wie diese Zuweisung funktioniert ist im Anhang in Abbildung 55 dargestellt. Der Prüfungsablauf wurde dabei so gewählt, dass alle drei Kombinationen von Amplitude, Phase und Prüfdauer in Tabelle 12 nacheinander auf alle drei Phasen

angewendet werden. Mit den Parametern aus Tabelle 18 kann in der Initialisierungsdatei das Niveau der Prüfpegel und der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Prüfungen festgelegt werden.

Parameter	Beschreibung
class	Auswahl der Prüfklasse (1, 2, 3)
T_pause5	Dauer der Pause zwischen den einzelnen Prüfungen

Tabelle 18 Parameter zur Bestimmung der unsymmetrischen Spannung

4.2.7 Modell der Netzimpedanz

Der letzte Bestandteil des entworfenen Modells ist der Block zur Simulation der Netzimpedanz. Es werden zwei Modelle vorgestellt, eines mit ohmsch-induktiver Impedanz und eines mit zusätzlichen Kapazitäten. In Abbildung 24 wird das Erstere gezeigt, welches auf Grundlage der mathematischen Gleichung (4.10) erstellt wurde. Als Eingänge dienen die je nach Prüfverfahren abgeänderten Phasenspannungen und die an der HUT gemessenen Phasenströme. Durch die Ströme wird der Spannungsabfall an den virtuellen Induktivitäten und Widerständen berechnet und von der idealen Spannung abgezogen, um die Ausgangsspannung zu erhalten. Die Matrizen mit den Werten der einzelnen Impedanzen werden vorab mit MATLAB®, siehe Abschnitt 8.1, erstellt.

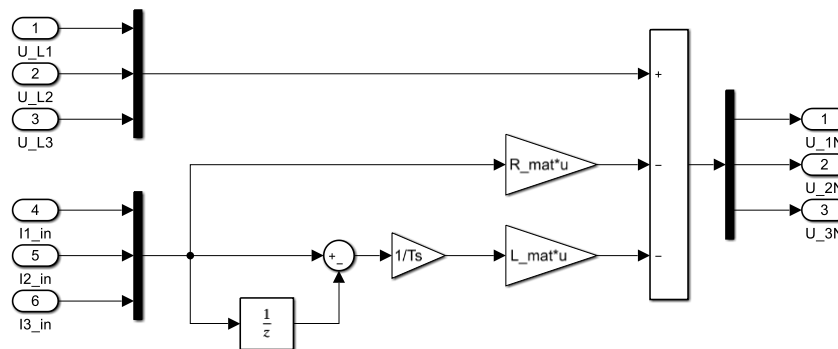


Abbildung 24 Modell der ohmsch-induktiven Netzimpedanz

Wie in Abschnitt 4.1.2 gezeigt, wurde dieses Modell noch um Kapazitäten zwischen den einzelnen Leitern und den Leitern und der Erde erweitert. Dies führt zu dem Modell in der nachfolgenden Abbildung, welches auf der Gleichung (4.22) basiert.

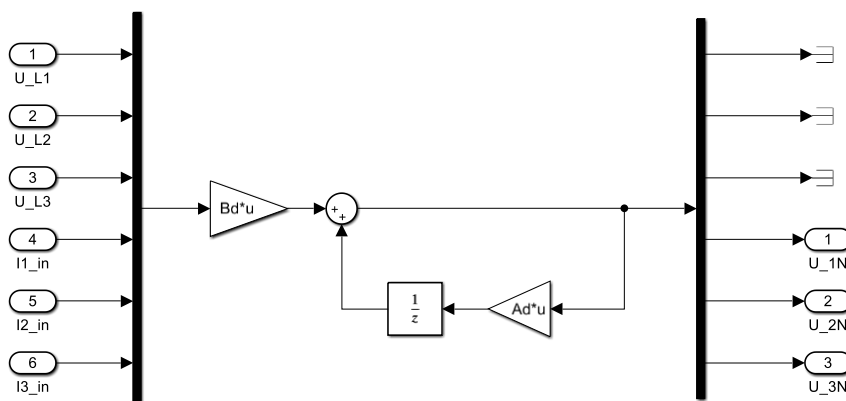


Abbildung 25 Modell der Netzimpedanz mit Berücksichtigung der Kapazitäten

Die Werte für die Impedanzen, die in der Initialisierungsdatei festgelegt werden müssen, sind in Tabelle 19 aufgezählt. Aus ihnen werden die Matrizen (4.12) und (4.21) für die beiden angeführten Modelle berechnet. Zu welcher Komponente der Netzimpedanz die angeführten Parameter gehören, kann Abbildung 11 und Abbildung 12 entnommen werden, in denen die Schaltungen, die als Grundlage des Modells benutzt wurden, gezeigt werden.

Parameter	Beschreibung
R1, R2, R3	Werte für die Längswiderstände
L1, L2, L3	Werte für die Längsinduktivitäten
R_N	Wert für den ohmschen Widerstand des Neutralleiters
L_N	Wert für die Induktivität im Neutralleiter
L12, L23, L31	Werte für die induktiven Kopplungen
CE1, CE2, CE3	Werte für die Erd-Kapazitäten
C12, C23, C31	Werte für die kapazitiven Kopplungen

Tabelle 19 Parameter für die Bestimmung der Netzimpedanzen

5 Ergebnisse

Mit den im vorhergehenden Kapitel angeführten Modellen wurden Simulationen sowie verschiedene Versuche im Power Hardware in the Loop Labor durchgeführt. Die Werte für die Netzimpedanz, die bei den Simulationen und Messungen verwendet wurden, sind in Tabelle 20 angeführt. Sie sind den jeweiligen Bauteilwerten aus Abbildung 11 und Abbildung 12 zugehörig. Die Werte der Widerstände und Induktivitäten wurden entsprechend der Vorgaben von IEC/TR 60725 für Ströme kleiner 100 A je Phase gewählt, siehe Tabelle 7. Die ohmschen Widerstände sind dabei direkt vorgegeben, die Induktivitäten können aus den Werten für die Reaktanz berechnet werden.

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{X_A}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{0,15 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 477,46 \mu\text{H}$$

$$L_N = \frac{X_N}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{0,1 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 318,31 \mu\text{H} \quad (5.1)$$

Es wäre zusätzlich möglich, Kopplungsinduktivitäten (L_{12} , L_{23} , L_{31}) im Modell zu definieren. Dies wurde bei den Versuchen nicht gemacht, da die in den Normen empfohlene Schaltung bereits mit der Definition von L_N erreicht wurde.

Bezeichnung	Wert
R_1, R_2, R_3	0,24 Ω
L_1, L_2, L_3	477,46 μH
R_N	0,16 Ω
L_N	318,31 μH
C_{E1}, C_{E2}, C_{E3}	230 nF
C_{12}, C_{23}, C_{31}	140 nF

Tabelle 20 Bei den Tests verwendete Werte für die Netzimpedanz

Für die Kapazitäten gibt es in den Normen keine Vorgaben, daher wurden Werte aus einem Katalog ermittelt, die für Niederspannungskabel zutreffend sind [44]. Die dort entnommenen Angaben bewegen sich je nach Kabelquerschnitt zwischen 70 und 410 nF/km. Für die Prüfungen im Labor wurden die Werte für einen Kilometer eines 16 mm² Kabels herangezogen. Kapazitäten dieser Größenordnung verändern den Wert der gesamten Netzimpedanz kaum. Deswegen wurden die Werte der größeren Widerstände und Induktivitäten bei beiden Modellen gleichbelassen.

5.1 Ergebnisse der Simulation

Bevor die Modelle im Labor zum Einsatz kamen, wurde deren Funktion durch eine reine Simulation überprüft. Deren Aufbau wurde wie in Abbildung 13 durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dieselben Werte zu verwenden, mit denen im Labor später Versuche durchgeführt wurden. Daher wurden als Last 27 Ω pro Phase festgelegt und das Modell mit einer Abtastrate von 10 kHz simuliert.

Durch die Simulation wurde nachgewiesen dass die Prüfbläufe korrekt ausgeführt werden und die Funktion wie das mehrfache Starten und Beenden eines Prüfblaufs gegeben ist. Auch der gewünschte Spannungsabfall an der Netzimpedanz wurde erreicht.

Es konnte festgestellt werden, dass es an den Übergängen zwischen fehlerfreier Spannung und Prüfspannung zu Schwingungen kommt. Abbildung 26 zeigt das Verhalten bei einer Prüfung mit unsymmetrischer Versorgung.

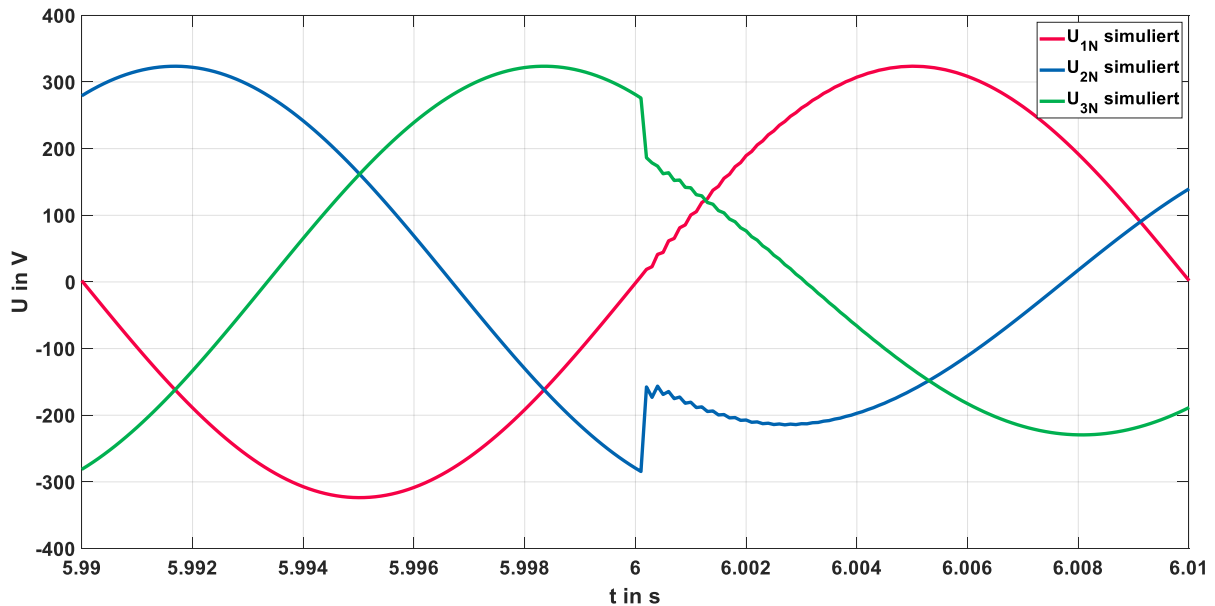


Abbildung 26 Simulierte Ausgangsspannungen bei unsymmetrischer Versorgung mit Verzögerung in der Rückkopplung

In Abbildung 27 ist die simulierte Ausgangsspannung U_{2N} am Beginn der Prüfung nochmals vergrößert dargestellt.

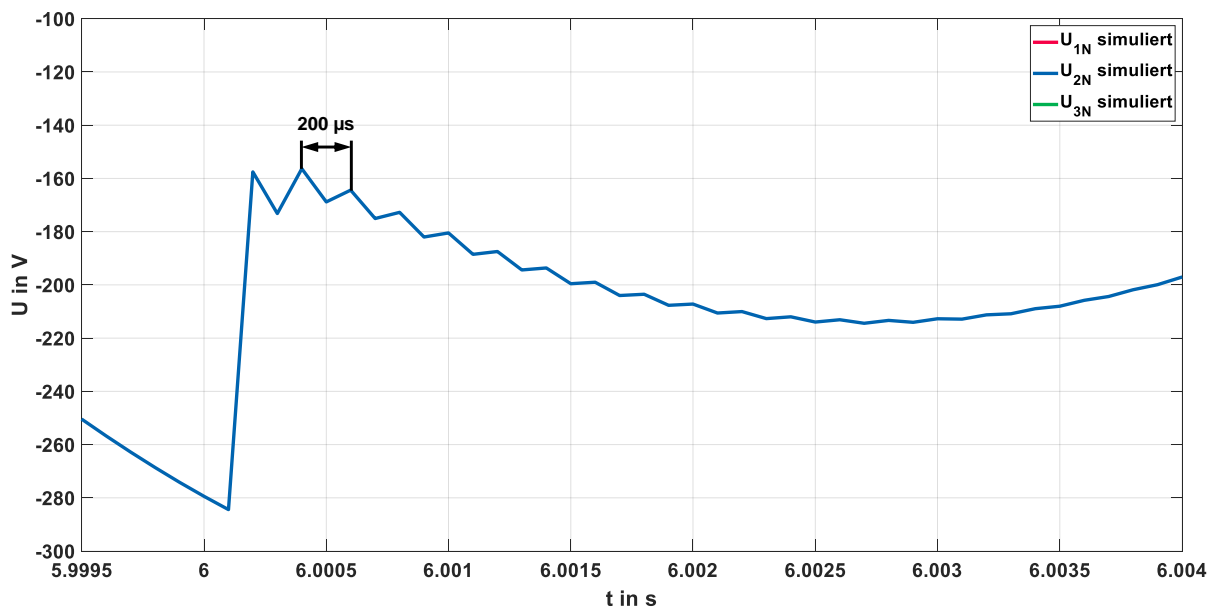


Abbildung 27 Vergrößerung der Simulationsergebnisse des Übergangs zur Prüfspannung in Phase L2

Die Periodendauer der Schwingungen, die nach dem Spannungsabfall entstehen, beträgt $200 \mu\text{s}$. Die auftretende Schwingung hat somit eine Frequenz von 5 kHz , was der halben Abtastrate der Simulation entspricht.

Die Rückkopplung des Stroms wurde in der Simulation mit einer Verzögerung von $100 \mu\text{s}$ versehen, also einer Abtastperiode. Dies wurde bereits im Gesamtüberblick über die Simulation in Abbildung 13 gezeigt und soll die Verzögerung zwischen Vorgabe von Werten durch den Echtzeitrechner und Messung der Werte an der HUT darstellen. Wird die Verzögerung in der Rückkopplung entfernt, verschwinden auch die Schwingungen. Die simulierten Ausgangsspannungen verhalten sich dann wie in Abbildung 28 dargestellt.

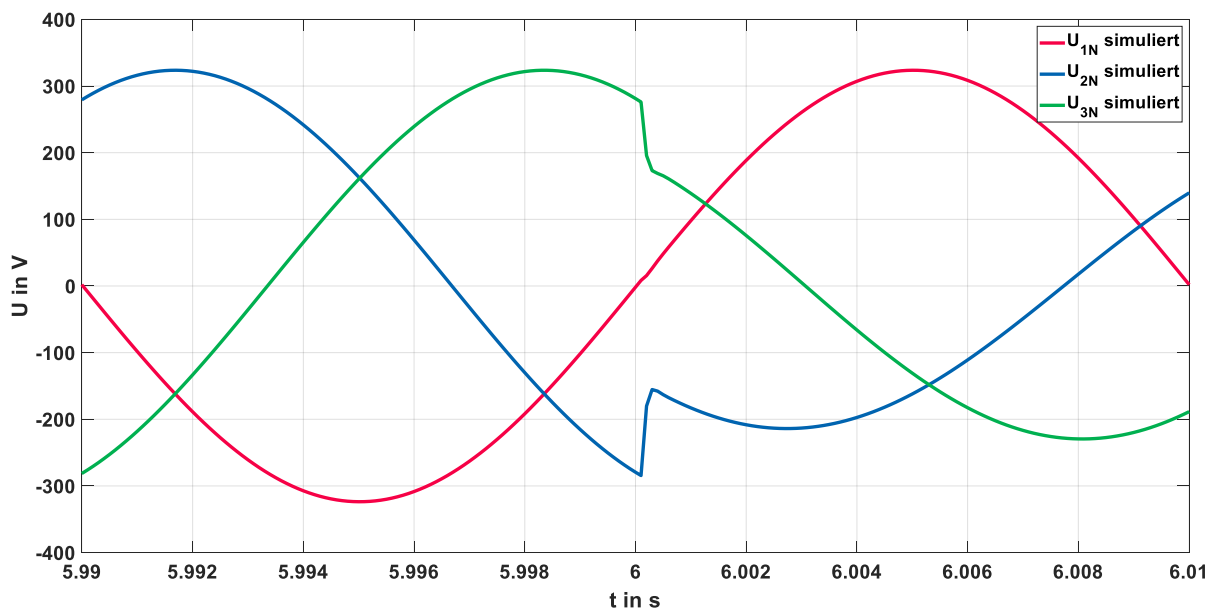


Abbildung 28 Simulierte Ausgangsspannungen bei unsymmetrischer Versorgung ohne Verzögerung in der Rückkopplung

Am Übergang ist nur der Einfluss der Netzimpedanz zu sehen, welcher den Spannungsabfall etwas verlangsamt. Dieses Verhalten wird von der verwendeten Induktivität hervorgerufen. Ein Einfluss der Kapazitäten, die ebenfalls zu Schwingungen führen könnten, ist bei den verwendeten Werten nicht feststellbar.

Um das genannte Verhalten genauer zu untersuchen, wurde die Simulation mit kürzeren Verzögerungszeiten und Berechnungsschritten durchgeführt. Zum Vergleich wurde das Modell aus Abbildung 12 mit Simscape Komponenten nachgebaut. Dabei wurde kein PHIL System erstellt, sondern nur ein Netzwerk aus Last und Netzimpedanz, um die Spannungen an der Last beider Modelle zu vergleichen. Das Simscape Modell ist im Anhang in Abbildung 57 angeführt, die Eingangsspannungen sind dieselben wie bei dem Modell in Abbildung 25. Die Vergleiche wurden wieder für einen Spannungseinbruch der Phase L1 auf 70% der fehlerfreien Spannung durchgeführt. Bei einer Erhöhung der Abtastrate der Simulation auf 100 kHz und einer Verzögerung von $10 \mu\text{s}$ in der Rückkopplung ergibt sich die Ausgangsspannung des Modells U_{1N} nach der roten Linie in Abbildung 29. Zum Vergleich ist grau im Hintergrund der Verlauf der Spannung bei dem Modell aus Simscape Komponenten ohne Verzögerung dargestellt.

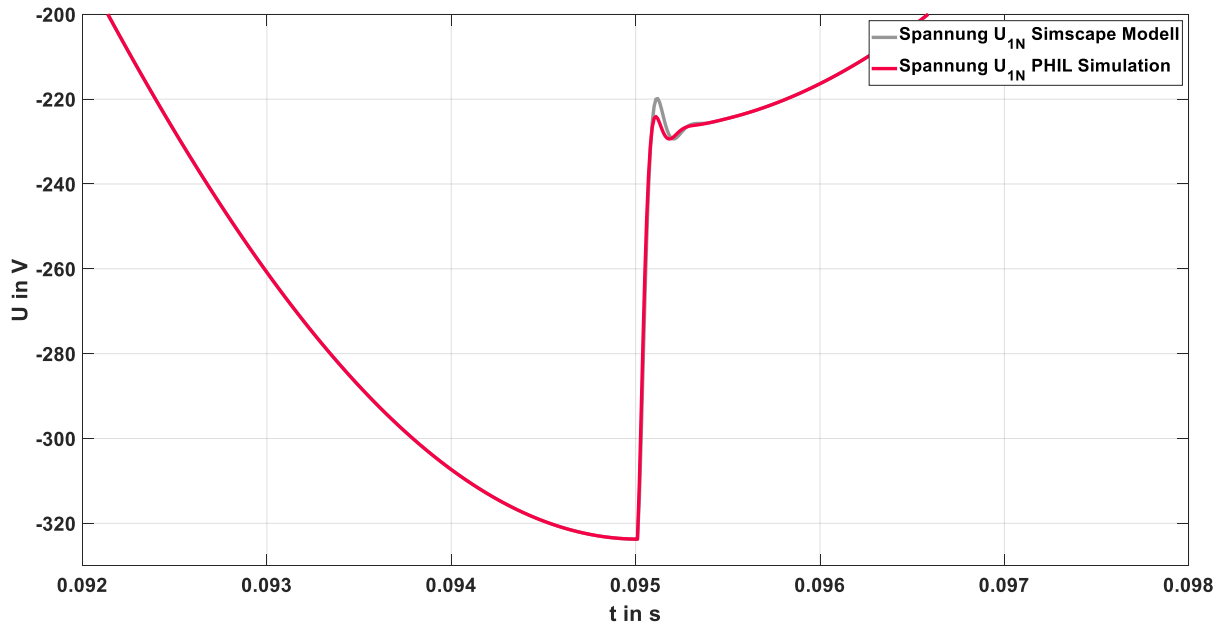


Abbildung 29 Vergleich der Spannungen an L1 der Last bei einem Spannungseinbruch beider Modelle
 $T_S = 10 \mu\text{s}$, $t_v = 10 \mu\text{s}$

Wird bei gleichbleibender Abtastrate die Verzögerung auf $20 \mu\text{s}$ erhöht, ergeben sich wieder deutliche Schwingungen beim Eintritt des Spannungseinbruchs, wie in Abbildung 30 gezeigt wird.

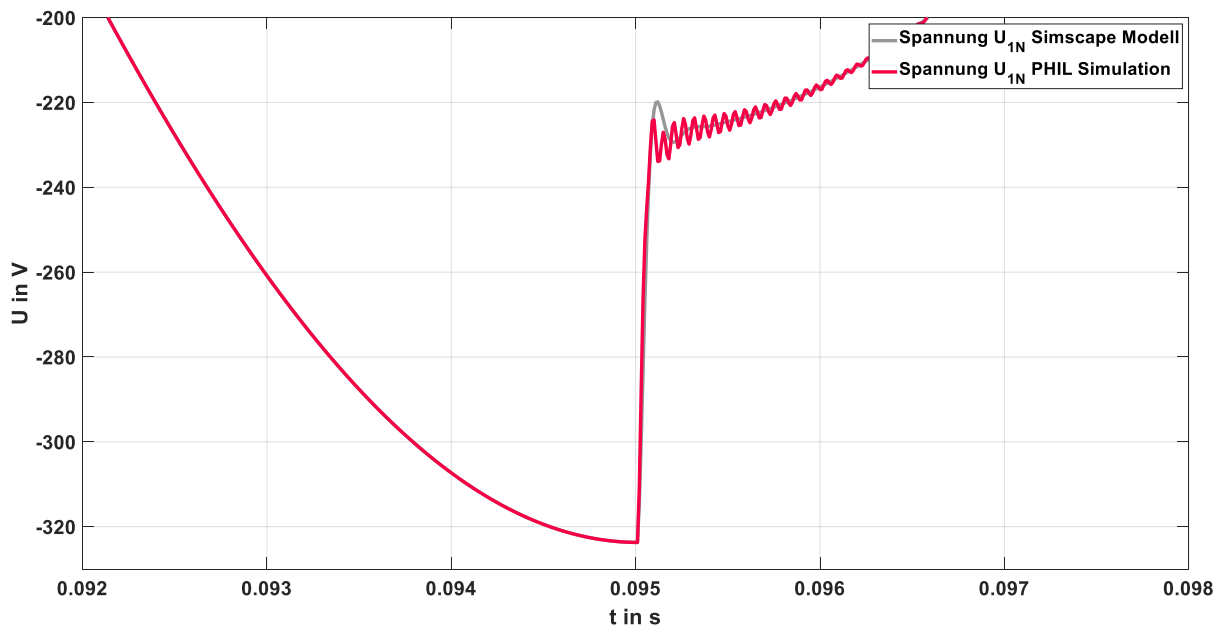


Abbildung 30 Vergleich der Spannungen an L1 der Last bei einem Spannungseinbruch beider Modelle
 $T_S = 10 \mu\text{s}$, $t_v = 20 \mu\text{s}$

Bei noch größerer Erhöhung der Abtastrate auf 1 MHz und weiterer Verkleinerung der Verzögerung auf $10 \mu\text{s}$ nähert, verschwindet die Auswirkung der Verzögerung fast gänzlich. So ist in Abbildung 31 so gut wie kein Unterschied zwischen den beiden Spannungen mehr zu erkennen. Auffällig ist, dass bei beiden Modellen die Amplitude der Schwingung am Übergang, die durch die Impedanzen auftritt, höher ist als bei der geringeren Abtastrate.

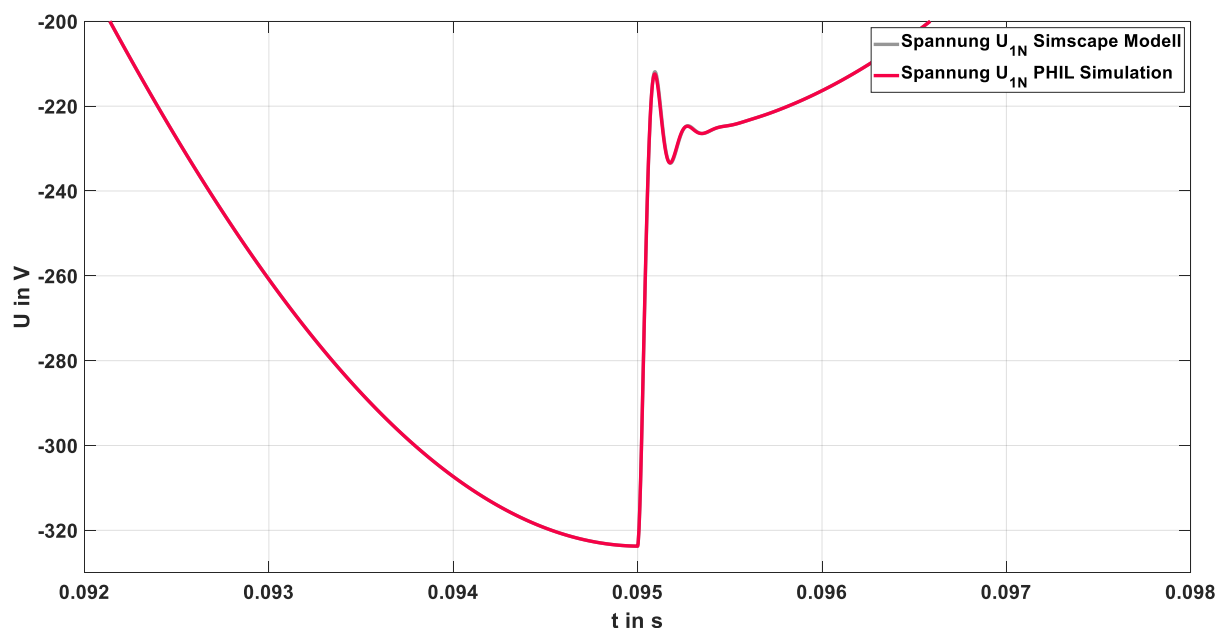


Abbildung 31 Vergleich der Spannungen an L1 der Last bei einem Spannungseinbruch beider Modelle
 $T_S = 1 \mu\text{s}$, $t_v = 1 \mu\text{s}$

5.2 Ergebnisse aus den Laborversuchen

5.2.1 Laboraufbau

Nachdem die Funktionalität der Modelle mit einer reinen Computersimulation überprüft wurde, wurden damit mehrere Tests im PHIL-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze durchgeführt. Der Aufbau, der für die Messungen im Labor verwendet wurde, wird in Abbildung 32 schematisch dargestellt. Das Simulink Modell wird auf einem Echtzeitrechner, dem SCALEXIO-System von dSpace eingebunden. Diese berechnet die Spannungswerte und gibt sie dem Leistungsverstärker vor. Die Taktfrequenz für die Berechnung waren 10 kHz, dies stellt auch die maximale Taktfrequenz des Echtzeitsystems dar. Als Leistungsverstärker diente ein Regatron TC.ACS.30, dessen Kenndaten schon im Abschnitt 2 angeführt wurden, damit werden die Spannungen auf die benötigte Größe verstärkt. Die Ströme, die in den einzelnen Phasen fließen, werden intern gemessen und an das Echtzeitsystem zurückgeführt, um in die Berechnung weiterer Spannungswerte einzufließen.

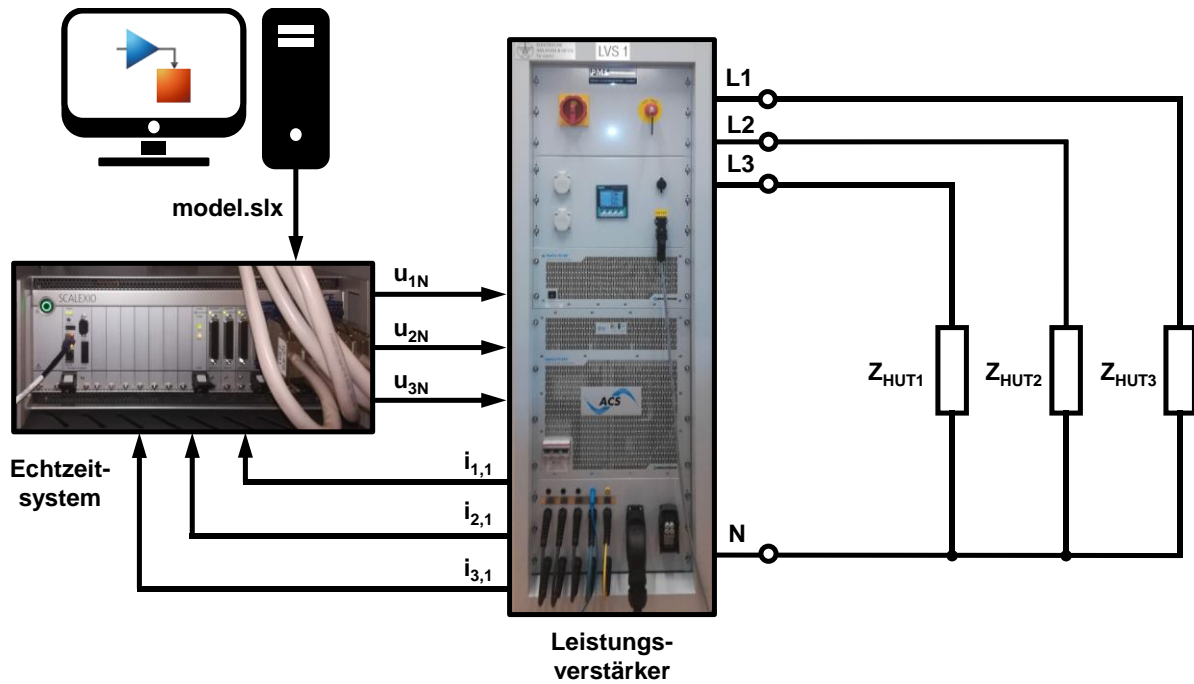


Abbildung 32 Schema des Laboraufbaus

Als HUT wurden verschiedene Impedanzen verwendet. Zuerst wurden rein ohmsche Verbraucher mit einstellbarem Widerstandswert im Stern verschalten, welche in Abbildung 33 gezeigt werden.



Abbildung 33 Ohmsche Verbraucher

Bei nachfolgenden Versuchen wurden Induktivitäten in Serie zu den Widerständen geschalten. Dafür wurde ein Dreischenkel-Transformator benutzt, welcher je Schenkel vier Windungen besitzt. Davon wurde je Schenkel eine Windung in Serie mit einem der ohmschen Widerstände geschalten. Die Sekundärseite wurde im Leerlauf belassen. Zusätzlich wurde auch ein Versuch durchgeführt, bei dem je eine Windung des Mittelschenkels mit einem der Widerstände seriell verschalten war. Die genauen

Induktivitäten der einzelnen Windungen des Transformators waren bei den Versuchen aber unbekannt.



Abbildung 34 Transformator der als Drossel verwendet wurde

In Tabelle 21 sind alle Prüfungen, die im Labor durchgeführt wurden, aufgezählt. Es wurden beide vorgestellten Modelle der Netzimpedanz getestet. Die Abkürzung „RL“ in der Tabelle steht dabei für das Modell aus Abschnitt 4.1.1, welches den Normen entnommen wurde, die Abkürzung „RLC“ steht für das erweiterte Modell mit den Kapazitäten aus Abschnitt 4.1.2. Für jede der angeführten Kombinationen aus Netzimpedanz und Verbraucher wurden die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Prüfverfahren durchgeführt. Vor Start eines Prüfverfahrens wurde der Prüfling stets mit der fehlerfreien Netzspannung beaufschlagt und dann zur Prüfspannung übergegangen. Am Ende der Prüfung wurde dieses Verfahren in umgekehrter Weise wiederholt. Begonnen wurde dabei mit einem Leerlauftest um die grundsätzliche Funktion des Modells und die richtige Ausgabe der Prüfspannungen zu überprüfen. Bei den Lasttests wurde ein Widerstand von 27Ω gewählt, welcher zu einem Effektivwert des Phasenstroms von ca. 8,5 A führt.

Nr.	Modell für die Netzimpedanz	Hardware under Test
1	RLC	Leerlauf
2	RLC	$R_{HUT} = 27 \Omega$
3	RL	$R_{HUT} = 27 \Omega$
4	RL	$R_{HUT} = 27 \Omega$ und 1 Wdg. des Mittelschenkels des Transformators in Serie
5	RL	$R_{HUT} = 27 \Omega$ und 1 Wdg. des Transformators in Serie
6	RLC	$R_{HUT} = 27 \Omega$ und 1 Wdg. des Transformators in Serie

Tabelle 21 Im Labor durchgeführte Tests

5.2.2 Ergebnisse des Leerlauftests

Bevor ein Verbraucher an den Ausgang des Leistungsverstärkers angeschlossen wurde, wurden die vier Prüfverfahren im Leerlauf getestet. Für die Netzimpedanz wurde dabei das Modell mit den Kapazitäten verwendet. Die Abbildung 35 zeigt den Verlauf der vom Echtzeitrechner vorgegebenen

Spannung im Vergleich zur gemessenen Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers bei einer Prüfung mit einem Spannungseinbruch im negativen Maximum der Spannung in Phase L1. Die gemessene Spannungsamplitude der fehlerfreien Spannung entspricht den vorgegebenen Werten für die Netzspannung.

$$\hat{U}_{1N} = 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 326,6 \text{ V} \quad (5.2)$$

Für die Höhe der verbleibenden Spannung während dem Spannungseinbruch wurden in diesem Fall 70 % gewählt. Auch dieser Wert stimmt überein, wie im Vergleich zwischen der vorgegebenen Spannungsamplitude und der Gemessenen gesehen werden kann.

$$0,7 \cdot \hat{U}_{1N} = 0,7 \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 228,6 \text{ V} \quad (5.3)$$

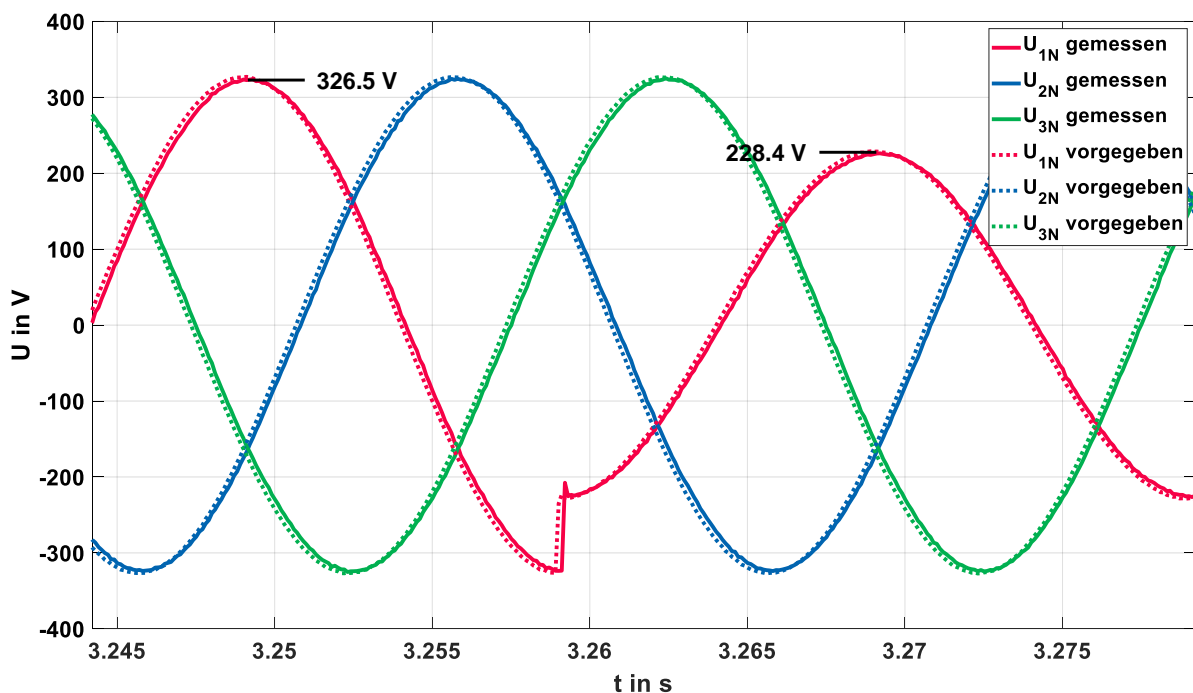


Abbildung 35 Verlauf der Ausgangsspannungen bei Spannungseinbruch auf 70 % U_N

Eine weitere Größe, die aus der Abbildung entnommen werden kann, ist die Verzögerung zwischen den vorgegebenen und gemessenen Spannungswerten. Sie ist im Leerlauf noch nicht von großer Bedeutung, spielt aber bei den Lastversuchen eine größere Rolle, da der rückgekoppelte Strom derselben Verzögerung unterliegt. Das gemessene Signal ist gegenüber der Spannungsvorgabe ein bis zwei Zeitschritte verzögert. Bei einer Taktfrequenz von 10 kHz liegt somit die Verzögerung zwischen 100 μs und 200 μs . Die durchschnittliche Verzögerung wurde mit der folgenden Methode genauer ermittelt. Abbildung 36 zeigt die Differenzen der vorgegebenen und gemessenen Spannungen im fehlerfreien Fall.

$$\Delta u_{1N}(t) = u_{1N,\text{vorgegeben}}(t) - u_{1N,\text{gemessen}}(t) = \hat{U}_N \cdot \sin(\omega t) - \hat{U}_N \cdot \sin(\omega(t - t_v)) \quad (5.4)$$

Deren Maxima liegen immer im Nulldurchgang der gemessenen Spannung, also dort, wo die Steigung am größten ist. Aus dieser Erkenntnis und der obigen Formel kann die Messverzögerung wie folgt berechnet werden.

$$t_{v,1N} = \frac{\arcsin\left(\frac{\Delta\hat{U}_{1N}}{\hat{U}_{1N}}\right)}{\omega} \quad (5.5)$$

Setzt man darin die gemittelte Amplitude der Spannungsdifferenz ein, erhält man die durchschnittliche Verzögerung zwischen vorgegebenen Werten und gemessenen Werten des Systems.

$$\overline{t_{v,1N}} = \frac{\arcsin\left(\frac{16,51\text{ V}}{326,6\text{ V}}\right)}{2\pi \cdot 50\text{ Hz}} = 160,98\ \mu\text{s} \quad (5.6)$$

Die Mittelung der Amplituden wurde mit MATLAB über eine Zeitspanne von 2 s der fehlerfreien Spannung durchgeführt. Die Verzögerungszeit t_v liegt für alle drei Phasen im Bereich von 160 μs .

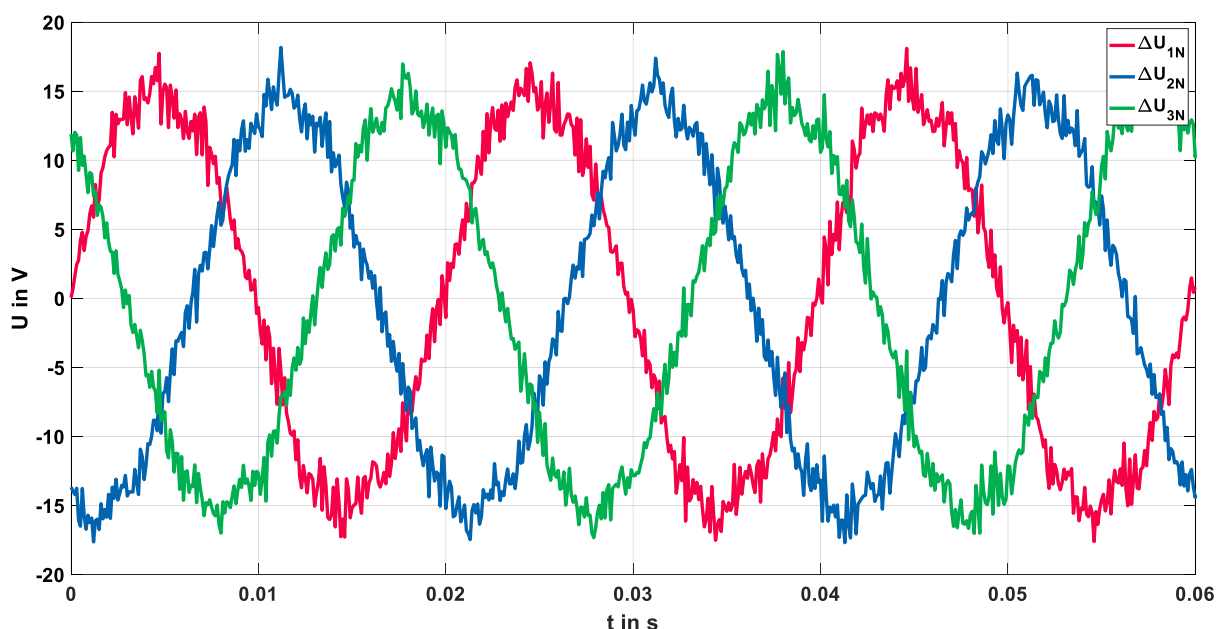


Abbildung 36 Differenz zwischen vorgegebener und gemessener Spannung

Betrachtet man den Zeitpunkt des Spannungseinbruchs genauer, fällt auf, dass die tatsächlich vom Leistungsverstärker ausgegebene Spannung ein Überschwingen gegenüber der Spannungsvorgabe des Echtzeitrechners aufweist. Dieses Verhalten ist in Abbildung 37 näher dargestellt. Zum Vergleich ist die ideale Spannung U_{L1} im Diagramm dargestellt, welche keinem Einfluss der Netzimpedanz unterliegt. Es ist erkennbar, dass bereits die vorgegebene Spannung U_{1N} leicht schwingt gegenüber der idealen Spannung.

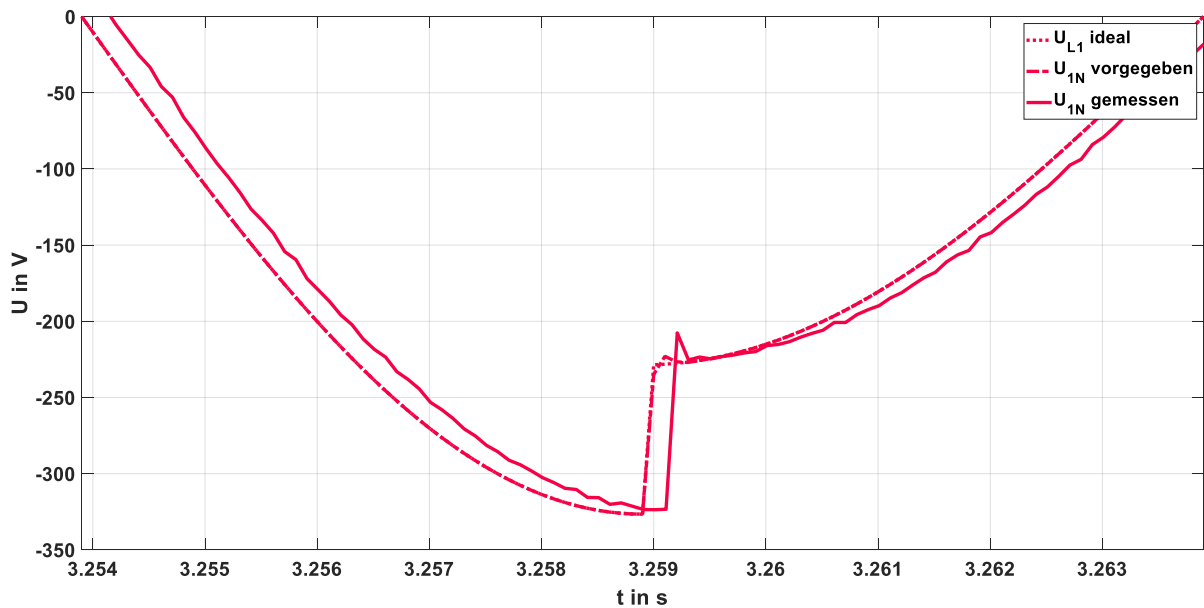


Abbildung 37 Vergrößerte Darstellung des Übergangs zur Prüfspannung

Außer der Prüfung mit Spannungseinbrüchen wurden ebenfalls die anderen drei Prüfverfahren vorab im Leerlauf getestet. An den Übergängen zur Prüfspannung trat bei allen das erwähnte Überschwingen der gemessenen Spannung auf. Ansonsten folgte die vom Leistungsverstärker ausgegebene Spannung relativ genau der Vorgabe.

5.2.3 Ergebnisse aus Versuchen mit ohmscher Last

Nach Testen des Systems im Leerlauf wurden der Ausgang des Leistungsverstärkers mit den ohmschen Widerständen in Abbildung 33 beschalten. Diese wurden auf einen Wert von 27Ω pro Phase eingestellt. Die Netzimpedanz wurde zuerst wieder mit Kapazitäten simuliert. Abbildung 38 zeigt den Strom, der in den drei Phasen durch die Last fließt, während eines Spannungseinbruchs auf 70 % in der Phase L1. Die Amplitude des gemessenen Stroms entspricht in etwa dem erwarteten Wert, welcher sich durch die Last und die verwendete Netzimpedanz ergibt.

$$\hat{I}_1 \cdot e^{j\varphi_{i1}} = \frac{U_N \cdot \sqrt{2}}{(Z_{\text{Netz}} + Z_{\text{HUT}}) \cdot \sqrt{3}} = \frac{400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{(0,16 \Omega + j0,1 \Omega + 27,0 \Omega)} = 12,02 \text{ A} \cdot e^{-j0,21^\circ} \quad (5.7)$$

Die Phasenverschiebung, die sich für den Strom ergibt, ist nicht an den Ausgängen des Leistungsverstärkers messbar, da es sich um die Phasenverschiebung des Stroms zur idealen Spannung, die im Modell vorgegeben wird, handelt. Sie könnte unter Berücksichtigung der Messverzögerung und Vergleich von idealer Spannung zu gemessenem Strom ermittelt werden. Dies wurde aber unterlassen, da sie ohnehin sehr gering ist.

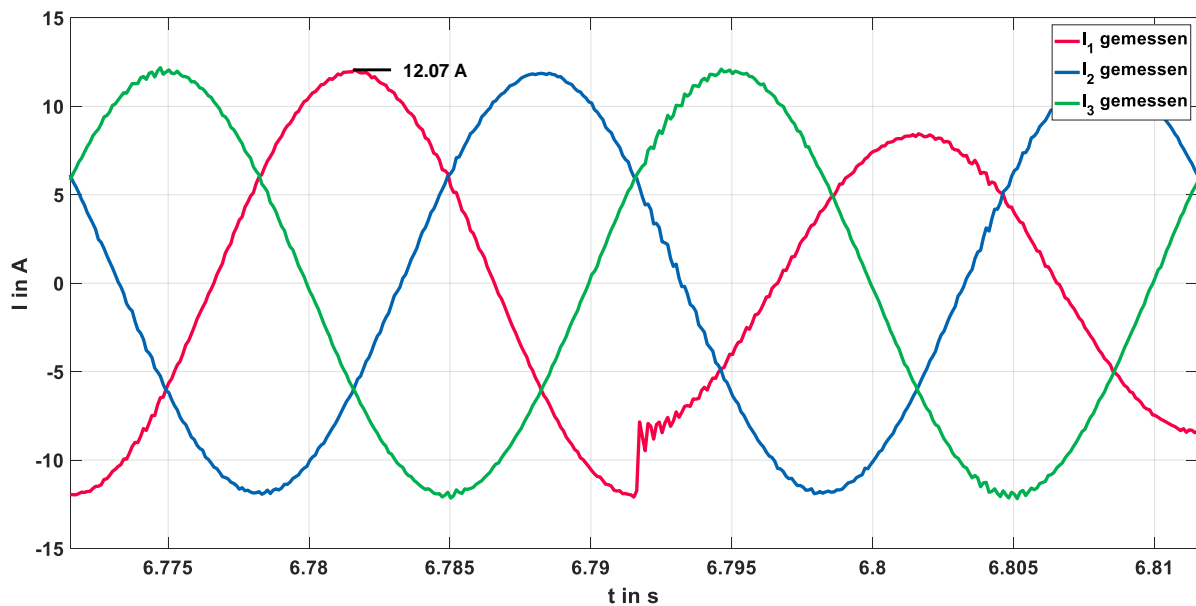


Abbildung 38 Gemessene Phasenströme bei Belastung mit 27Ω

In Abbildung 35 ist das Schwingen des Stroms, welches speziell bei Eintritt des Spannungseinbruchs auftritt, gut ersichtlich. Es tritt nicht nur beim Strom auf, sondern bereits in den Spannungen, die vom Echtzeitsystem vorgegeben werden, wie in Abbildung 39 gezeigt wird. Auch bei der Simulation konnte bereits ein ähnliches Verhalten festgestellt werden, allerdings in geringerem Ausmaß.

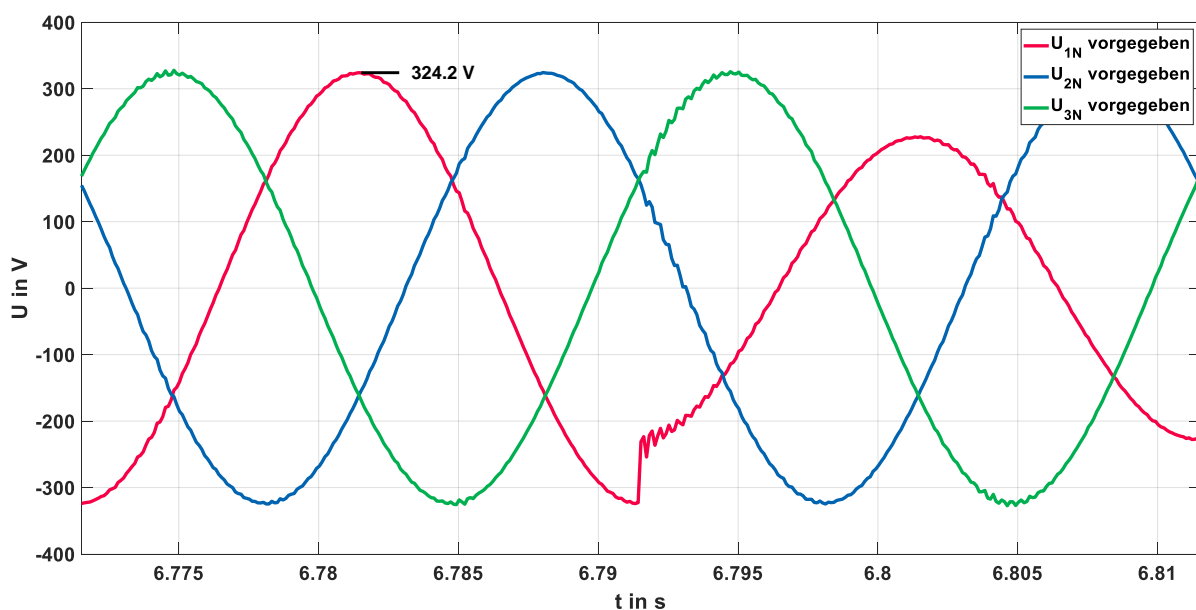


Abbildung 39 Vom Echtzeitsystem vorgegebene Ausgangsspannungen

Die Schwingungen beim Übergang von der fehlerfreien Spannung zur Prüfspannung sind zwar unerwünscht, trotzdem kann durch sie der Einfluss der simulierten Netzimpedanz gesehen werden. Sie treten nämlich nicht nur in der Phase L1 auf, die dem Spannungseinbruch unterliegt, sondern gleichzeitig auch in den anderen beiden Phasen.

Die Amplitude der Spannung vor Prüfungseintritt ist um 2,4 V niedriger als im Leerlauf. Dieser Spannungsabfall wird ebenfalls von der simulierten Netzimpedanz und dem Strom, der durch die Last

fließt, hervorgerufen. Die erwartete resultierende Amplitude kann wie folgt berechnet werden und stimmt mit der Gemessenen überein:

$$\hat{U}_{1N} = \hat{U}_{L1} - \hat{I}_1 \cdot |Z_{\text{Netz}}| = 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} - 12,02 \text{ A} \cdot |0,16\Omega + j0,1 \Omega| = 324,67 \text{ V} \quad (5.8)$$

Da der gewählte Widerstand, von 27 Ω pro Phase, groß gegenüber der Netzimpedanz ist, macht sich der Spannungsabfall nicht stärker bemerkbar.

Neben dem Prüfverfahren für Spannungseinbrüche wurden auch die anderen vorgestellten Prüfungen im Labor durchgeführt. Abbildung 40 zeigt den Verlauf der Spannung bei der Prüfung „Flache Kurve“. Der Übergang zu Prüfspannung erfolgte in allen drei Phasen gleichzeitig zu einem willkürlich gewählten Zeitpunkt. Besonders im flachen Teil des Spannungsverlaufs und zu Prüfungsbeginn treten ähnliche Schwingungen auf wie bei den Spannungseinbrüchen.

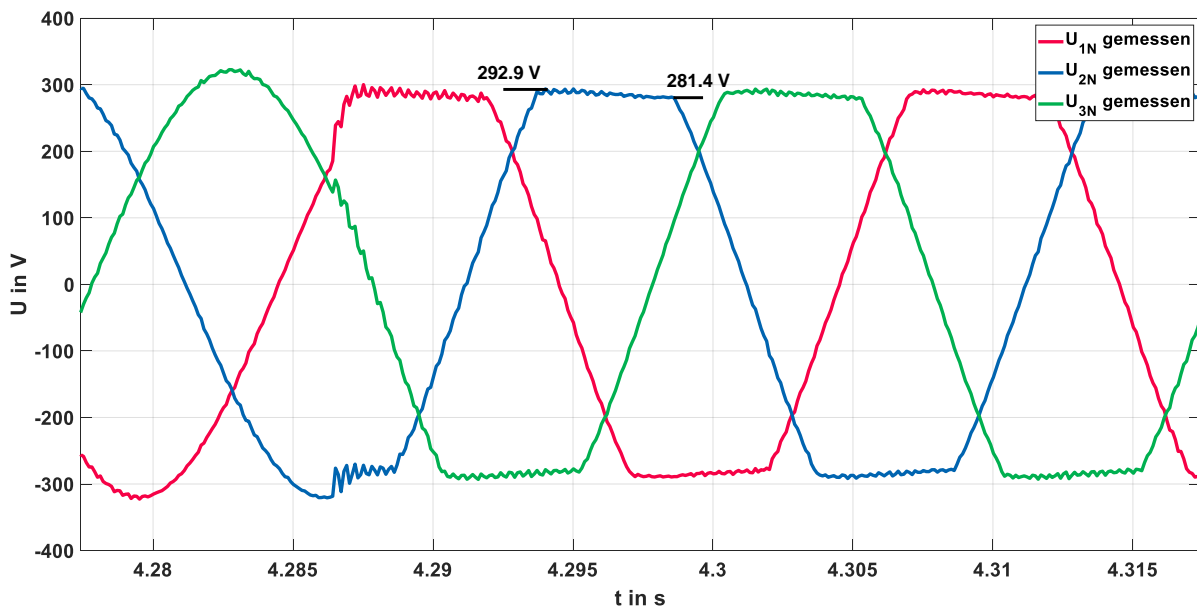


Abbildung 40 Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers während der Prüfung „Flache Kurve“

Bei der durchgeführten Prüfung wurden die Parameter entsprechend der Klasse 3 nach Tabelle 16 gewählt. Der flache Teil der idealen Prüfspannung muss sich dann nach Gleichung (3.1) auf dem folgenden Niveau befinden:

$$\hat{U}_{L1} = \alpha \cdot K_y \cdot \hat{U}_N = 0,8 \cdot 1,1117 \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 290,46 \text{ V} \quad (5.9)$$

Die tatsächlich gemessene Spannung sollte sich dann um den Spannungsabfall an der simulierten Netzimpedanz geringfügig darunter befinden. Die gemessene Spannung liegt ebenfalls in diesem Bereich, wie Abbildung 40 zeigt. Am Anfang des flachen Teils ist sie aber höher als die ideale Spannung, was dem Überschwingen geschuldet ist. Im weiteren Verlauf sinkt die Spannung um ca. 10 V ab.

Bei der Prüfung „Überschwingen“ folgte die Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers ohne größere Abweichungen der vorgegebenen Spannung. Es kommt dabei zu einer Erhöhung der Spannungsamplitude durch gezielte Überlagerung der Netzspannung mit der dritten und fünften

Oberschwingung. Die Zuschaltung der Prüfspannung erfolgte dabei in allen drei Phasen gleichzeitig bei einem zufällig gewählten Zeitpunkt, wie in Abbildung 41 zu sehen ist.

Durchgeführt wurde die Prüfung ebenfalls mit den Parametern der Klasse 3, welche durch die Tabelle 11 bestimmt sind. Die Amplitude der idealen Prüfspannung kann dann mit den Gleichungen (3.2)-(3.5) in folgender Weise berechnet werden:

$$\hat{U}_{L1} = K_{u1} \cdot \hat{U}_N \cdot \left(1 + \frac{U_3}{U_N} + \frac{U_5}{U_N}\right) = 0,9956 \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot (1 + 0,08 + 0,05) = 367,43 \text{ V} \quad (5.10)$$

Die gemessene Spannung ist wiederum um den Spannungsabfall an der simulierten Netzimpedanz niedriger als der ideale Wert.

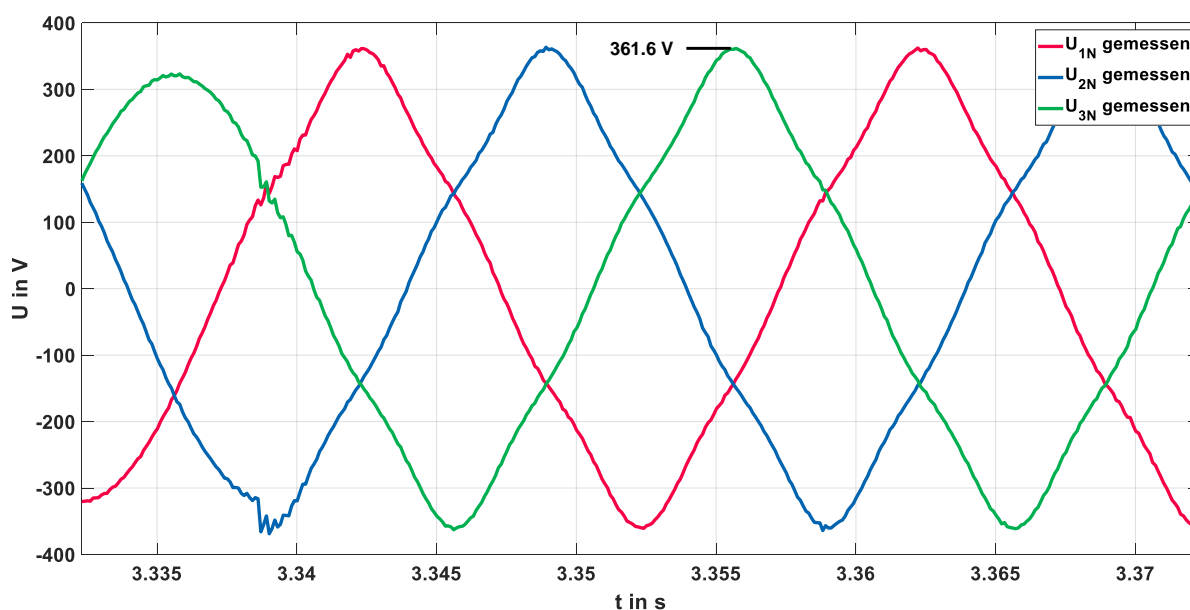


Abbildung 41 Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers während der Prüfung "Überschwingen"

Neben den bereits genannten Prüfverfahren wurde auch eine Prüfung mit unsymmetrischer Versorgungsspannung an einer ohmschen Last durchgeführt. Die dabei gemessenen Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers werden in Abbildung 42 gezeigt. Für die Messung wurden einige der höheren Prüfpegel aus der Norm verwendet, welche die idealen Spannungen während der Prüfung in der folgenden Weise verändern:

$$\begin{aligned} u_{L1}(t) &= 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega_N t) \\ u_{L2}(t) &= 0,66 \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega_N t - 139^\circ) \\ u_{L3}(t) &= 0,71 \cdot 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega_N t - 235^\circ) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Der Prüfungsstart sollte dabei im Nulldurchgang der unveränderten Phasenspannung u_{L1} erfolgen, dieses Verhalten konnte auch erreicht werden, wie in der Abbildung 42 gezeigt wird. Es ist wie bei den anderen Prüfungen, speziell am Prüfungsbeginn, ein Schwingen der Spannung zu erkennen.

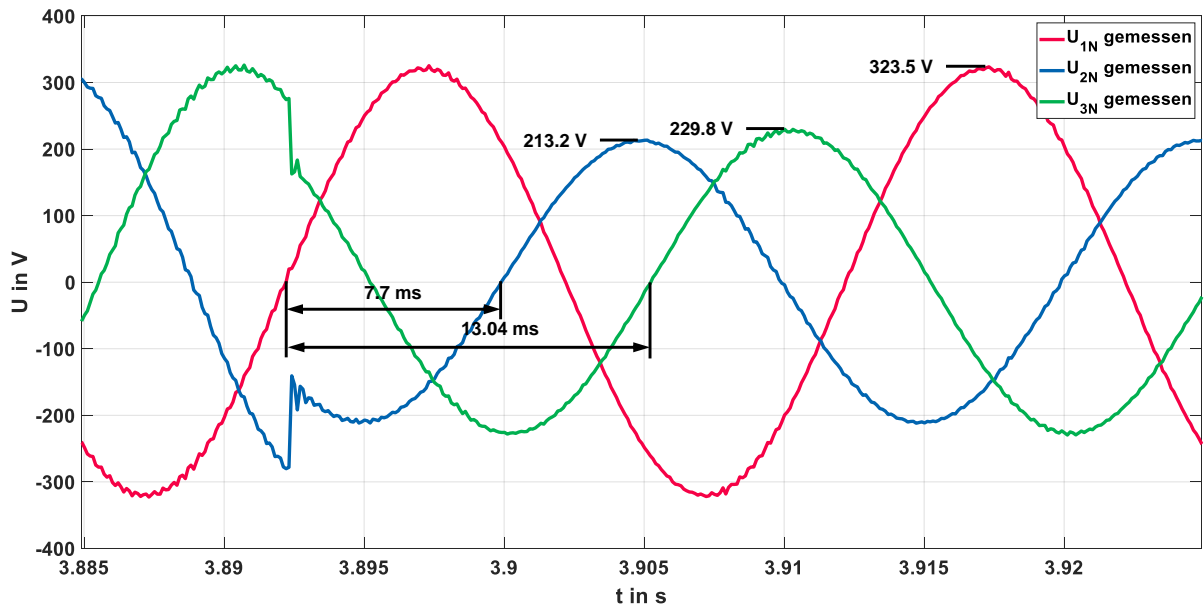


Abbildung 42 Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers bei unsymmetrischer Prüfspannung

Die resultierenden Spannungen während der Prüfung können aus dem Teilverhältnis zwischen Netzimpedanz und der Gesamtimpedanz berechnet werden. Ihre Amplituden und Phasenverschiebungen wurden mit den Messwerten aus der Abbildung verglichen und stimmen überein.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{1N} \\ \underline{U}_{2N} \\ \underline{U}_{3N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{pmatrix} \cdot \underline{Z}_{\text{Netz}} \cdot \underline{Z}_{\text{ges}}^{-1} = \begin{pmatrix} 326,6 \text{ V} \cdot e^{j0^\circ} \\ 215,56 \text{ V} \cdot e^{-j139^\circ} \\ 231,89 \text{ V} \cdot e^{-j235^\circ} \end{pmatrix} \cdot \underline{Z}_{\text{Netz}} \cdot \underline{Z}_{\text{ges}}^{-1} = \begin{pmatrix} 323,71 \text{ V} \cdot e^{-j0,38^\circ} \\ 213,91 \text{ V} \cdot e^{-j139,2^\circ} \\ 229,53 \text{ V} \cdot e^{-j235,3^\circ} \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

Für die Netzimpedanz werden die Werte, die in der Initialisierungsdatei eingestellt wurden und aus der Norm stammen, eingesetzt. Die gesamte Impedanz $\underline{Z}_{\text{ges}}$ erhält man indem zur Hauptdiagonale der Netzimpedanz der Wert der ohmschen Last (27 Ω) addiert wird.

$$\underline{Z}_{\text{Netz}} = \begin{bmatrix} 0,4 \Omega + j0,25 & 0,16 \Omega + j0,1 \Omega & 0,16 \Omega + j0,1 \Omega \\ 0,16 \Omega + j0,1 \Omega & 0,4 \Omega + j0,25 & 0,16 \Omega + j0,1 \Omega \\ 0,16 \Omega + j0,1 \Omega & 0,16 \Omega + j0,1 \Omega & 0,4 \Omega + j0,25 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Da die, bis jetzt angeführten, Tests alle mit dem Impedanzmodell mit Kapazitäten durchgeführt wurden, wurde zum Vergleich das Modell mit rein ohmsch-induktiver Netzimpedanz getestet. Der Aufbau beider Modelle wurde im Abschnitt 4.2.7 gezeigt. Abbildung 43 zeigt die gemessenen Spannungen bei einem Spannungseinbruch. Dabei fällt auf, dass die Schwingungen gegenüber dem Modell mit den Kapazitäten noch stärker auftreten.

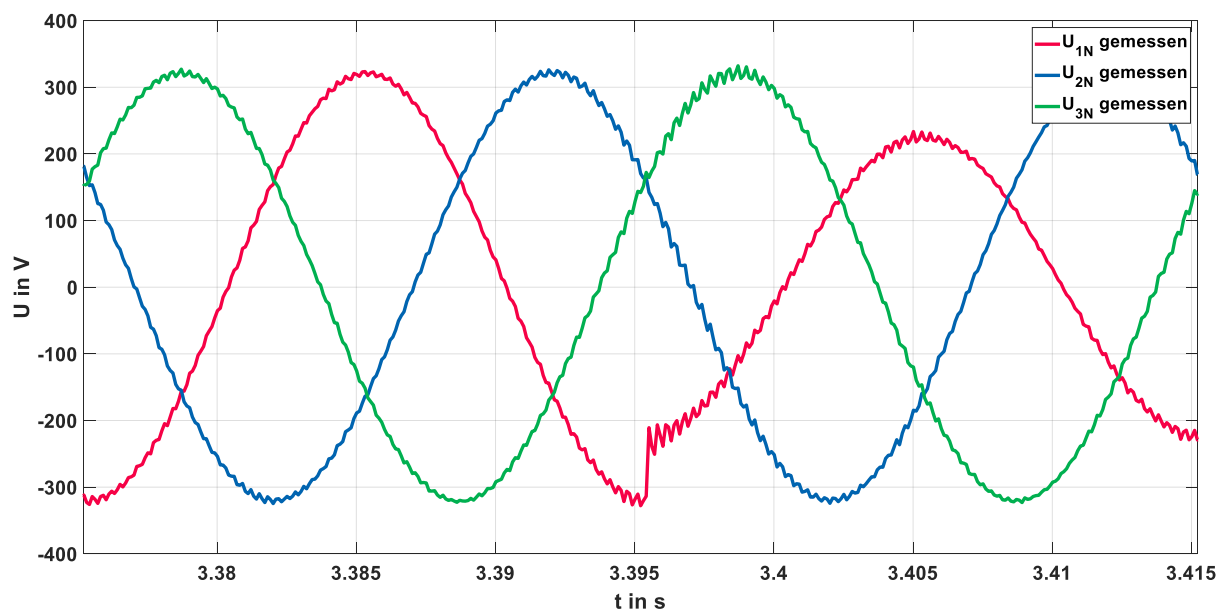


Abbildung 43 Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers bei ohmsch-induktiver Netzimpedanz während eines Spannungseinbruchs

Um die Frequenz der Schwingungen genauer zu analysieren, ist in der folgenden Abbildung der Übergang zur unsymmetrischen Versorgungsspannung in Phase L2 aus Abbildung 42 nochmals genauer dargestellt.

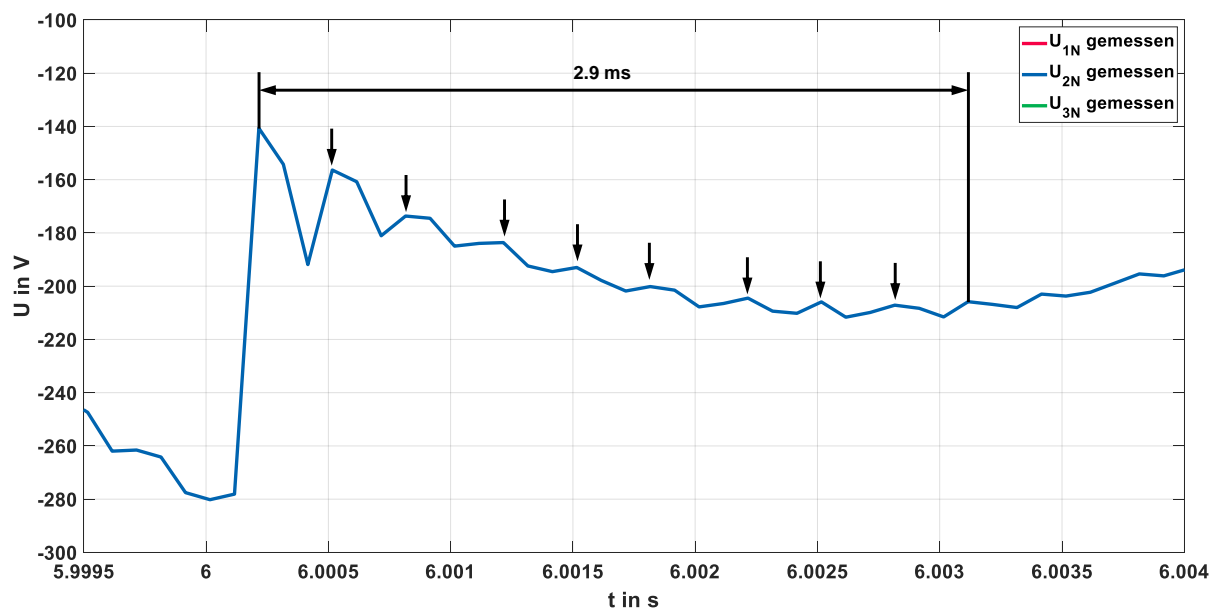


Abbildung 44 Vergrößerung der Messergebnisse des Übergangs zur Prüfspannung in Phase L2 bei ohmscher Last

Wird die Periodendauer über einen gewissen Zeitraum gemittelt, wie in Abbildung 44 gezeigt wird, erhält man das folgende Ergebnis.

$$T = \frac{2,9 \text{ ms}}{9} = 322,22 \mu\text{s} \quad (5.14)$$

5.2.4 Ergebnisse aus Versuchen mit ohmsch-induktiver Last

Zusätzlich zu den Messungen mit rein ohmscher Last, wurden auch Versuche mit ohmsch-induktiver Last durchgeführt. Da keine Drossel zur Verfügung stand, der in Abbildung 34 gezeigte Transformator in Serie mit den ohmschen Widerständen verschaltet. Der Transformator besitzt vier Wicklungen pro Schenkel, von denen je die äußere Wicklung eines Schenkels benutzt wurde. Alle anderen Wicklungen befanden sich im Leerlauf. Das genaue Schaltbild der Last, die mit den Ausgängen des Leistungsverstärkers verbunden wurde, wird in Abbildung 45 gezeigt.

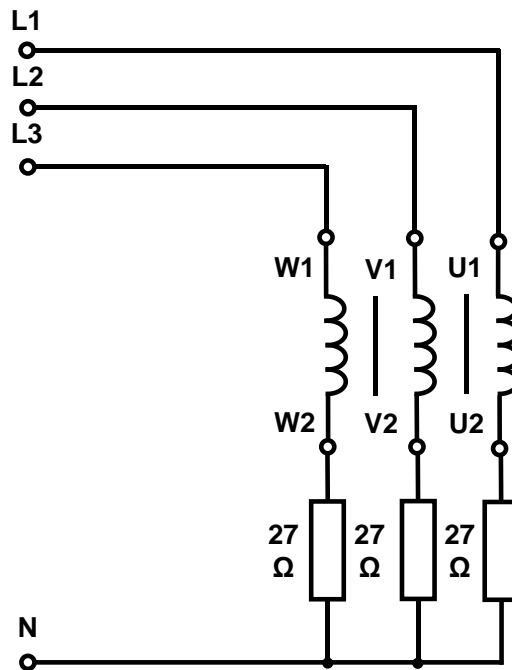


Abbildung 45 Für die Messungen verwendete ohmsch-induktive Last

Wie bei den Messungen mit ohmscher Last wurden Messungen bei allen Prüfverfahren durchgeführt. Abbildung 46 zeigt die Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers bei einem Spannungseinbruch auf 70 %. Am Übergang zur Prüfspannung tritt wie bei den vorhergehenden Messungen ein Schwingen auf, aber nicht in demselben Ausmaß wie bei der ohmschen Last. Dies liegt an der Induktivität der Last, die schnelle Stromanstiege dämpft.

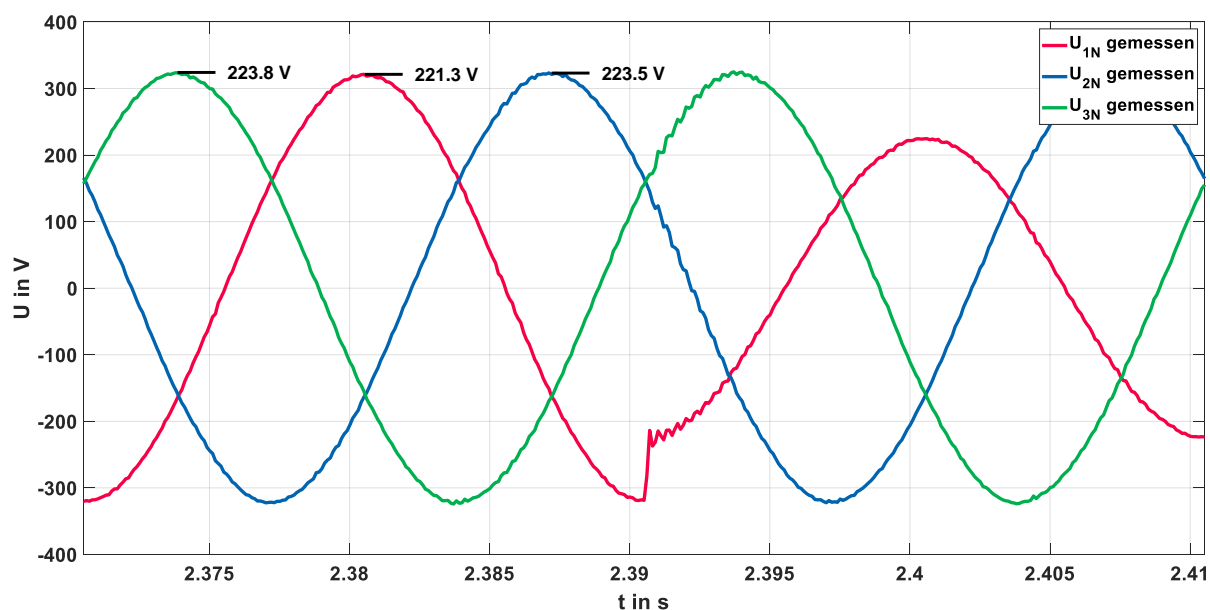


Abbildung 46 Ausgangsspannungen des Leistungsverstärkers bei einem Spannungseinbruch mit ohmsch-induktiver Belastung

Die gemessenen Ströme an der Last in Abbildung 47 weisen einen nicht sinusförmigen Verlauf auf. Vergleicht man die Strom- und Spannungsamplituden in beiden Abbildungen, macht sich wieder der Einfluss der simulierten Netzimpedanz bemerkbar. Der höhere Strom in Phase L1 führt zu einem höheren Spannungsabfall an der Netzimpedanz, daher ist die Spannung in dieser Phase niedriger als in den anderen beiden.

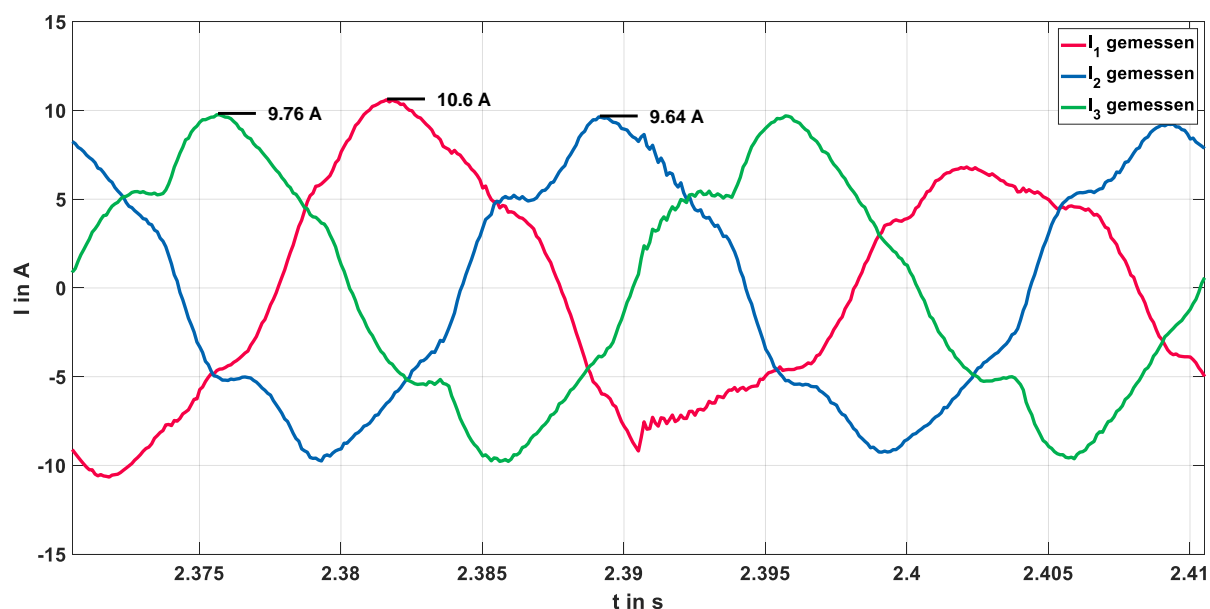
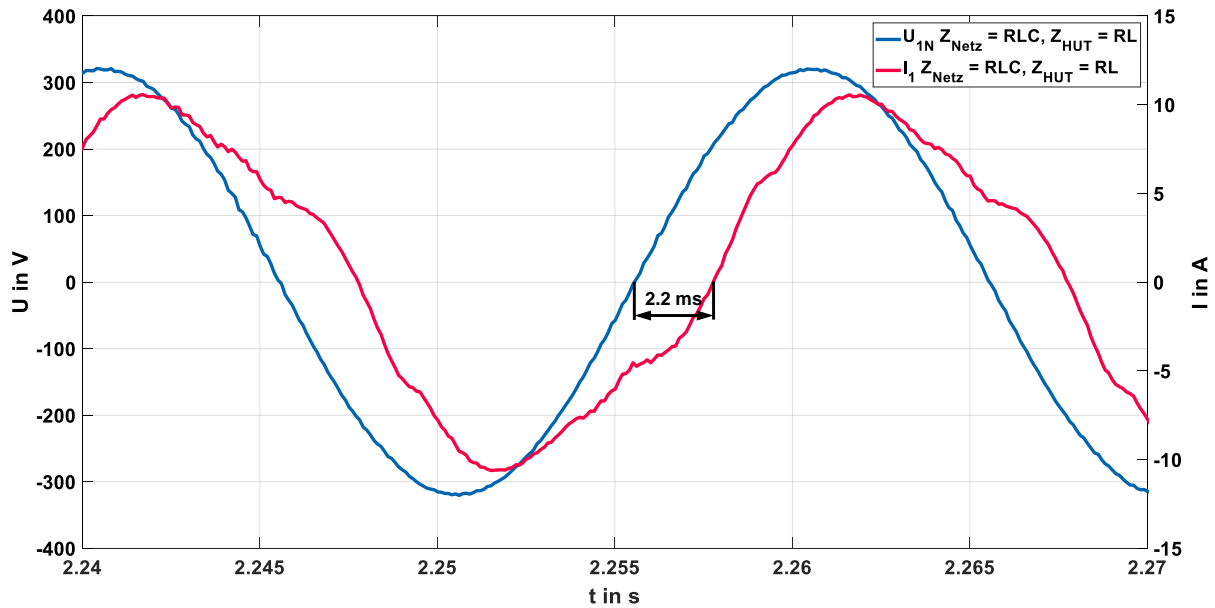


Abbildung 47 Ausgangsströme des Leistungsverstärkers bei einem Spannungseinbruch mit ohmsch-induktiver Belastung

Da die genauen Werte des Transformators unbekannt waren, wurden aus der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung noch die Mitimpedanz und daraus die Induktivität bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die Phasenverschiebung der Phase L1 im Nulldurchgang.



Der gemessene Strom eilt der Spannung um den folgenden Winkel nach.

$$\varphi_{I1} = -\frac{2,2 \text{ ms}}{20 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = -39,6^\circ \quad (5.15)$$

Der Winkel des Stroms entspricht dem negativen Winkel der Gesamtimpedanz. Geht man davon aus, dass der Widerstand des Transformators im Vergleich zu den Lastwiderständen sehr klein ist, kann der Imaginärteil der Gesamtimpedanz mit der folgenden Formel berechnet werden. Der Realteil setzt sich dabei aus dem bekannten Lastwiderstand (27Ω) und dem ohmschen Anteil der Netzimpedanz ($0,24 \Omega$) zusammen.

$$X_{\text{ges1}} = (R_1 + R_{\text{HUT1}}) \cdot \tan(\varphi_{I1}) = (27 \Omega + 0,24 \Omega) \cdot \tan(42,3^\circ) = 22,53 \Omega \quad (5.16)$$

Von der gesamten Reaktanz muss dann noch der Anteil der Netzimpedanz abgezogen werden, um die Induktivität des Transformators zu berechnen.

$$L_{\text{HUT1}} = \frac{X_{\text{ges1}} - X_{\text{Netz}}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{24,79 \Omega - 0,15 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 71,2 \text{ mH} \quad (5.17)$$

Die Induktivitäten des Transformators im Leerlauf wurden für die anderen beiden Phasen mit derselben Vorgehensweise bestimmt und ergaben die folgenden Werte.

$$\begin{aligned} L_{\text{HUT2}} &= 66,8 \text{ mH} \\ L_{\text{HUT3}} &= 43,7 \text{ mH} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Der Transformator weist somit unterschiedliche Induktivitätswerte in den einzelnen Wicklungen auf, daher verhalten sich auch die Ströme und Spannungen unsymmetrisch, wie den obigen Abbildungen entnommen werden kann.

6 Diskussion

Für diese Arbeit wurde untersucht, welche internationalen Normen und Richtlinien beim Testen von Niederspannungsgeräten bei verschiedenen Zuständen des Netzes beachtet werden müssen. Dabei wurde besonders auf die vorgeschlagenen Prüfverfahren geachtet und welche Anforderungen an die Prüfspannungsquelle gestellt werden. Es konnte herausgefunden werden, dass nicht alle Arten von Betriebsmitteln gleichermaßen von den Normen abgedeckt werden. Für Verbraucher mit Strömen unter 16 A werden unterschiedliche Prüfungen von dem internationalen IEC Standard 61000-4 festgelegt, diese gelten für Netze mit einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz. Die maximale Frequenz für leitungsgeführte Störungen, die von der Norm erfasst wird, ist die der 40. Oberschwingung (2 kHz oder 2,4 kHz). Überschreiten die Ströme eines Verbrauchers 16 A werden nur noch Prüfungen für Spannungseinbrüche definiert. Außerdem ist zu beachten, dass die Anwendung der Norm unverbindlich ist. Handelt es sich bei dem zu prüfenden Gerät um einen Erzeuger, sind die Prüfungen nach IEC 61000-4 nicht mehr gültig. Es sind dann unterschiedliche nationale Richtlinien und Normen zu beachten, da es keine einheitlichen internationalen Standards für Erzeuger gibt. Detaillierte Informationen über Prüfverfahren sind darin aber kaum enthalten.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Normung von Tests für Niederspannungsgeräte noch unvollständig ist. Die Prüfungen, die vorgeschlagen werden, werden meist mit einer idealen Spannungsquelle durchgeführt, also einer Spannungsquelle, die keinen Innenwiderstand besitzt. Die in der Realität vorhandene Netzimpedanz zwischen Anschlusspunkt und Erzeugung wird bei einer solchen Prüfung nicht berücksichtigt. Zwar existiert auch eine Norm, die Werte der Netzimpedanz vorgibt, diese kommen aber speziell bei den Prüfungen für die Störfestigkeit von Geräten nur bedingt zum Einsatz.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Modell aufgebaut, welches die Ausgangsspannungen eines Leistungsverstärkers regelt. Mit diesem ist es durch Verwendung des Power-Hardware-in-the-Loop Konzepts möglich, ein Netz mit einer gewissen Impedanz zu simulieren. Zusätzlich wurden einige der Prüfverfahren für Verbraucher in das Modell integriert, damit ist es nun möglich diese Prüfungen mit einer Netzimpedanz durchzuführen und nicht nur mit einer idealen Spannungsquelle.

Um die Funktionalität des Modells und den Einfluss der Netzimpedanz bei verschiedenen Prüfungen zu überprüfen, wurden mehrere Versuche im Power Hardware in the Loop Labor mit verschiedenen Lasten durchgeführt. Dabei kam ein Aufbau bestehend aus einem Leistungsverstärker und einem Echtzeitsystem zum Einsatz. Im Leerlauf wurde zunächst überprüft ob die Prüfverfahren, korrekt vom Leistungsverstärker wiedergegeben werden. Bis auf die Verzögerung zwischen der Ausgabe von Spannungswerten des Echtzeitrechners, der tatsächlichen Ausgabe von diesen durch den Leistungsverstärker und der Messung von diesen folgte die gemessene Spannung mit guter Genauigkeit der vorgegebenen. Nur bei dem Prüfverfahren „Flache Kurve“ kam es im flachen Teil zu einem Absinken der Spannung, da das Verhalten bei der Simulation nicht auftrat, kann davon ausgegangen werden, dass die Ursache bei der internen Regelung des Leistungsverstärkers liegt. Der Effekt konnte nicht gänzlich behoben werden, blieb aber in einem akzeptablen Ausmaß. An den

Übergängen zur Prüfspannung wurde bei allen Prüfungen ein leichtes Überschwingen der gemessenen Spannung gegenüber der Vorgabe beobachtet. Dieses Verhalten ist in Abbildung 37 dargestellt, bereits die vorgegebene Spannung weist ein leichtes Überschwingen gegenüber der idealen Spannung auf, welches durch die Kapazitäten des Modells erzeugt wird die auch im Leerlauf wirksam sind. In der gemessenen Spannung tritt dieses Überschwingen noch stärker auf, es kann angenommen werden, dass dieses Verhalten auf die interne Regelung des verwendeten Leistungsverstärkers zurückzuführen ist.

Um den Einfluss der Netzimpedanz zu untersuchen, wurde im Anschluss zu den Leerlaufversuchen der Leistungsverstärker belastet. Dafür wurde eine ohmsche Last von 27Ω je Phase im Stern mit den Ausgängen des Verstärkers verschalten. Für die simulierte Netzimpedanz, die bei den Versuchen zum Einsatz kam, wurde ebenfalls ein IEC Standard herangezogen. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 20 dargestellt und stellen Referenzwerte für 50 Hz Niederspannungsnetze dar. Da die Netzimpedanz im Vergleich zum Lastwiderstand gering ist, wurde versucht, den Lastwiderstand zu vergrößern, um einen höheren Strom zu erreichen. Dies führte aber zu Problemen mit der Stabilität des Systems, deshalb wurde eine Vergrößerung der Last für weitere Messungen unterlassen. Trotzdem konnte der Einfluss der simulierten Netzimpedanz beobachtet werden. Durch die Belastung kam es zu einem Absinken der Ausgangsspannung entsprechend dem Spannungsteiler zwischen Last und Netzimpedanz. Dies wurde zum Beispiel bei der Prüfung mit unsymmetrischer Versorgung mit der Berechnung (5.12) überprüft. Auch die Auswirkung der Kopplung zwischen den Phasen, die durch die Netzimpedanz implementiert wurde, konnte beobachtet werden. So kommt es z. B. in Abbildung 39 zu einer Einkopplung der Schwingungen, die in der Phase mit dem Spannungseinbruch entstehen, in die beiden fehlerfreien Phasen.

Im Gegensatz zu den von den Normen vorgeschlagenen Prüfungen mit einer idealen Spannungsquelle erfolgt durch die Berücksichtigung der Netzimpedanz eine Prüfung bei realitätsgetreueren Verhältnissen. Effekte wie ein Absinken der Spannung bei Belastung können so erzeugt werden. Handelt es sich beispielsweise bei dem zu prüfenden Betriebsmittel um einen Umrichter, der seine Ausgangsspannung konstant hält, würde ein Spannungseinbruch an einer idealen Prüfspannungsquelle nur einen Anstieg des Stroms bedeuten, bis die Stromgrenzen der Quelle erreicht sind. Wird aber die Netzimpedanz ebenso berücksichtigt, führt ein Anstieg des Stroms zu einer weiteren Verminderung der Prüfspannung und diese wieder zu noch größerem Stromanstieg. Der Umrichter würde so viel schneller an seine Grenzen kommen als bei einer Prüfung mit einer idealen Spannungsquelle. Da das reale Netz keiner idealen Spannungsquelle entspricht, ist es auch zweckmäßig, die Betriebsmittel, die daran angeschlossen werden, unter Berücksichtigung der Netzimpedanz zu prüfen. Eine solche Prüfung kann mit dem aufgebauten System und entworfenen Modell der Netzimpedanz durchgeführt werden.

Es konnten aber auch noch Probleme mit dem verwendeten System festgestellt werden. Speziell an den Übergängen zwischen fehlerfreier Spannung und Prüfspannung treten häufig Schwingungen auf. Dieses Verhalten konnte sowohl in der Simulation als auch bei den Messungen im Labor beobachtet werden. Die Ursache von diesen konnte auf die Verzögerung der Rückkopplung des Stroms

zurückgeführt werden. Sie entsteht zwischen Vorgabe der Spannungswerte, deren Ausgabe durch den Leistungsverstärker und die Messung der Stromwerte.

Bei der Simulation wurde als Verzögerung der rückgekoppelten Ströme eine Abtastperiode gewählt. Dies entspricht bei einer Abtastrate von 10 kHz einer Zeit von 100 μs . Im Labor entsteht die Verzögerung zwischen Vorgabe der Spannungswerte, deren Ausgabe und deren Messung. Diese wurde bei den Leerlaufversuchen ermittelt und ergibt nach Gleichung (5.6) 160,98 μs , sie liegt daher zwischen einem und zwei Abtastperioden des Systems. Somit ergibt sich bei der Simulation sowie bei den Messungen eine Schwingung mit der doppelten Verzögerungszeit t_v als Periodendauer, deren Frequenz mit der folgenden Formel bestimmt werden kann.

$$f_v = \frac{1}{2 \cdot t_v} \quad (6.1)$$

Um die Entstehung zu beschreiben, wird in Abbildung 48 die Spannung, die dem Leistungsverstärker vorgegeben wird, gemeinsam mit dem gemessenen Strom für die Phase L2 während einem Spannungseinbruch, gezeigt. Die Spannung stellt dabei die Ausgangsgröße des Modells dar und der Strom die Eingangsgröße.

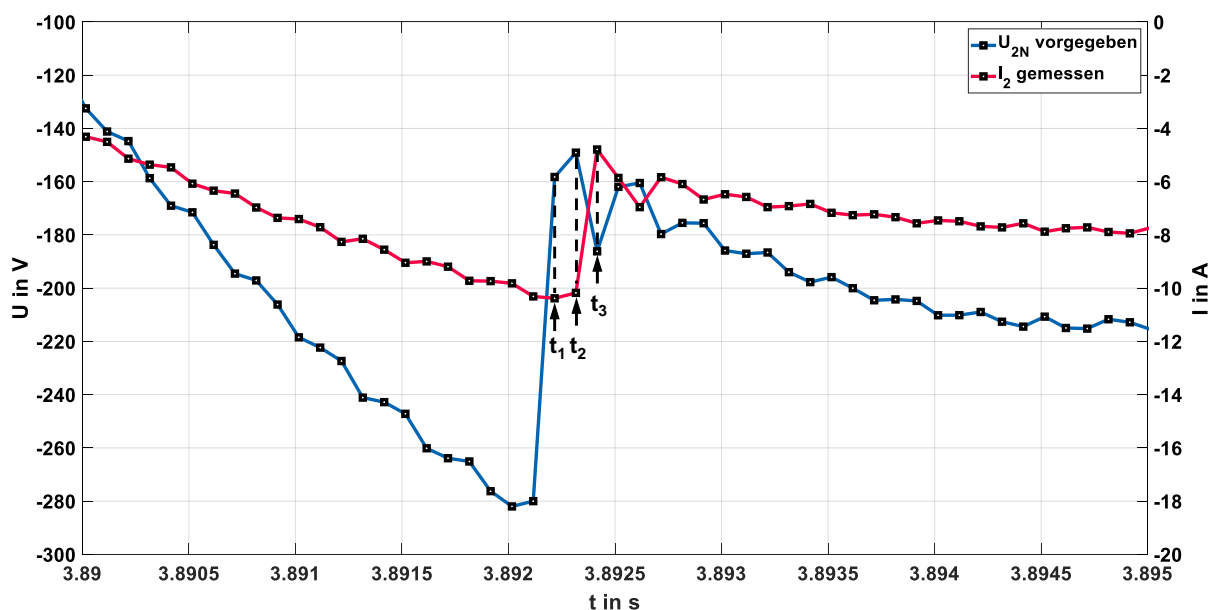


Abbildung 48 Spannungsvorgabe und gemessener Strom in Phase L2 zu Prüfungsbeginn bei ohmscher Last

Der Zeitpunkt t_1 stellt den Prüfungsbeginn dar, dem Leistungsverstärker wird eine verringerte Spannung vorgegeben. Diese wird vom Leistungsverstärker verzögert ausgegeben, daher folgt der Strom der Spannung noch nicht. Der Spannungsabfall an der Netzimpedanz wird also mit einem höheren Strom berechnet. Dies gilt auch für den Zeitpunkt t_2 , an dem der tatsächlich fließende Strom noch nicht abgesunken ist. Die Spannungsvorgabe sinkt daher nur mehr leicht ab gegenüber t_1 . Erst zum Zeitpunkt t_3 folgt der Strom der Spannungsvorgabe und nimmt ab. Da sich der Strom verringert hat, wird auch der berechnete Spannungsabfall an der Netzimpedanz weniger, dadurch steigt wiederum der Wert für die Ausgangsspannung. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrere Male und führt zu einem Schwingen der Spannung bei solchen schnellen Änderungen.

Ein Faktor, der das Schwingen noch erhöht, sind die mit dem Modell simulierten Längsinduktivitäten. Um den Spannungsabfall, der an ihnen entsteht, zu erhalten, wird der Eingangsstrom differenziert. Sprunghafte Änderungen des Stroms führen so zu noch schnelleren Änderungen der Spannung. Dies begründet auch, warum das Modell mit Kapazitäten ein besseres Ergebnis als beim Modell mit rein ohmsch induktiver Netzimpedanz, siehe Abbildung 43. Ohne die Kapazitäten wird in dem implementierten Modell direkt über den gemessenen Strom differenziert, durch die Kapazitäten kommt ein integrierender Anteil hinzu, der das Verhalten verbessert.

Somit konnte mit dem verwendeten System, besonders an den Übergängen zur Prüfspannung der Einfluss der Netzimpedanz, nicht einwandfrei beobachtet werden, da diese von unerwünschten Schwingungen überlagert wurden. Wie durch die Ergebnisse der Simulation in Abschnitt 5.1 gezeigt werden konnte, kann das Verhalten des Systems durch Minimierung der Verzögerung der Rückkopplung und durch eine höhere Abtastrate zur Berechnung der Spannungswerte eine Verbesserung des Systems erzielt werden. So konnte bei einer Abtastrate von 100 kHz und einer Verzögerung von 10 μ s bereits ein gutes Ergebnis erzielt werden, wie Abbildung 29 gezeigt hat. Dazu ist anzumerken, dass die auftretende Schwingung, die durch die Netzimpedanz entsteht, am Übergang zur Prüfspannung eine Frequenz von ca. 12,5 kHz besitzt und somit eine korrekte Darstellung mit einer Abtastrate von 10 kHz gar nicht möglich ist. Eine Erhöhung der Abtastrate kann z. B. durch Verwendung der Modelle direkt auf einem FPGA erreicht werden, dafür wurden jene auch vorgesehen. Außerdem kann durch bestimmte Kompensations-Algorithmen die Zeitverzögerung kompensiert werden [39].

7 Literatur

- [1] Joint Working Group C4.24/CIREC, „Power Quality and EMC Issues with Future Electricity Networks“, 2018.
- [2] IEC, „OVE EN 61000-4-11: EMC – Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests“, 2019.
- [3] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-14: EMC – Testing and measurement techniques – Voltage fluctuation immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase“, 2010.
- [4] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-34 EMC – Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with mains current more than 16 A per phase“, 2010.
- [5] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-13: EMC – Testing and measurement techniques – Harmonics and interharmonics including mains signalling at a.c. power port, low frequency immunity tests“, 2016.
- [6] IEC, „ÖVE/ÖNORMEN 61000-4-27: EMC – Testing and measurement techniques – Unbalance, immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase“, 2010.
- [7] IEC, „ÖVE/ÖNORMEN 61000-4-28: EMC – Testing and measurement techniques – Variation of power frequency, immunity test for equipment with input current not exceeding 16 A per phase“, 2010.
- [8] Spitzenberger & Spies, „PAS Serie 4-Quadranten Verstärker Datenblatt“, 2013.
- [9] Spitzenberger & Spies, „APS Serie Leistungsverstärker Datenblatt“.
- [10] Regatron, „TC.ACS.50 Data Sheet“, 2019.
- [11] Cinergia, „GE & EL + vAC Data Sheet“, 2019.
- [12] Chroma ATE, „Model 61800 Series Data Sheet“.
- [13] AMETEK, „CTS Series 3.2 Data Sheet“.
- [14] AMETEK, „MX CTS Series Data Sheet“.
- [15] HEIDEN power, „HGE15 Datenblatt“.
- [16] BeXema GmbH, „<https://bexema.com/de/produkte/hochvolt-emulatoren/ac-netz-emulator/>“.
- [17] NH Research, „Model 9420 AC Power Source Data Sheet“.
- [18] Preen, „PAS/PFV Series Product Catalogue“.
- [19] OPAL-RT, „OP1400 Series Datenblatt“.

- [20] EGSTON Power, „COMPISO System Unit 200-1GAMP6 Product Folder“, 2019.
- [21] IEC, „IEC/TR 61000-3-15: EMC – Limits – Assessment of low frequency electromagnetic immunity and emission requirements for dispersed generation systems in LV network“, 2011.
- [22] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2: EMC – Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)“, 2015.
- [23] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3: EMC – Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection“, 2014.
- [24] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11: EMC – Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and subject to conditional connection“, 2001.
- [25] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-12: EMC – Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase“, 2012.
- [26] Energie-Control Austria, „Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, TOR Erzeuger: Anschluss und Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen des Typs A und von Kleinsterzeugungsanlagen“, 2019.
- [27] Energie-Control Austria, „Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen - TOR Erzeuger: Anschluss und Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen des Typs B“, 2019.
- [28] Energy Networks Association, „Engineering Recommendation G98 Issue 1 Amendment 4 June 2019 Requirements for the connection of Fully Type Tested Micro-generators (up to and including 16 A per phase) in parallel with public Low Voltage Distribution Networks“, Nr. 1, 2019.
- [29] Energy Networks Association, „Engineering Recommendation G99 Issue 1 Amendment 4 June 2019 Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks“, Nr. 1, 2019.
- [30] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., „VDE-AR-N 4105, Die Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, 2011.
- [31] ENTSO-E, „VERORDNUNG (EU) 2016/631 DER KOMMISSION vom 14. April 2016 zur Festlegung eines Netzkodex mit Netzanschlussbestimmungen für Stromerzeuger“, *Amtsblatt der Eur. Union*, Nr. 2, 2016.
- [32] IEEE Standard Association, *IEEE Std. 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. 2018.

-
- [33] IEEE Standard Association, *IEEE Std 1547.1-2005 1547.1, IEEE Standard Conformance Test Procedures for Distributed Resources with Equipment Interconnecting Electric Power Systems IEEE Standards Coordinating Committee 21 Sponsored by the IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fu.* 2005.
- [34] Underwriters Laboratories Inc., *Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources.* 2007.
- [35] IEC, „IEC/TR 60725 Consideration of reference impedances and public supply network impedances for use in determining the disturbance characteristics of electrical equipment having a rated current <75 A per phase“, 2012.
- [36] IEC, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-4: EMC – Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances“, 2003.
- [37] E. De Jong u. a., *European White Book on Real-Time Power Hardware-in-the-loop testing Resources Laboratories European White Book on Real-Time Powerhardware-in-the-Loop testing Erik de Jong*, Nr. January. 2011.
- [38] P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, G. Messinis, und N. Hatzigryriou, „Design, development and operation of a PHIL environment for Distributed Energy Resources“, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, S. 4765–4770, 2012, doi: 10.1109/IECON.2012.6389005.
- [39] E. Guillo-Sansano, A. J. Roscoe, C. E. Jones, und G. M. Burt, „A new control method for the power interface in power hardware-in-the-loop simulation to compensate for the time delay“, *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, S. 1–5, 2014, doi: 10.1109/UPEC.2014.6934618.
- [40] H. Renner, K. Köck, und A. Rainer, „Elektrische Energiesysteme Laborskriptum“, 2016.
- [41] M. Horn, „Regelungstechnik - Skriptum“, 2015.
- [42] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1.* 2012.
- [43] M. Horn, „Systemtechnik - Skriptum“, 2015.
- [44] HELUKABEL, „HELUKABEL Katalog“, Nr. 27, S. 206, 2015.

8 Appendix

8.1 Initialisierungsdatei zur Simulation

```

%-----%
% clear;
% clc;
% close all;
% Simulink.sdi.clear          % Clear Simulation Data Inspector
%-----%
%% Einstellbare Parameter:
Ts = 100e-6;                  % Sample time
stop_time = 2;               % Simulationsdauer
% Auswahl der Werte für die Netzspannung-----%
U_N = 400;                    % Nennspannung
phi_start_grad = 0;          % Einschaltphasenwinkel bez. auf U_L1
f_N = 50;                     % Nennfrequenz

% Auswahl der Werte für die Netzimpedanz-----%
R = 0.24;                     % Sym. Längswiderstand
L = 477.76e-6;                % Sym. Längsinduktivität
R_N = 0.16;                   % Widerstand im Neutralleiter
L_N = 318.3e-6;               % Induktivität im Neutralleiter
L_K = 0; % 100e-6;            % Induktive Kopplung sym.
C_E = 230e-9;                 % Erdkapazität sym.
C_K = 140e-9;                 % Kapazitive Kopplung sym.

% Unsymmetrische Werte für die Impedanzen
R1 = R; R2 = R; R3 = R;
L1 = L; L2 = L; L3 = L;
L12 = L_K; L23 = L_K; L31 = L_K;
CE1 = C_E; CE2 = C_E; CE3 = C_E;
C12 = C_K; C23 = C_K; C31 = C_K;

% Auswahl von Prüfung und Prüfklasse-----%
en_test = 1;                  % Prüfablauf Auswahl
    % 1 = keine Prüfung, fehlerfreie Spannung
    % 2 = Prüfverfahren Spannungseinbruch
    % 3 = Prüfverfahren "Flache Kurve"
    % 4 = Prüfverfahren "Überschwingen"
    % 5 = Prüfverfahren für Unsymmetrie

class = 3;                    % Auswahl der Prüfklasse (für Prfg. 3, 4 & 5)

% Auswahl der Parameter für Prüfung Spannungseinbrüche-----%
U_rest = 0.7;                 % Verbleibende Spannung U/UN
N = 25;                       % Anzahl der Fehlerperioden (25)
T_pause2 = 10;                % Abstand zwischen den Einbrüchen (10s)
phi_fail = 0;                 % Phasenverschiebung des Spannungseinbruchs
                                % zum Nulldurchgang in Grad

% Auswahl der Parameter für Prüfung Unsymmetrie-----%
T_pause5 = 0.5;               % Pause zwischen den Prüfungen

```

```

%-----%
%% Berechnung von Impedanzmatrizen und Werten für die Netzspannung
%-----%
%   Impedanz Matrizen erstellen
R_mat = diag([R1 R2 R3]) + R_N;

L_mat = [L1 L12 L23; L12 L2 L23; L31 L23 L3] + L_N;
L_mat_inv = inv(L_mat);

C_mat = [CE1+C12+C31 -C12 -C31; -C12 CE2+C12+C23 -C23; -C31 -C23
CE3+C23+C31];
C_mat_inv = inv(C_mat);

% Berechnung der Matrizen für zeitkontinuierliches System
Ac = [-L_mat_inv*R_mat -L_mat_inv; C_mat_inv zeros(3)];
Bc = [L_mat_inv zeros(3); zeros(3) -C_mat_inv];

% Konvertieren der Matrizen für zeitdiskretes System
Ad = inv(eye(6) - Ts*Ac);
Bd = Ts*Ad*Bc;

T = 1/f_N; % Periodendauer
omega_N = 2*pi*f_N; % Kreisfrequenz
U_peak = U_N*sqrt(2)/sqrt(3); % Amplitudenwert der Prüfspannung

phi_UL1_start = phi_start_grad*2*pi/360; % Startphasenwinkel von U_L1/rad
phi_UL2_start = phi_UL1_start - 2*pi/3; % Startphasenwinkel von U_L2/rad
phi_UL3_start = phi_UL1_start - 4*pi/3; % Startphasenwinkel von U_L3/rad

%-----%
%% Berechnungen für Prüfverfahren Spannungseinbrüche
%-----%
T_fail = N*T; % Fehlerdauer
t_sine_max = T-Ts/4; % Max. Wert für Erzeugung der Zeit

% Umrechnung eines Spannungseinbruchs der Verketteten auf die
% Phasenspannung
U_rest_2_c = U_rest*sqrt(3)*exp(1i*pi/6) + exp(-1i*2*pi/3);
U_rest_2 = abs(U_rest_2_c); % Verbleibende Amplitude der Phasenspannung
phi_rest_2 = angle(U_rest_2_c); % Phasenverschiebung der Phasenspannung

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der Phasenspannung für U_1N
t_on1 = 1 + phi_fail/360*T; % Erster Spannungseinbruch
t_off1 = t_on1 + T_fail;
t_on2 = t_off1 + T_pause2;
t_off2 = t_on2 + T_fail;
t_on3 = t_off2 + T_pause2;
t_off3 = t_on3 + T_fail;

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der Phasenspannung für U_2N
t_on4 = t_off3 + T_pause2 + 120*T/360;
t_off4 = t_on4 + T_fail;
t_on5 = t_off4 + T_pause2;
t_off5 = t_on5 + T_fail;
t_on6 = t_off5 + T_pause2;
t_off6 = t_on6 + T_fail;

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der Phasenspannung für U_3N
t_on7 = t_off6 + T_pause2 + 120*T/360;
t_off7 = t_on7 + T_fail;

```

```
t_on8 = t_off7 + T_pause2;
t_off8 = t_on8 + T_fail;
t_on9 = t_off8 + T_pause2;
t_off9 = t_on9 + T_fail;

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der verketteten Spannung U12
t_on10 = t_off9 + T_pause2 + 90*T/360;
t_off10 = t_on10 + T_fail;
t_on11 = t_off10 + T_pause2;
t_off11 = t_on11 + T_fail;
t_on12 = t_off11 + T_pause2;
t_off12 = t_on12 + T_fail;

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der verketteten Spannung U23
t_on13 = t_off12 + T_pause2 + 120*T/360;
t_off13 = t_on13 + T_fail;
t_on14 = t_off13 + T_pause2;
t_off14 = t_on14 + T_fail;
t_on15 = t_off14 + T_pause2;
t_off15 = t_on15 + T_fail;

% Zeitpunkte der Spannungseinbrüche in der verketteten Spannung U31
t_on16 = t_off15 + T_pause2 + 120*T/360;
t_off16 = t_on16 + T_fail;
t_on17 = t_off16 + T_pause2;
t_off17 = t_on17 + T_fail;
t_on18 = t_off17 + T_pause2;
t_off18 = t_on18 + T_fail;

%-----%
%% Parameter für Prüfverfahren "Flache Kurve"
%-----%

% Auswahl der Prüfpegel nach Prüfklasse
if class == 1 % Parameter für Klasse 1 Prüfung
    Ky = 1.0133; % Faktor mit dem die Spannungsamplitude
                % multipliziert wird
    limit = Ky*0.95; % Prozentwert bei dem die Sinusschwingung
                    % "abgeschnitten" wird
elseif class == 2 % Parameter für Klasse 2 Prüfung
    Ky = 1.0379;
    limit = Ky*0.9;
elseif class == 3 % Parameter für Klasse 3 Prüfung
    Ky = 1.1117;
    limit = Ky*0.8;
else % Frei einstellbare Parameter
    Ky = 1;
    limit = 1;
end

%-----%
%% Parameter für Prüfverfahren "Überschwingen"
%-----%

if class == 1 % Parameter für Klasse 1 Prüfung
    u_h3 = 0.04;
    u_h5 = 0.03;
elseif class == 2 % Parameter für Klasse 2 Prüfung
    u_h3 = 0.06;
    u_h5 = 0.04;
elseif class == 3 % Parameter für Klasse 3 Prüfung
```

```

    u_h3 = 0.08;
    u_h5 = 0.05;
else                                     % Frei einstellbare Parameter
    u_h3 = 0;
    u_h5 = 0;
end

% Umrechnung der Faktoren damit der resultierende Effektivwert gleich dem
% Effektivwert der unveränderten Spannung bleibt

% Faktor mit dem Amplitude der Grundschwingung multipliziert werden muss:
K_U1 = 1/sqrt(1 + u_h3^2 + u_h5^2);

u_h3 = K_U1*u_h3;                       % Faktoren bezogen auf die "neue"
u_h5 = K_U1*u_h5;                       % Grundschwingung

%------%
%% Prüfpegel und -zeitpunkte für Prüfverfahren "Unsymmetrie"
%------%
% Auswahl der Prüfpegel nach Prüfklasse
if class == 1                           % Parameter für Klasse 1 Prüfung
    disp('Kein Unsymmetrie Test für Kl. 1 nötig');
    en_test = 1;

    T_test1 = 0; T_test2 = 0; T_test3 = 0;

    Ua_test1 = 1; Ub_test1 = 1; Uc_test1 = 1;
    Ua_test2 = 1; Ub_test2 = 1; Uc_test2 = 1;
    Ua_test3 = 1; Ub_test3 = 1; Uc_test3 = 1;

    phib_test1 = 0*pi/180; phic_test1 = 0*pi/180;
    phib_test2 = 0*pi/180; phic_test2 = 0*pi/180;
    phib_test3 = 0*pi/180; phic_test3 = 0*pi/180;

elseif class == 2                       % Parameter für Klasse 2 Prüfung

    % Prüfungsdauern
    T_test1 = 30; T_test2 = 15; T_test3 = 0.1;

    % Spannungsprüfpegel
    Ua_test1 = 1; Ub_test1 = 0.952; Uc_test1 = 0.9;
    Ua_test2 = 1; Ub_test2 = 0.9; Uc_test2 = 0.8;
    Ua_test3 = 1.1; Ub_test3 = 0.66; Uc_test3 = 0.71;

    % Phasenverschiebungen für Prüfungen
    phib_test1 = (125 - 120)*pi/180; % Phasenwinkel bei Fehler - Normalwert
    phic_test1 = (240 - 240)*pi/180; % = Phasenverschiebung zum Normalwert
    phib_test2 = (131 - 120)*pi/180; phic_test2 = (239 - 240)*pi/180;
    phib_test3 = (139 - 120)*pi/180; phic_test3 = (235 - 240)*pi/180;

elseif class == 3                       % Parameter für Klasse 3 Prüfung
    T_test1 = 60; T_test2 = 15; T_test3 = 2;
    Ua_test1 = 1; Ub_test1 = 0.935; Uc_test1 = 0.87;
    Ua_test2 = 1; Ub_test2 = 0.87; Uc_test2 = 0.74;
    Ua_test3 = 1.1; Ub_test3 = 0.66; Uc_test3 = 0.71;

```

```

    phib_test1 = (127 - 120)*pi/180; phic_test1 = (240 - 240)*pi/180;
    phib_test2 = (134 - 120)*pi/180; phic_test2 = (238 - 240)*pi/180;
    phib_test3 = (139 - 120)*pi/180; phic_test3 = (235 - 240)*pi/180;
else
    % Frei einstellbare Parameter
    T_test1 = 60; T_test2 = 15; T_test3 = 2;

    Ua_test1 = 1; Ub_test1 = 1; Uc_test1 = 1;
    Ua_test2 = 1; Ub_test2 = 1; Uc_test2 = 1;
    Ua_test3 = 1; Ub_test3 = 1; Uc_test3 = 1;

    phib_test1 = 0*pi/180; phic_test1 = 0*pi/180;
    phib_test2 = 0*pi/180; phic_test2 = 0*pi/180;
    phib_test3 = 0*pi/180; phic_test3 = 0*pi/180;
end

% Berechnung der Start- und Stopzeitpunkte der Prüfungen
% Zeitpunkte für Prüfung 1 in allen drei Phasen
t_as_on1 = 1; % Start der ersten Prüfung
t_as_off1 = t_as_on1 + T_test1;
t_as_on2 = t_as_off1 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off2 = t_as_on2 + T_test1;
t_as_on3 = t_as_off2 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off3 = t_as_on3 + T_test1;

% Zeitpunkte für Prüfung 2 in allen drei Phasen
t_as_on4 = t_as_off3 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off4 = t_as_on4 + T_test2;
t_as_on5 = t_as_off4 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off5 = t_as_on5 + T_test2;
t_as_on6 = t_as_off5 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off6 = t_as_on6 + T_test2;

% Zeitpunkte für Prüfung 2 in allen drei Phasen
t_as_on7 = t_as_off6 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off7 = t_as_on7 + T_test3;
t_as_on8 = t_as_off7 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off8 = t_as_on8 + T_test3;
t_as_on9 = t_as_off8 + T_pause5 + 120/360*T;
t_as_off9 = t_as_on9 + T_test3;

%-----%
%% Simulation starten
sim('PHIL_Pruefablaeufe');
%-----%

```


8.2 Simulink® Blöcke

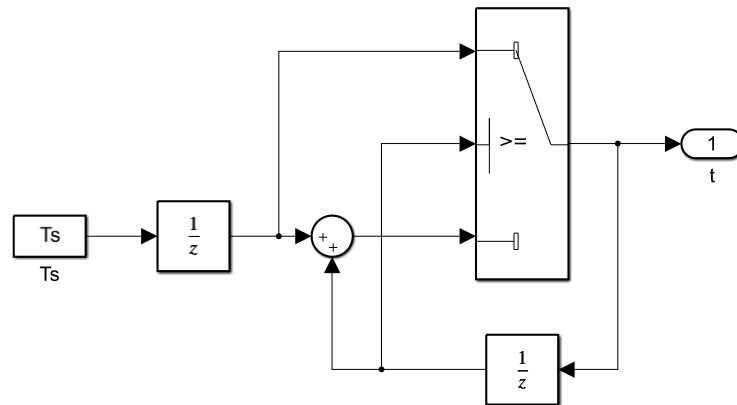


Abbildung 49 Block „Time“ Abbildung 14, Timer der zur Erstellung der Sinus-Spannungen benutzt wurde, wird bei Erreichen der Periodendauer T der Netzspannung zurückgesetzt

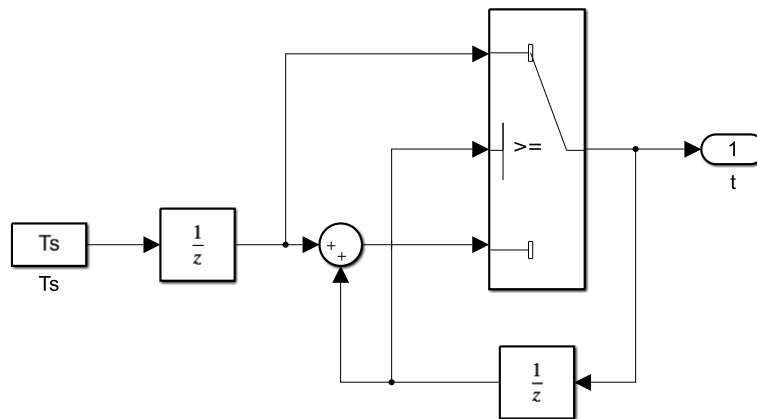


Abbildung 50 Block „Timer“ in Abbildung 17 und Abbildung 22, wird bei Start der Prüfungen für Spannungseinbrüche und Unsymmetrie gestartet und die Prüfzeit ausgibt

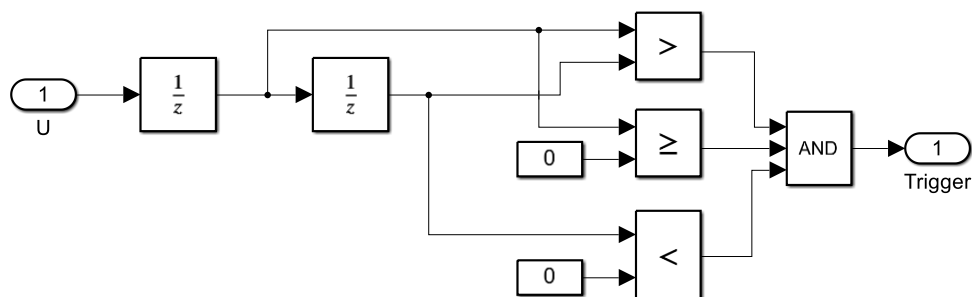


Abbildung 51 Block „Flankenerkennung“ in Abbildung 17 und Abbildung 22, synchronisiert die Prüfzeit mit der Ausgangsspannung U_{IN} bei den Prüfungen für Spannungseinbrüche und Unsymmetrie

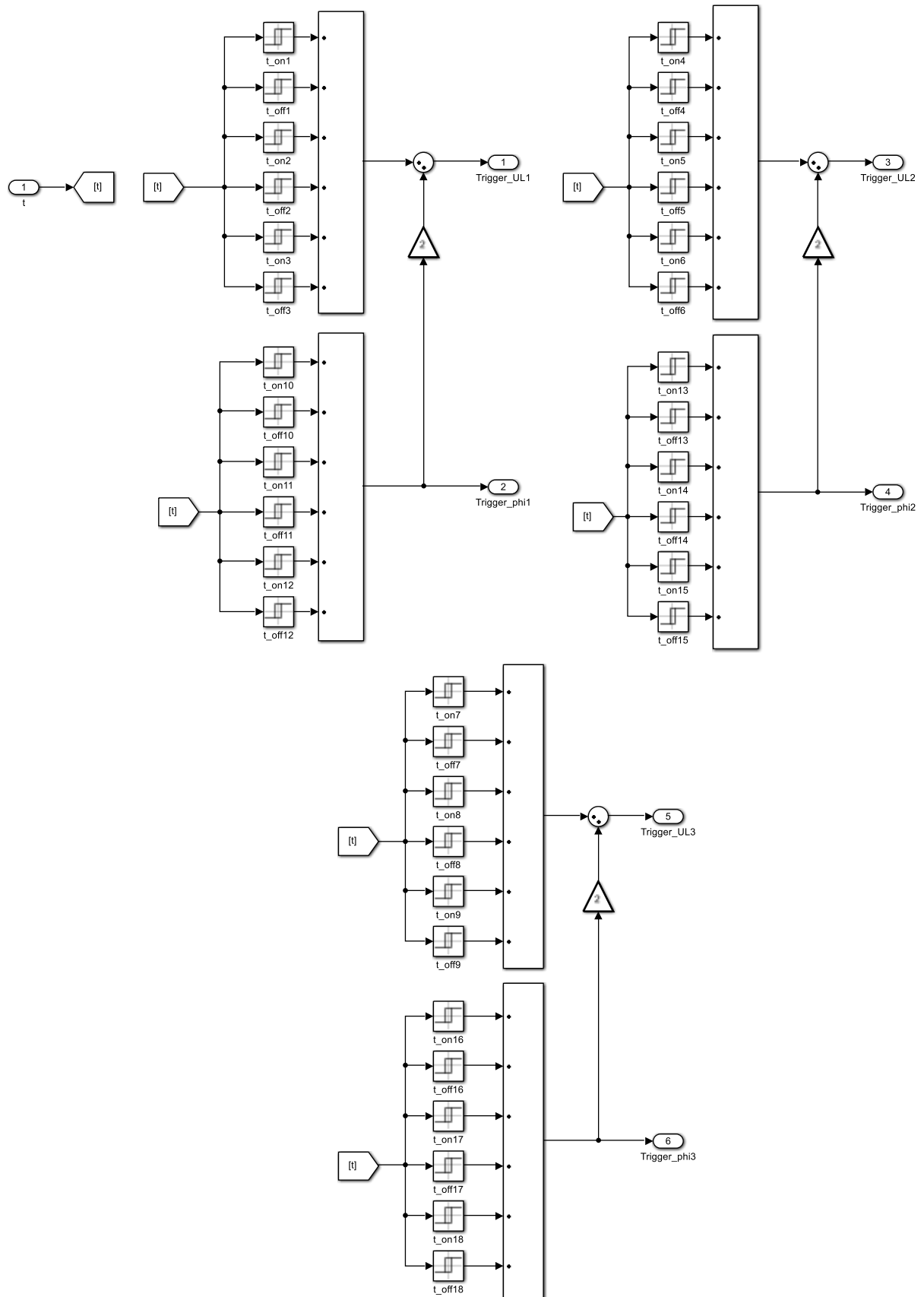


Abbildung 52 Block „Berechnung der Prüfzeitpunkte“ in Abbildung 17, Trigger zur Erkennung der jeweiligen Anfangs- und Endzeitpunkte der Spannungseinbrüche

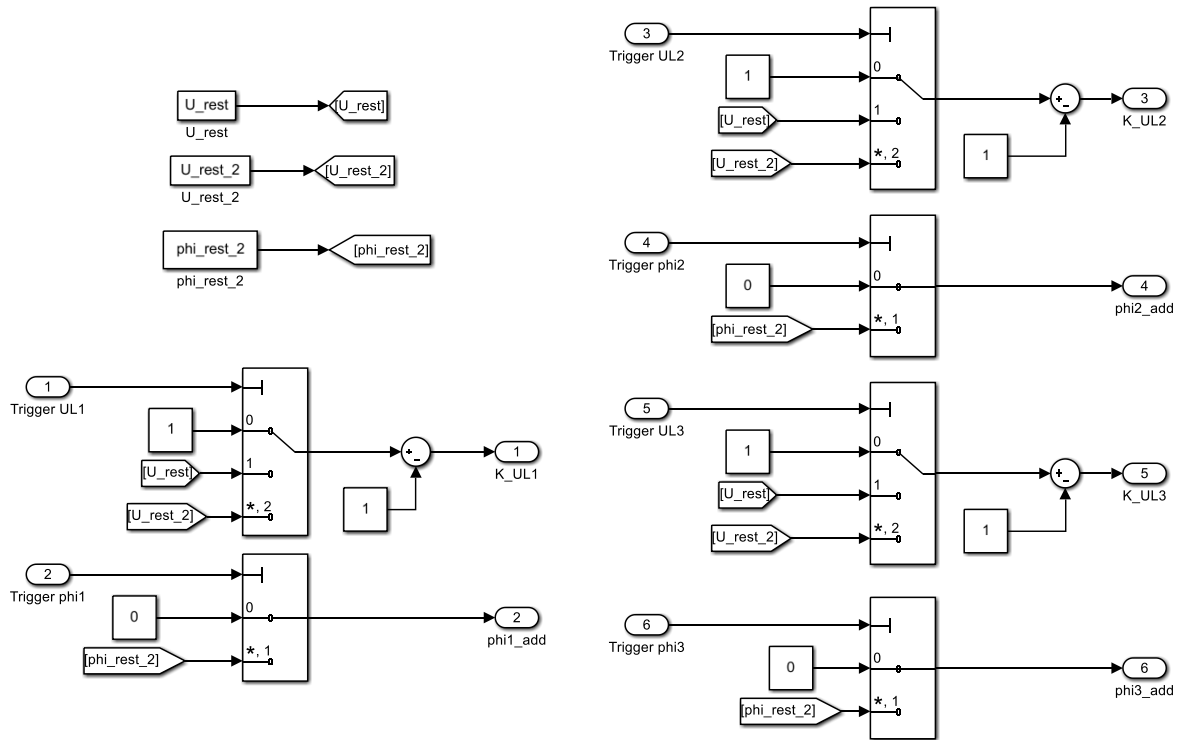


Abbildung 53 Block "Anwendung der Prüfpegel" in Abbildung 17, gibt bei entsprechendem Eingangssignal die zugehörigen Prüfpegel eines Spannungseinbruchs aus

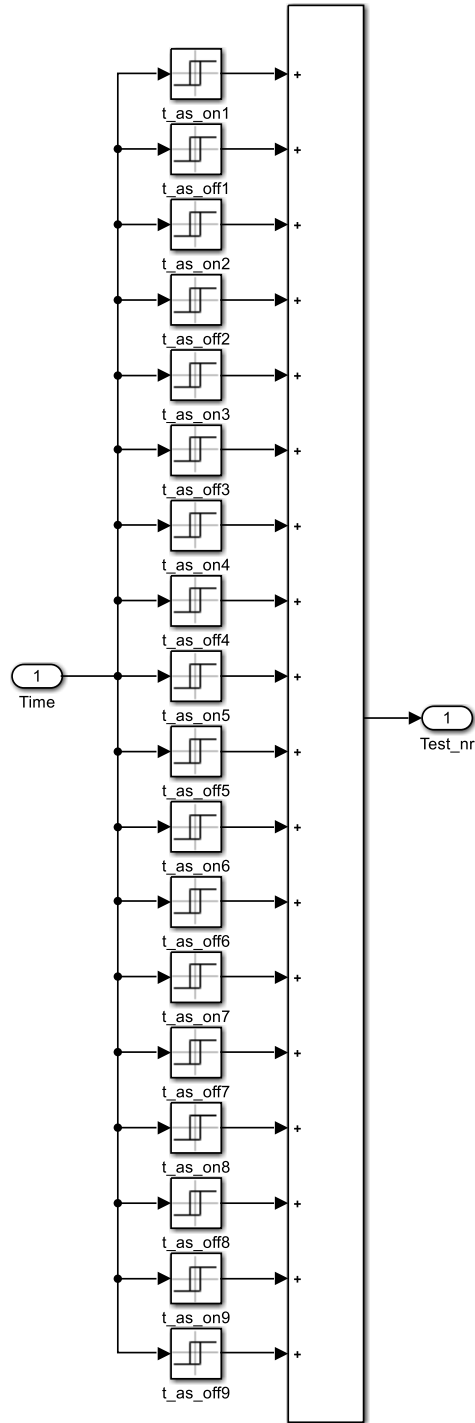


Abbildung 54 Block "Prüfzeitpunkte" in Abbildung 22, Trigger zur Erkennung der jeweiligen Anfangs- und Endzeitpunkte der Prüfungen

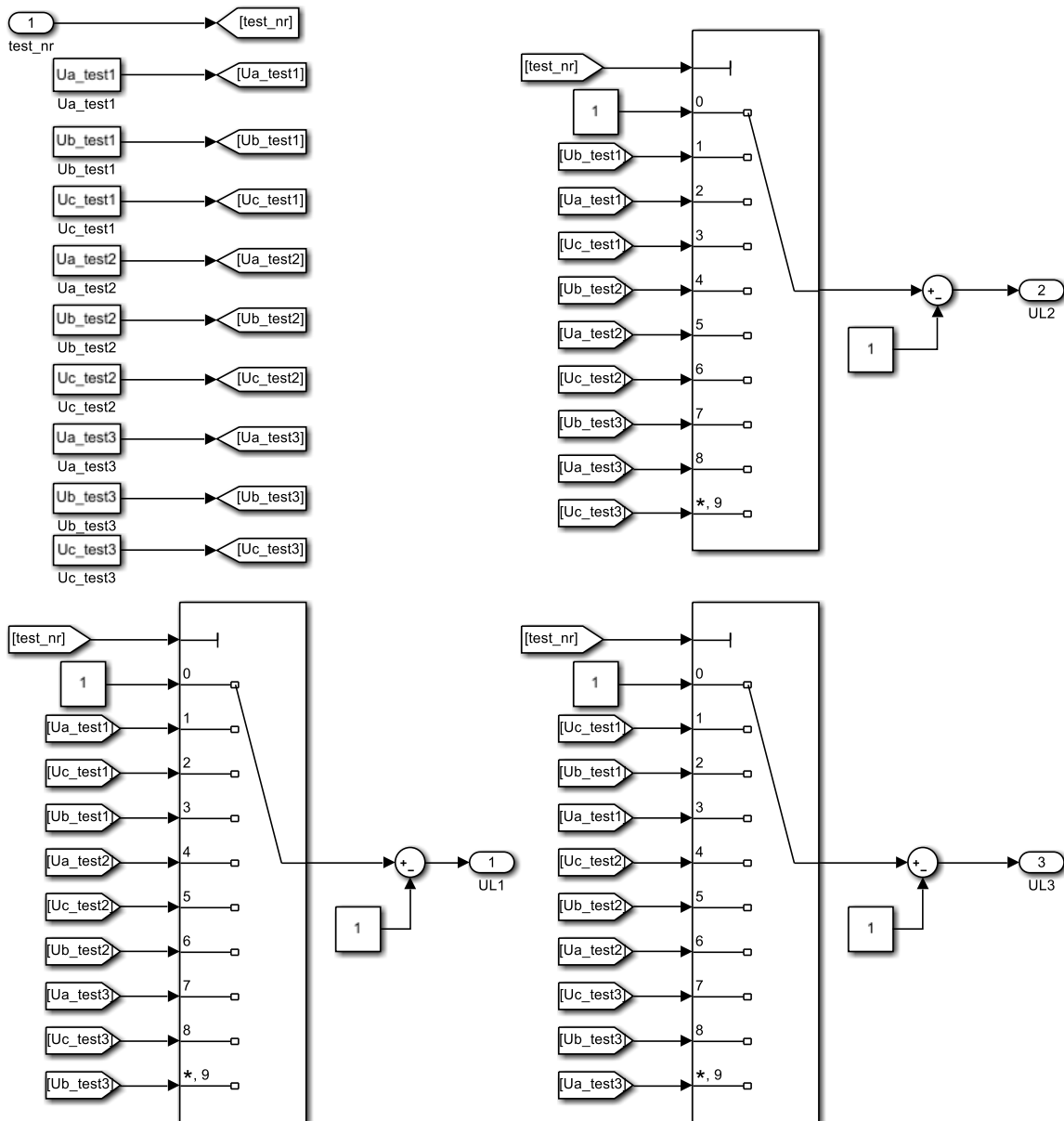


Abbildung 55 Block "Prüfpegel Amplituden" in Abbildung 22, gibt bei entsprechendem Eingangssignal die zugehörigen Prüfpegel für die unsymmetrischen Spannungsamplituden aus

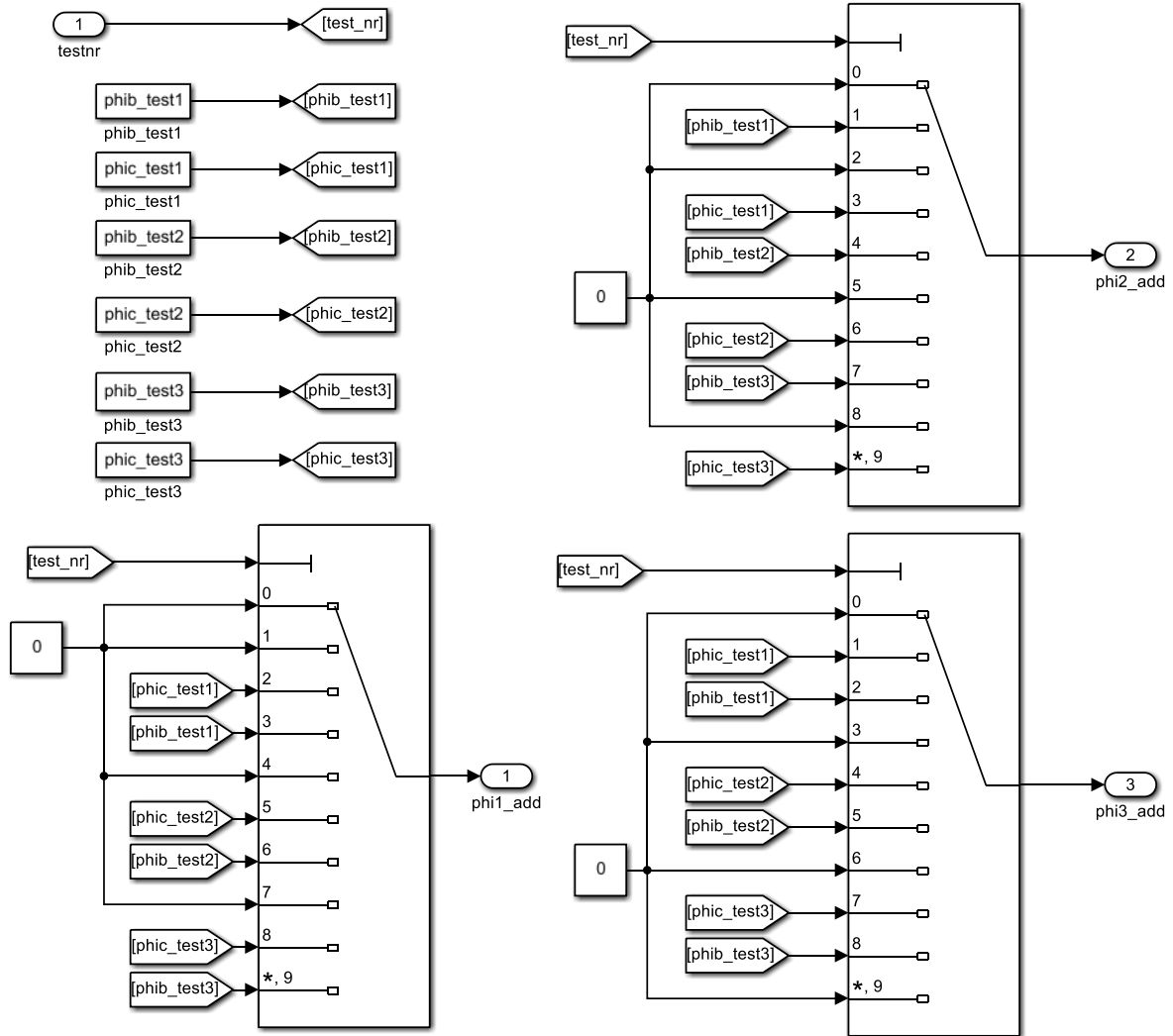


Abbildung 56 Block "Prüfpegel Phasenwinkel", gibt bei entsprechendem Eingangssignal die zugehörigen Prüfpegel für die unsymmetrischen Phasenwinkel der Spannungen aus

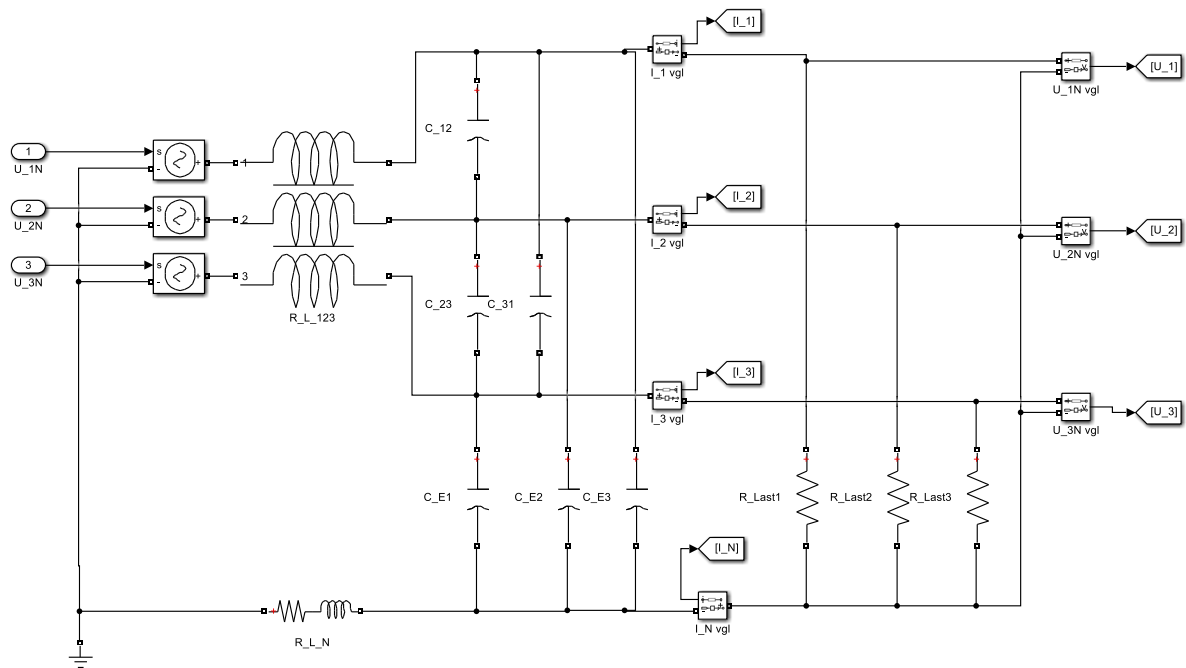


Abbildung 57 Aufbau des Modells der Netzimpedanz aus Simscape Elementen zum Vergleich mit dem Modell bestehend aus einfachen zeitdiskreten Elementen