

DIPLOMARBEIT

Simulationssystem zur Untersuchung elektrischer Netze von kleinen Siedlungen

ausgeführt zum Zwecke der Erhaltung
Des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Brauner
E373 ó Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

betreut von

Dipl. Ing. Alfred Einfalt
E373 ó Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

eingereicht an der

Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Bakk. Tech. Barvir Sanosian
Matrikel-Nr. 0227118
Laxenburger Straße 90B/11/11, 1100 Wien

Wien, im Oktober 2009

Danksagung

Bei Herrn o.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Brauner bedanke ich mich für die Übernahme der Betreuung und für die fachliche Unterstützung. Den Herrn Dipl.-Ing. Alfred Einfalt gilt mein Dank für seine Anregungen und fruchtbare Diskussionen, die damit wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein persönlicher Dank gehört meiner Familie, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Kurzfassung

Eine der wichtigsten Themenbereiche, mit denen sich die Energietechnik aktuell beschäftigt, ist die Nachhaltigkeit der elektrischen Energieversorgung. Mit der Weiterentwicklung der Technologien im Gebiet der kleinen dezentralen Erzeugungsanlagen, werden diese Anlagen vermehrt im Niederspannungsnetz eingesetzt und damit ändern sich die elektrischen Verhältnisse in dieser Spannungsebene. Viele Forschungsinstitute richten ihre Aufmerksamkeit auf die Auswirkungen der neuen Entwicklungen und auf andere verbraucherseitige Aspekte, wie das Demand Side Management, elektrische Fahrzeuge oder dezentrale Erzeugungsanlagen.

Zur Untersuchung der elektrische Netze wird normalerweise Standard-Lastflußberechnungssoftware herangezogen, bei welcher meistens die Verbraucher grob modelliert werden. Um kleine Siedlungen genauer zu untersuchen, bietet die relativ neue Toolbox von MATLAB/Simulink (SimPowerSystems) die Möglichkeit, mit Hilfe elektrischer Elemente, wie Widerstand, Stromquelle usw., die Last beliebig genau nachzubilden. Das erste Ziel dieser Diplomarbeit ist es, mit Möglichkeiten, die SimPowerSystems anbietet, ein möglichst gutes Modell für eine Wohneinheit mit installierter DEA zusammensetzen. Ein System zu Entwerfen, das die Daten, wie Last- und Erzeugungsganglinien, mit dem Modell verbindet und den Simulationsaufwand verringert, ist das zweite Ziel.

Abstract

One of the main issues, which currently electrical power system deals with it, is the Sustainability of the electrical energy supply. With the development of technology in Field of small, distributed generation facilities, deployment of these facilities will be increased in the Low voltage grid and thus the electrical characteristic will be changed in this Voltage level. Many research institutes focus their attention on the impact of new developments and other consumer-issues, such as Demand Side Management, electric vehicles and distributed generation.

To analyze the electrical grid, normally standard load flow calculation software is employed, in which consumers are roughly modeled. For analyzing the small settlements, the relatively new toolbox of MATLAB / Simulink (SimPowerSystems) offers the possibility of using electric elements, such as resistance, current source, etc., to build a model of the consumer as accurate as possible. The first objective of this thesis is to use opportunities that SimPowerSystems offers and build a possible model for a building with installed distributed generation facilities. The second aim of the project is to design a system which combines model with the data such as load profile and generation load curve and reduces the effort of system analyzer.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
1.1.	Dezentrale Energieerzeugung	6
1.2.	Niederspannungsnetz	7
1.3.	Dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA)	10
1.4.	Netzurückwirkungen von DEA	12
1.5.	Verbrauch im Niederspannungsnetz	17
1.6.	Einspeiseprofil der DEA	18
1.7.	SimPowerSystems	20
2.	Modellierung	21
2.1.	Netzstruktur	21
2.2.	Netzeinspeisung	23
2.3.	Messstellen	25
2.4.	Lastmodellierung mit der Stromquelle	31
2.5.	Wohneinheiten	35
2.6.	Andere Komponenten	40
3.	Das System	43
3.1.	Systemaufbau	43
3.2.	Modellbildung	45
3.3.	Modellparameter	46

3.4.	Vorbereitung der Ganglinien	50
3.5.	Simulation	52
3.6.	Berechnung der Kenngrößen	55
4.	Simulationen	64
5.	Zusammenfassung und Ausblick	66
	Verwendete Formelzeichen	67
	Abkürzungsverzeichnis	69
	Abbildungsverzeichnis	70
	Tabellenverzeichnis	73
	Literaturverzeichnis	74

1. Einleitung

1.1. Dezentrale Energieversorgung

Ein nachhaltiges Energiesystem für die Zukunft soll umweltfreundlich und primärenergie-schonend sein. Das heißt, die CO₂ Emissionen und der Einsatz von fossilen Energieträgern sollen reduziert werden. Da der Energiebedarf ständig steigt, sind diese Ziele für die EU sehr wichtige Herausforderungen.

Die Weiterentwicklung von Energieerzeugungstechnologien hat neue effiziente Lösungen in kleineren Leistungsbereichen ermöglicht. Ein möglicher Weg den Primärenergieeinsatz zu reduzieren, ist die Steigerung der Effizienz, sowohl in der Energieerzeugung, als auch in der Endanwendung. Die dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) werden möglichst nahe bei Verbrauchern installiert und dadurch bei minimalen Investitionskosten beeindruckende Wirkungsgrade von 80 bis 90 % erzielt.

Windkraftanlagen, Kleinwasserkraftwerke und Blockheizkraftwerke werden aufgrund ihrer hohen Leistungen an Mittelspannungsnetze angebunden. Kleinstanlagen mit Kraftwärmekoppelung (KWK) in kW-Bereich, wie Brennstoffzellen, Mikro-Gasturbinen, aber auch Photovolta-Anlagen auf Dächern und Biomasse-Heizanlagen mit Stromerzeugung aus Stirlingmotoren werden bei Endverbrauchern oder kleinen Gemeinden installiert und deshalb normalerweise an Niederspannungsnetze gebunden.

Es wird für die Zukunft erwartet, dass durch den Anstieg der Energiepreise und durch die Massenproduktion von Erzeugungsanlagen der Einsatz von DEA zur Hausenergieversorgung zunimmt. Prinzipiell sind diese Anlagen für den Betrieb im Niederspannungsnetz geeignet. Jedoch treten durch die Steigerung der installierten Leistung erhebliche technische Auswirkungen auf die Niederspannungsebene auf.

Durch die Liberalisierung von Energiemärkten sind die Bereiche Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Energiehandel voneinander getrennt worden. Durch die Erschaffung von freiem Wettbewerb in den Bereichen Erzeugung und Handel sollen die Leistungen optimiert

werden. Da der Netzbetreiber immer noch ein Monopol darstellt, werden die Netztarife durch eine behördliche Organisation reguliert. Dadurch hat sich der Kostendruck auf den Verteilnetzbetreiber erhöht und die wirtschaftliche Planung und Betriebsführung von Niederspannungsnetzen hat an Bedeutung gewonnen.

1.2. Niederspannungsnetz

Angefangen mit Kraftwerken bilden die Niederspannungsnetze die letzte Ebene der öffentlichen Verteilungsnetze und versorgen die Kunden in Haushalten, Gewerbe und Landwirtschaft. Generell wünschen sich die Kunden ausreichende Wirk- und Blindleistung, Spannungshaltung, Kurzschlussleistung und Versorgungszuverlässigkeit. Andererseits sind eine prognostizierbare Leistungsaufnahme, Toleranz gegenüber dem Spannungspegel und niedrige Investitionskosten für den Ausbau und Betrieb des Netzes aus Sicht des Netzbetreibers vorteilhaft. Durch die Vorgabe von Mindeststandards für die Spannungsqualität und durch Richtlinien für die Versorgungszuverlässigkeit wird eine definierte Versorgungsqualität sichergestellt.

Die Grenzwerte, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eingehalten werden sollen, sind in der Europeanorm EN 50160 beschrieben. Die Standards beinhalten Grenzen für die Oberschwingungen, den Flicker, die Netzfrequenz und die Spannungshalten (Konstanz des Spannungseffektivwertes). Damit wird sichergestellt, dass im Gewerbe erhältliche elektrische Geräte auch einwandfrei funktionieren.

Zuverlässigkeit

Um die Zuverlässigkeit der Versorgung zu beurteilen, werden folgende Größen verwendet:

Unterbrechungshäufigkeit

Unterbrechungsdauer

Betroffene Kunden (bzw. die nicht gelieferte Energie)

In diesem Zusammenhang unterscheidet man auch zwischen Spannungseinbruch, sog. Voltage Dips (wird als sehr kurzes 10ms bis 1s Fehlen der Spannung bezeichnet), und

Spannungsunterbrechung (kurze Unterbrechung (kleiner als 3 min) und lange Unterbrechung (größer als 3 min). Nach statistische Messungen und Erfahrungswerte werden für obengenannte Kenngrößen Grenzwerte festgelegt.

Belastbarkeit von Betriebsmitteln

Die Betriebsmittel müssen die Dauerbelastung aushalten, ohne davon beschädigt zu werden. Außerdem müssen eventuelle Ströme im Kurzschlussfall auch in Betracht gezogen werden. Die dauer von Kurzschlussströmen innerhalb eines Netzes hängt vom eingesetzten Schutz ab. Für die Anlagenteile ist der Stoßkurzschlussstrom für die mechanische Beanspruchung maßgebend, die aus dem dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstrom berechnet wird. Für die Leistungsschalter verwendet man den Ausschaltwechselstrom, da erst beim Trennen von Strom muss der Schalter die größte Belastung aushalten muss.

Spannungshaltung

Durch Verbrauch von elektrischer Leistung durch Kunden (z.B. Einschalten von Haushaltsgeräten) fließt Strom durch Zuleitungskabel (im Niederspannungsnetz von der Netzstation bis zum Hausanschluss). Wegen dem Spannungsabfall im Kabel steht eine niedrigere Spannung am Kabelende zur Verfügung (siehe Abb. 1.2.-1). Je mehr Leistungsverbraucher an das Kabel angeschlossen werden, desto mehr Laststrom fließt durch und damit sinkt der Spannungseffektivwert. Bei der Planung von Verteilnetzen wird in Vorhinein die Höchstlast abgeschätzt und die Kabel werden dementsprechend dimensioniert.

Man soll darauf achten, dass bei dreiphasiger Versorgung der Strom im Nullleiter vom Transformator wegen unsymmetrischer Belastung nicht unbedingt gleich Null ist. Die Kapazitäten von relativ kurzen Niederspannungskabeln sind vernachlässigbar [4].

Die Netzspannung beträgt 380/220 V, wobei diese auch gewisse Schwankungen aufweisen darf. Die Abweichung des Spannungseffektivwertes darf bei Anschlusspunkt bei Kunden nach EN 50160 nicht mehr als $\pm 10\%$ der Nennspannung betragen ([12] aus Literatur von [4]). Der Spannungsabfall in der Zuleitung ist auf 6% begrenzt.

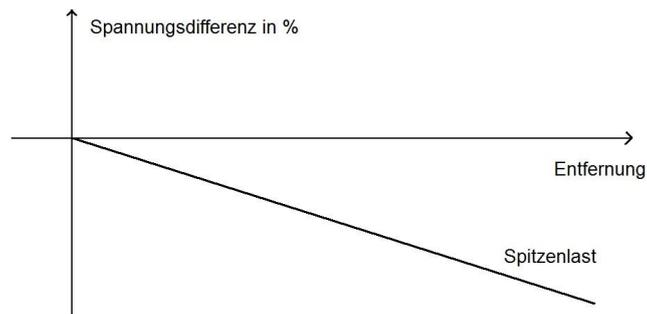


Abb. 1.2.-1: Spannungsabfall entlang des Kabels

Um die Spannung beim Kunden in zulässigen Grenzen zu halten, kann man auch die Spannung in der Netzstation erhöhen. Man soll ebenso berücksichtigen, dass sich bei Schwachlast der Spannungsabfall reduziert und damit beim Verbraucher die Spannung steigt (Abb. 1.2.-2).

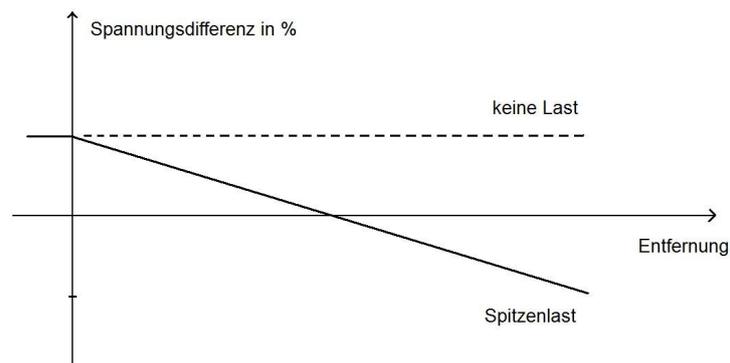


Abb. 1.2.-2: Schematische Darstellung Anschlussspannung bei Schwach- und Höchstlast, mit Optimierung der Nutzung des Spannungsbandes

Der Transformator zwischen Hoch- und Mittelspannung regelt mittels Stufen die Spannung an der MS-Sammelschiene. Da der NS-Trafo nicht automatisch geregelt werden kann, sind bei Spannungsschwankungen die Spannungsabfälle durch Laststrom der Zuleitungen vom MS-Netz auch zu betrachten. In der Abb. 1.2.-3 ist die Aufteilung des zulässigen Spannungsbandes dargestellt.

Der Netzstationstransformator wird aus einer Mittelspannungsleitung eingespeist, die überspannungsseitig Anzapfungen ($\pm 2,5\%$) hat. Um die Einstellung zu ändern, was im

Allgemein manuell gemacht wird, soll der Transformator sich im spannungslosen Zustand befinden. Damit kann man bei langen Zuleitungen den Spannungsabfall kompensieren. In städtischen Netzen wird meistens darauf verzichtet, außer wenn dort das Spannungsband die zulässigen Grenzen überschreitet.

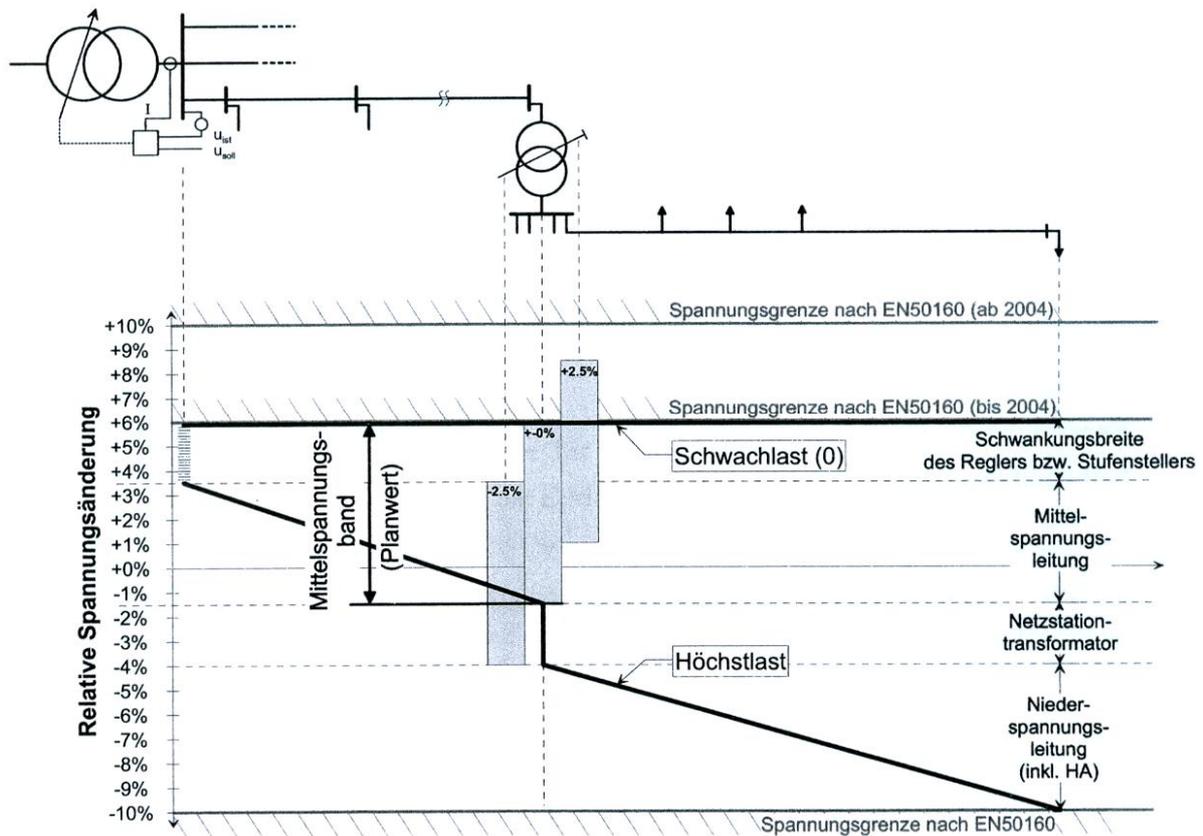


Abb. 1.2.-3 : Zulässiger Bereich der Versorgungsspannung ohne dezentrale Einspeisung [4]

1.3. Dezentrale Energieversorgungsanlagen (DEA)

Durch Förderungen aus EU-Richtlinien für Erzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energiequellen und Kraft-Wärme-Koppelungsanlagen (KWK-Anlagen) sind dezentrale Stromerzeugungsanlagen wirtschaftlich geworden. Es sind verschiedene Technologien im Einsatz, die je nach ihren erzeugten Leistungsmengen ans Mittelspannungsnetz bzw. ans Niederspannungsnetz angeschlossen werden.

Mittelgroße Anlagen, wie Kleinwasserkraftwerke, Windkraftwerke und Biomasseanlagen, speisen direkt ins Mittelspannungsnetz. Da die Betriebsweise von MS-Netzen schon geregelt ist, bereiten diese Anlagen weniger Probleme aus Sicht des Netzbetreibers. Die erzeugte Energiemenge ist schwer prognostizierbar, weil bei regenerativen Energiequellen, wie Wind und Sonnenstrahlung, die Erzeugung stark vom Dargebot abhängig ist. Außerdem treten Schwankungen großflächig und fast gleichzeitig auf. Aus diesem Grund brauchen die Netzbetreiber mit hohem Anteil an regenerativen Erzeugungsanlagen auch die Möglichkeit zum Ausgleich von Überschuss bzw. Mangel der Leistung. Dafür sind Speicherkraftwerke im Einsatz. Zukünftig werden Elektroautos auch eine große Rolle beim Leistungsausgleich spielen. Eine andere Lösung ist das Demand Side-Management, in dem die Verbraucher versuchen, ihr Verbrauchsverhalten an das Dargebot anzupassen, indem die Geräte bei Erzeugungsmangel ihren Verbrauch an elektrischer Energie reduzieren.

Wegen lokalem Verbrauch des Großteils der erzeugten Energie werden die Netze entlastet und bei steigendem Energieverbrauch kann einiges an Investitionen für den Ausbau der Netze eingespart werden. Außerdem sinkt auch der Verlust aus Grund der weiten Übertragung von Energie.

Da die regenerativen Energiequellen nicht gleichmäßig auf alle Regionen aufgeteilt sind, kann es vorkommen, dass eine Region, die einen Energieüberschuss produziert, ihre erzeugte Leistung an Regionen mit Energiebedarf abgibt. Allerdings sind Netzbetriebsmittel, wie Kabel, Transformatoren und Schutzeinrichtungen auf neue Betriebsarten anzupassen.

Die KWK-Anlagen zeichnen sich durch ihren hohen Wirkungsgrad an eingesetzter Primärenergie aus. Bei diesen Anlagen wird versucht sowohl Elektrizität zu erzeugen, als auch thermische Energie zu nutzen. Der Wirkungsgrad elektrischer Energieerzeugung ist äußerst klein, sodass er alleine nicht wirtschaftlich wäre. Erst durch die Benützung von Restwärme für Wärmeverbrauchszwecke im Haushalt wird die Kombination eine sehr interessante Lösung zur Dezentralisierung von Energieerzeugung. Nachteilig sind die Abgase, die meist nicht so gut wie in Großkraftwerke gefiltert werden können und damit die Umwelt belasten.

Vergleich der KWK-Kleinanlagen

KWK-Anlagen werden entweder durch Angabe ihrer elektrischen und thermischen Leistung, oder durch ihre Stromkennzahl und Gesamtleistung gekennzeichnet. Die Stromkennzahl ist das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung.

$$k = \frac{P_{elek}}{P_{thrm}}$$

Zum Beispiel der Brennstoffzellentyp PFMFC von Vaillant hat folgende Kennzahlen:

4,6 kW (elektrisch) und 7 kW (thermisch).

Damit erzeugt die Brennstoffzelle 11,6kW Gesamtleistung mit einer Stromkennzahl von 0,66.

In Tabelle 1.3.-1 werden die Wirkungsgrade verschiedener Technologien bei KWK-Kleinanlagen miteinander verglichen.

Anlage	Elektrischer Wirkungsgrad	Energetischer Wirkungsgrad	Auskoppeltemperatur	Strom-Kennzahl
Mikrogasturbinen	26 %	85 %	70 ó 85°C	0,5
PFMFC	35 ó 50 %	80 %	70°C	0,6 ó 1
SOFC	45 ó 60 %	90 %	300 ó 600°C	0,4 ó 1,25

Tabelle 1.3.-1: Kennwerte von KWK-Kleinanlagen zur Hausenergieversorgung (Herstellerangaben bzw. voraussichtliche Kennwerte bis 2005 ([38-54] aus Literatur von [4]) (PFMFC steht für Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell ó Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle. SOFC steht für Solid Oxide Fuel Cell ó Festoxid (oxidkeramische) Brennstoffzelle) [4]

1.4. Netzurückwirkungen von DEA

Dezentrale Erzeugungsanlagen speisen elektrische Leistung meistens über einen Umrichter einphasig ins Niederspannungsnetz ein. Nichtlineare Verbraucher bzw. Erzeuger, die ans öffentliche Verteilnetz angeschlossen werden, verursachen Netzurückwirkungen, die auf weitere Anlagen anderer Kunden unerwünschte Auswirkungen haben können. Die Halbleiter gesteuerten Geräte haben einen nicht sinusförmigen Stromverlauf, dessen

Stromüberschwingungen Spannungsüberschwingungen erzeugen. Die Höhe der Emissionen ist von der Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt abhängig.

Maximal zulässige Nennscheinleistung für die Erzeugungsanlagen ist bei einphasigem Anschluss 4,6 kVA. Die Gesamtleistung an einem Netzanschlusspunkt darf 30 kVA nicht überschreiten und es muss dafür gesorgt werden, dass die Anlagen gleichmäßig auf alle drei Phasen verteilt werden, damit Netztransformatoren möglichst symmetrisch belastet werden.

Andererseits verändern DEA die Lastflüsse im Niederspannungsnetz durch Einspeisung der Wirkleistung, damit ändern sich die Belastungen der Betriebsmittel. Für leistungselektrische Teile sind der Spannungspegel und die Frequenz sehr tolerable. Die selbstgeführten Wechselrichter können mit viel niedrigeren Spannungen als der Netzennspannung immer noch die volle Leistung ins Netz speisen. Außerdem verfügen DEA über keine Schwungmasse, deshalb verhalten DEA sich anders als klassische Erzeugungsanlagen (wie Generatoren in Kraftwerken). Das Vorhandensein eines überlagerten Netzes mit ausreichend hoher Kurzschlussleistung hat den Vorteil, dass im Verteilnetz keine Investitionen für Energiespeicherung oder Netzregelung notwendig sind. Zur Überwachung von Lastflüssen und der Belastung der Betriebsmittel soll ein notwendiger Netzausbau rechtzeitig geplant werden.

Die Netzimpedanz ist die geometrische Summe aus Impedanz des Mittelspannungsnetzes, sowie der Impedanz des Transformators und der Leitungen (die Kapazitäten der Leitungen sind vernachlässigbar).

$$|\underline{Z}_{VP}| \approx |\underline{Z}_{MS} + \underline{Z}_{Trafo} + \underline{Z}_{Leitung}|$$

Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

$$S''_{K,VP} = \frac{U_{VP}^2}{|\underline{Z}_{VP}|}$$

ist die Beurteilungsgrundlage für die Grenzwerte der Norm EN 61000, die durch Netzbetreiber eingehalten werden sollen. Die Netzbetreiber können indirekt durch ausreichend hohe Kurzschlussleistung die Netzurückwirkungen klein halten.

Da der aus der Norm entnommene Wert für die Ersatzimpedanz des Niederspannungsnetzes (bei dreiphasigem Anschluss von Geräten bis 16 A) maximal $0,28\ \Omega$ ist, soll die Kurzschlussleistung im Niederspannungsnetz mindestens 570 kVA betragen. Es ist zu beachten, dass die Einhaltung der Mindestkurzschlussleistung die mögliche Kabellänge im Niederspannungsverteilnetz begrenzt.

Abb. 1.4.-1 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Netzurückwirkungen, Kurzschlussleistung und eingespeister Leistung. Man sieht, dass bei steigender Einspeiseleistung (bei gleicher Kabellänge) sich die minimale Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt erhöht, damit die Grenzwerte für Netzurückwirkungen nicht verletzt werden.

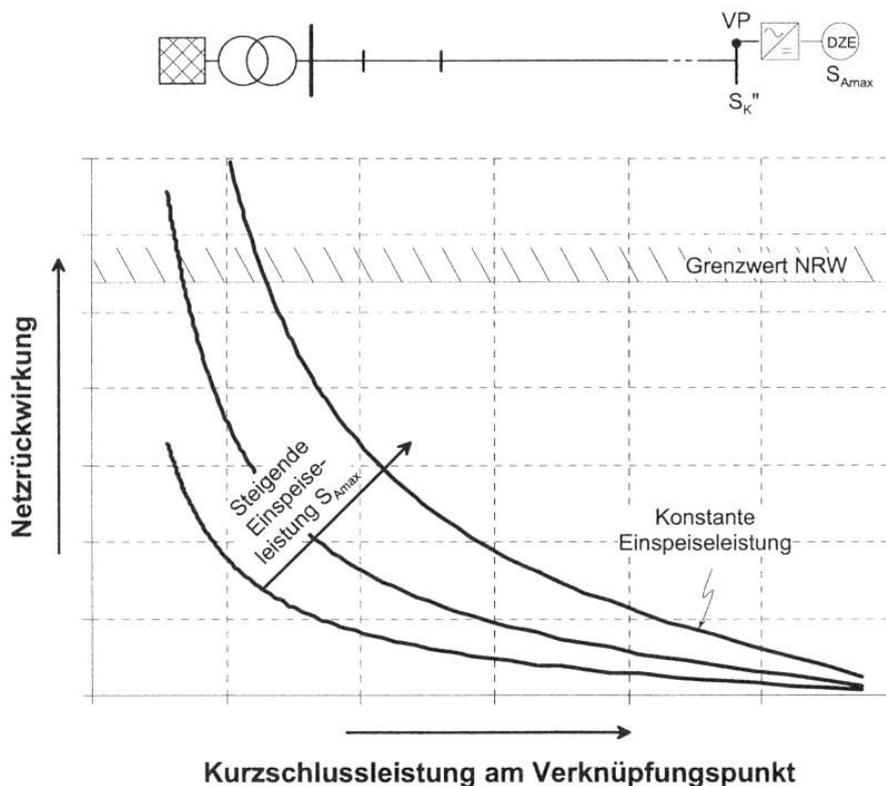


Abb. 1.4.-1: Prinzipielle Abhängigkeit der Netzurückwirkungen von dezentralen Erzeugungsanlagen von der Kurzschlussleistung und der Anlagenleistung [4]

Spannungsanhebung

Um ins Netz Leistung zu speisen, müssen die Anlagen höhere Spannungen erzeugen, als die Anschlussspannung, sodass Strom von der Anlage ins Netz fließt. Solange die erzeugte

Leistung den Verbrauch nicht überstiegen hat, gibt es im Wesentlichen keine Probleme im Netz. In diesem Fall wird eigentlich die bezogene Leistung aus dem MS-Netz verringert.

Im Falle des Leistungsüberschusses fließt Leistung von einem Kunden weg, zuerst einmal zu benachbarten Verbrauchern. Wenn z.B. 10 Verbraucher an einen Netztransformator angeschlossen sind und die Leistungsbilanz stimmt, merkt der Transformator im Wesentlichen keine Veränderung. Die Auswirkungen werden beachtlich, wenn die Kunden ihren Überschuss an erzeugter Leistung ins Netz speisen. Demzufolge kehrt sich die Stromflussrichtung um und der Spannungsabfall am Zuleitungskabel wirkt umgekehrt. Bei genügend großer Kurzschlussleistung des Netzes, bleibt die Netzspannung konstant. Große Kurzschlussleistung ist gleichbedeutend mit kleiner innerer Impedanz des Netzes, und somit ist die Spannungsdifferenz vernachlässigbar klein.

Da die Netzspannung konstant bleibt, hebt sich die Spannung beim Kunden an. Die Leistungselektronik muss dann höhere Spannungen erzeugen, damit der Kunde weiter Leistung ins Netz einspeisen kann und damit die Spannung am Anschlusspunkt steigt. Diese Tatsache ist in der Abb. 1.4.-2 dargestellt.

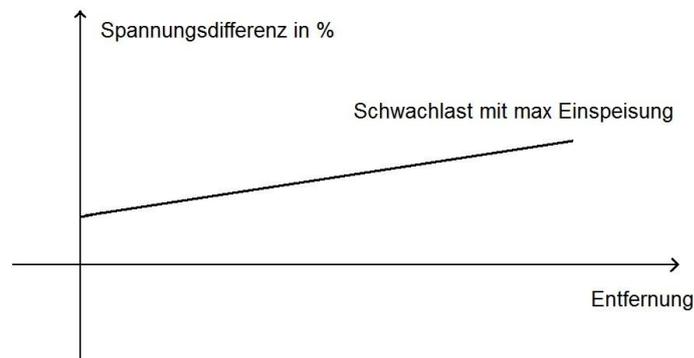


Abb. 1.4.-2: Leistungsumkehr und Spannungsanhebung durch Längstspannungsabfall im Zuleitungskabel

Abb. 1.4.-3 zeigt eine genauere Aufteilung von Spannungsreserven mit Berücksichtigung einer Mittelspannungszuleitung. Die zulässige Anschlussleistung hängt ab von der Reserve zur oberen Spannungsgrenze, die von Kabeltyp und ólänge zwischen Netzstation und Umspannwerk bestimmt wird.

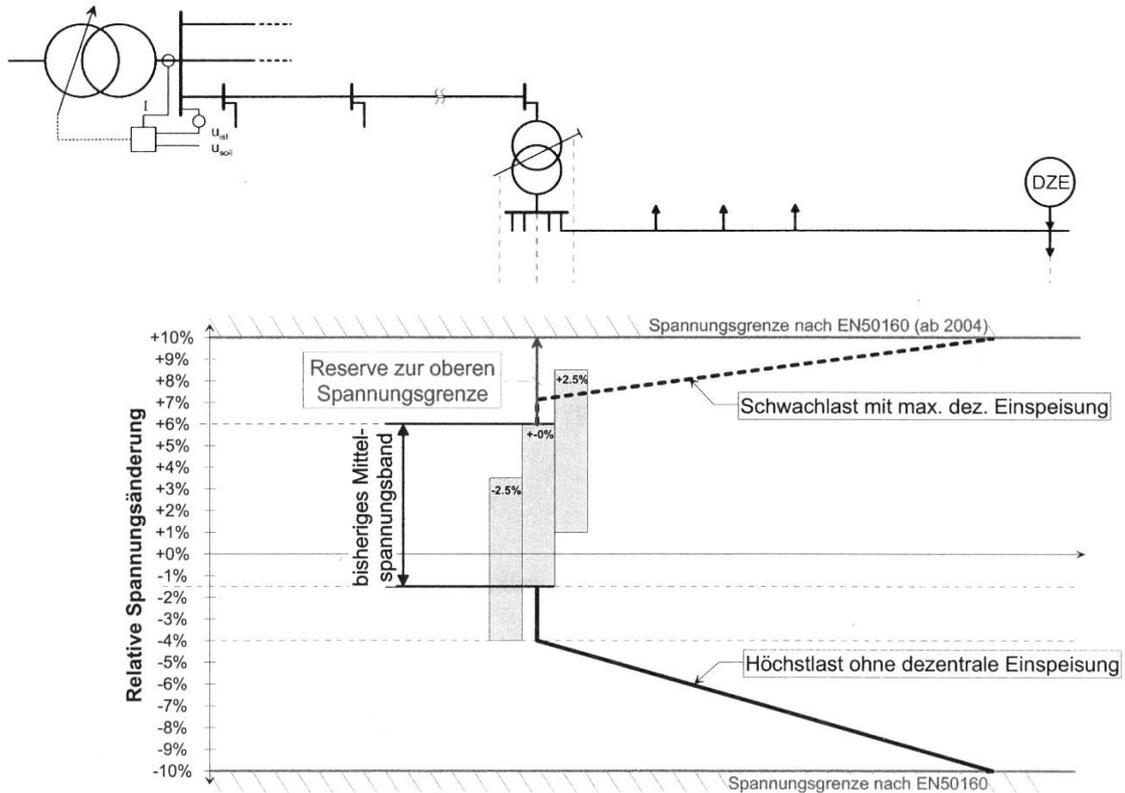


Abb. 1.4.-3: Zulässige Bereiche der Versorgungsspannung mit dezentraler Einspeisung [4]

Oberschwingungen

Um die Kosten gering halten, versuchen die Hersteller den Aufwand an Leistungselektronik so gering wie möglich zu halten. Obwohl die Kenngrößen der Geräte innerhalb von entsprechenden Normen bleiben, steigen durch vermehrten Einsatz von DEA, die Störungspegel im Verteilnetz und damit reduziert sich die Spannungsqualität. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Oberschwingungen nicht behandelt.

Unsymmetrie

Bei Einspeisung kleinerer elektrischer Leistungen sind die Anlagen meistens einphasig mit dem Netz verbunden. Grund dafür sind die Flexibilität der Nutzung von Steckdosen und einfache Installation. Für die Einspeisung werden Photovoltaikanlagen, die mittels Umrichter Wirkleistung einspeisen, oder kompensierte ASM-Generatoren benutzt. Nicht kompensierte ASM-Generatoren brauchen relativ viel Blindleistung, was die Netzbetriebsmittel unnötig belastet. Bei Betrieb mehrerer DEA in einem Niederspannungsabzweig kann es vorkommen, dass im ungünstigen Fall viele Anlagen an die gleiche Phase angeschlossen werden. Bei

ausgeprägten Unsymmetrien müssen administrative Maßnahmen ergriffen werden, um die Gleichverteilung der Anlagen zu gewährleisten. Eine Möglichkeit wäre, dass die Wohnungen auf drei Gruppen aufgeteilt werden und jeder Gruppe eine bestimmte Phase zum Einspeisen vorgegeben wird.

Blindleistung

Die Erzeugungsanlagen sollen einen Leistungsfaktor von nahezu Eins aufweisen, damit die Netzkapazitäten optimal ausgenutzt werden können. Der Blindleistungsverbrauch der Anlagen, wie nicht kompensierte ASM-Generatoren, belasten das Verteilnetz. Eine mögliche Lösung ist, Kompensationsanlagen in Niederspannungsebene zu installieren, die Blindströme aufnehmen können.

1.5. Verbraucher im Niederspannungsnetz

Im Niederspannungsnetz ist die Anzahl der Verbraucher hoch und jeder einzelne von ihnen hat ein stark stochastisches Verbrauchsverhalten. Der Lastbedarf des Kunden ist von Verbrauchergruppen, regionalen Besonderheiten und zyklischen Schwankungen abhängig. Da keine genaue Informationen über Lastgänge wie im Hoch- und Mittelspannungsnetz gesammelt werden, verwendet man manchmal standardisierte Lastgänge zur Modellierung der Verbraucher.

Der Lastgang eines einzigen Verbrauchers kommt durch den zufälligen Gebrauch von Geräten zustande. Der Grundlastanteil, der zum Großteil durch den Stand-by-Betrieb von Haushaltsgeräten verursacht wird, ist dabei niedrig und es gibt hin und wieder hohe Lastspitzen. Im Allgemeinen sind aber mehrere Verbraucher an eine Netzstation angeschlossen. Für die Belastung der Betriebsmittel ist die Überlagerung aller Lastgänge maßgebend. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung des Gleichzeitigkeitsfaktors üblich, der als Verhältnis der maximal auftretenden Leistung zur Summe der Maxima der Einzelverbraucher definiert ist.[1]

Es sind drei große Verbrauchergruppen zu unterscheiden: Haushalte, Gewerbebetriebe und Landwirtschaft. Typische Verbrauchertypen sind Singles, junge Familien, Familien mit

Kindern und Pensionisten. Im Rahmen dieser Arbeit wird beispielhaft nur die symmetrische Last nachgebildet.

Abb. 1.5.-1 zeigt die Lastganglinie von verschiedenen Spannungsebenen. Bei 110 kV, wo der Leistungsbedarf der Industrie einen große Anteil der Gesamtleistung bildet, ist die höchste Last in Zeit zwischen 5:00 und 15:00 zu finden. In der Mittelspannungsebene ist der Lastgang schon stark von Haushaltskunden geprägt und die Höchstlast tritt in den Abendstunden auf (zwischen 17:00 und 22:00 Uhr). Die Lastganglinie eines Vierfamilienhaus ist von vielen Parametern abhängig und kann sich von Verbraucher zu Verbraucher ändern.

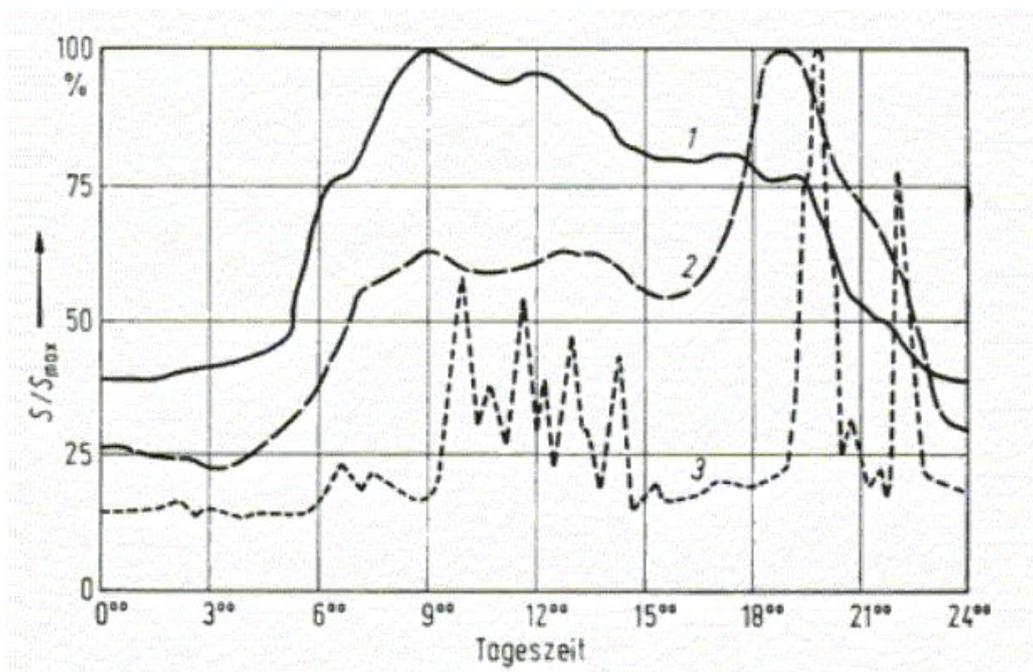


Abb. 1.5.-1: Tageslastganglinien an einem Montag im Winter.[6]

1 110/10-kV-Umspannstation, 60% Sondervertragskunden

2 10/0,4-kV-Netzstation, 10% Gewerbekunden,

3 Vollelektrifiziertes Vierfamilienhaus

1.6. Einspeiseprofil der DEA

Dezentrale Erzeugungsanlagen sind einerseits die KWK-Anlagen, die entsprechend ihrer Betriebsweise Wärme und Strom produzieren, andererseits die Photovoltaik-Anlagen, die nur Strom erzeugen können.

Da in dieser Arbeit die Wohneinheiten vom Typ her unterschiedlich konfigurieren werden, ist das Einspeiseprofil einer installierten Anlage auch an den Verbraucher anzupassen. Eine der Ziele dieses Simulationssystems ist die Untersuchung von Unsymmetrien, deshalb werden die Anlagen auch, wie im Einsatz üblich, einphasig modelliert und je nach Einteilung an eine der Phasen in der Wohnung angeschlossen. Damit kann die erzeugte Energie nur die Last einer Phase abdecken und nicht den ganzen Strombedarf der Wohneinheit und aus diesem Grund fließt die restliche Leistung ins Netz.

KWK-Anlagen arbeiten grundsätzlich entweder in stromgeführter oder in wärmegeführter Betriebsweise. Bei der elektrischen Betriebsweise ist das Ziel, die Abdeckung des elektrischen Bedarfs. Der erzeugte Wärmeüberschuss wird meistens in Form von Warmwasser gespeichert. Bei wärmegeführter Betriebsweise wird versucht, den Wärmebedarf abzudecken. Die produzierte elektrische Leistung kann nur sehr aufwendig gespeichert werden und wird deshalb ins Niederspannungsnetz eingespeist.

Die optimale Dimensionierung der Anlage orientiert sich an deren Wirtschaftlichkeit. Die Nennleistung an die Spitzenlast zu anpassen, ist laut Analysen nicht günstig ([55] aus Literatur von [4]). Das heißt, dass die Nennleistung nicht den kompletten Energiebedarf der Verbraucher decken kann, es müssen durch zusätzliche Heizkessel (bei wärmegeführter Betriebsweise) oder durch Leistungsbezug aus dem Niederspannungsnetz (bei stromgeführter Betriebsweise) die Lastspitzen abgedeckt werden.

Es muss bei wärmegeführten KWK-Anlagen unterschieden werden zwischen Sommer- und Wintertagen, weil während des Sommers zwischen 0:00 und 6:00 Uhr fast kein Wärmebedarf vorhanden ist. Aber im Winter gibt es die Grundlast der Raumheizung.

Bei dargebotsorientierter Betriebsweise wird immer wenn Primärenergie vorhanden ist, elektrische bzw. thermische Leistung erzeugt. Bei Photovoltaikanlagen wird Strom aus Sonnenstrahlung produziert. Die Spitze der Leistungseinspeisung wird meistens mittags auftreten, wo die Haushalte im Allgemeinen weniger Strombedarf haben.

1.7. SimPowerSystems

SimPowerSystems ist eine Toolbox von Simulink, in der die Schaltungen aus Zusammensetzung elektrischer Elemente bzw. Module modelliert werden. Zu den Anwendungsbereichen zählen: Energieübertragung, elektrische Maschinen, Komponenten der Leistungselektronik, elementare Elemente usw. Die Toolbox integriert das System in Simulink, indem sie aus Schaltungen eine Reihe von Differenzialgleichungen erzeugt.

Die Komponenten sind aus der Bibliothek powerlib zu nehmen und die Anschlüsse sind wie Signalpfade zusammenzuschalten. Diese Bibliothek ist direkt aus MATLAB aufrufbar. Abb. 1.7.-1 zeigt eine Ansicht den Komponentengruppen.

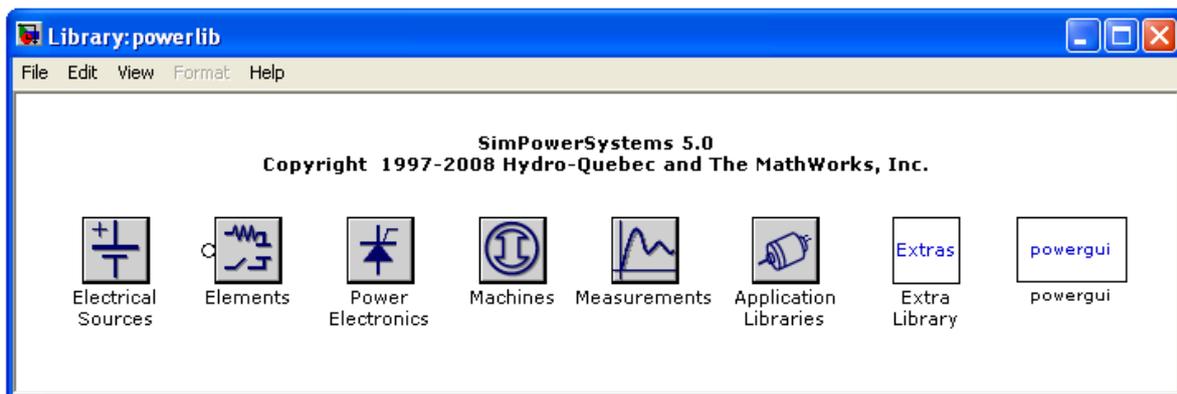


Abb. 1.7.-1: Die Bibliothek für die Komponenten des SimPowerSystems

Es gibt drei Arten, das System zu simulieren: kontinuierlich, zeitdiskret und Phasor. Bei kontinuierlicher Art werden die Simulationszeitschritte je nach Dynamik des Systems gewählt. Das hat den Nachteil, dass bei großen zeitlichen Änderungen viel zu kurze Zeitschritte angewendet werden, und der Simulationszeitaufwand steigt. Um stationäre Netzzustände zu untersuchen, wurde in dieser Diplomarbeit die zeitdiskrete Simulationsart ausgewählt. Da die Änderungen in den Lastgängen im Bereich von Sekunden bis zu 15 Minuten liegen, ist es notwendig, den Netzzustand nur einige Perioden lang zu simulieren.

2. Modellierung

2.1. Netzstruktur

Die Grundformen der Topologie und Betriebsweise von Niederspannungsnetzen sind ([13] aus Literatur von [4]) :

- mehrstrangig gespeiste Maschennetze,
- einstrangig gespeiste Maschennetze,
- stationsweise gespeiste Netze.

Mehrstrangig gespeiste Maschennetze sind durch mehrere Zuleitungen mit dem Mittelspannungsnetz verbunden. Bei Ausfall einer Netzstation werden die Kunden durch einen anderen Strang, der auch aus dem gleichen Umspannwerk kommt, versorgt und damit steigt die Versorgungszuverlässigkeit. Bei einstrangig gespeisten Maschennetzen erfolgt die Versorgung nur durch eine Zuleitung aus dem Mittelspannungsnetz, aber die Struktur des Verteilnetzes ist die gleiche. Die hohen Kurzschlussströme können problematisch sein und deshalb müssen besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden. Bei stationsweise gespeisten Netzen, die auch vermascht oder strahlenförmig sein können, ist die Betriebsführung übersichtlicher und die Kurzschlussströme sind vom überlagerten Netz und Transformator abhängig und deshalb unabhängig von der Lastdichte.

Im Niederspannungsverteilstromnetz ist die Anzahl der Verbraucher hoch, und die Struktur des Netzes ist vom Straßenbau abhängig. In Stadtteilen, in denen die Lastdichte hoch ist, wird meist die vermaschte Topologie angewendet, um die höhere Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Das hat den Vorteil, dass bei Störungen die Kunden schnell wieder versorgt werden können. In dünn besiedelten Regionen und am Stadtrand wird das Netz aus Wirtschaftlichkeitsgründen strahlenförmig aufgebaut (siehe Abb. 2.1.-1). Die Struktur dieser Gebiete zeichnet sich durch lange Leitungen und weniger Netzstationen aus. Obwohl das Netz übersichtlicher betrieben werden kann, sind Wartezeiten bei Störungen wesentlich länger.

Normalerweise wird bei der Modellierung des Niederspannungsnetzes auf die Nachbildung einzelner Haushalte verzichtet, weil der Verbrauch durch den Kunden mit einer großen Unsicherheit verbunden ist. Und auch die Vielzahl der Knoten macht die Simulation

aufwändig, stattdessen werden konzentrierte Lasten mit symmetrischer Belastung ausgewählt. In dieser Diplomarbeit werden aber zur Untersuchung der Auswirkungen von Unsymmetrien auf Netzbetriebsmittel die Haushalte als unsymmetrische Last nachgebildet und mit entsprechenden Lastganglinien gesteuert.

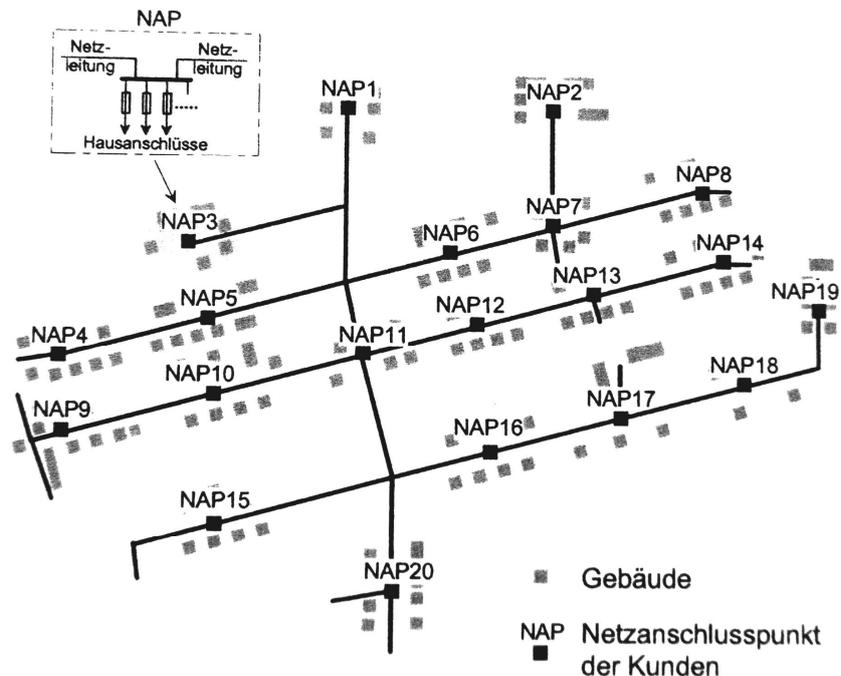


Abb. 2.1.-1: Modellierung der Netztopologie bei niedriger Bebauungsdichte. [4]

Es wurde ein möglichst einfaches Modell, das alle wesentlichen Komponenten des Niederspannungsnetzes aufweist, ausgewählt, damit die Funktionsweise des Simulationssystems übersichtlich bleibt. Da das System unabhängig von einem bestimmten Modell ist, kann bei Bedarf entsprechend erweitert werden.

Abb. 2.1.-2 zeigt die Modellstruktur, die in den nächsten Kapiteln ausführlich beschrieben wird. Das übergeordnete Netz besteht aus einem Transformator, der aus Hochspannungsebene in die Mittelspannungsebene speist, und mit geregelterm Betrieb die Spannung auf einem bestimmten Niveau halten kann. Danach liegt eine Zuleitungsfreileitung von etwa 10 km. Ein Niederspannungstransformator wandelt die Spannung von 20 kV zu 0,4 kV und versorgt über Kabel die Haushalte. Die Anzahl und die Verbindungsart des Verbrauchers ist leicht änderbar.

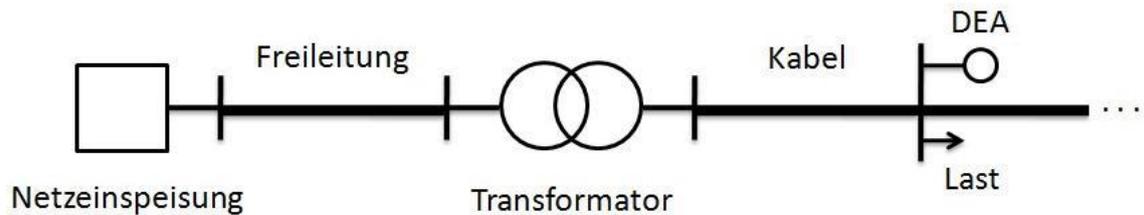


Abb. 2.1.-2: Ersatzschaltbild eines Niederspannungsnetzes mit den wichtigsten Komponenten

2.2. Netzeinspeisung

Die Verteilnetze, die in der Mittelspannungsebene eine Nennspannung von 10 oder 20 kV besitzen, werden durch ein übergeordnetes Netz versorgt. Das Verhältnis von induktivem zu ohmschem Anteil ist üblicherweise 10, wobei die großen induktiven Anteile auf Freileitungen und Transformatoren zurückzuführen sind. Die Kurzschlussleistung unterscheidet sich von Ort zu Ort. In diesem Modell wird von einer Kurzschlussleistung von 20 MVA ausgegangen.

Eine Netzeinspeisung wird durch folgende Parameter beschrieben.

$$U_N = 20 \text{ kV} \quad \text{í} \quad \text{Nennspannung}$$

$$S_k'' = 20 \text{ MVA} \quad \text{í} \quad \text{Kurzschlussleistung}$$

$$R/X = 10 \% \quad \text{í} \quad \text{Das Verhältnis von ohmschen zu induktiven Anteil der Netzimpedanz}$$

Die Kurzschlussleistung eines Netzes ist eine Kennzahl, mit der die innere Impedanz des Netzes gezeigt wird. Je größer die Kurzschlussleistung ist, desto kleiner ist die Netzimpedanz.

$$I_k'' \quad \text{í} \quad \text{Anfangskurzschlussstrom}$$

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' \quad \text{í} \quad \text{Kurzschlussleistung}$$

$$Z_k = c \frac{U_n}{\sqrt{3} I_k''} = c \frac{U_n^2}{S_k''} = 1,1 \cdot \frac{(20 \text{ kV})^2}{20 \text{ MVA}} = 22 \Omega \quad \text{í} \quad \text{Netzimpedanz}$$

$c \approx 1,1$ í Sicherheitsfaktor (Für denn fall, dass die Netzspannung kleiner als U_n ist)

Zum Vergleich von Komponenten ist es hilfreich, die Kenngrößen auf šper Unitõ umzurechnen. Dafür verwendet man Bezugsgrößen

$S_B = 500 \text{ kVA}$ í Bezugsleistung für alle Spannungsebenen

$U_{B,OS} = 20 \text{ kV}$ í Bezugsspannung für die Oberspannungsebene

$$Z_{B,OS} = \frac{U_{B,OS}^2}{S_B} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{500 \text{ kVA}} = 800 \Omega \dots \text{ Bezugsimpedanz für die Oberspannungsebene}$$

$$Z_{Netz,pu} = \frac{Z_{Netz}}{Z_{B,OS}} = \frac{22 \Omega}{800 \Omega} = 0,0275 \text{ í Netzimpedanz in pu}$$

Die Impedanz des Netzes verwendet man zur Kurzschlussberechnung, wo Kurzschlussströme das ganze System durchfließen. Im Umspannwerk regelt der Transformator die Spannung auf Mittelspannungsebene auf einen bestimmten Wert, der etwas größer als die Nennspannung ist (damit die Längsspannungsabfälle in den Leitungen kompensiert werden). Zur Vereinfachung der Berechnungen ist in diesem Modell die Spannung der Netzeinspeisung aus Sicht des Verteilnetzes konstant und unabhängig vom Laststrom. Aus diesem Grund spielt die Netzimpedanz keine große Rolle mehr in der Lastflussberechnung. Deshalb wird der Einfluss der Netzimpedanz durch die Berücksichtigung einer wesentlich größeren Kurzschlussleistung (etwa das Zehnfache des üblichen Wertes) für das einspeisende Netz reduziert.

Abb. 2.2.-1 zeigt die relevanten Parameter in SimPowerSystems für das übergeordnete Netz und die zugehörigen Schaltzeichen. Die Spannungsquelle ist sternförmig angeordnet und der Sternpunkt ist geerdet, um eine Referenzspannung definieren zu können. Alle Parameter werden als Variablen im Workspace definiert, damit die Durchführung der Änderungen vereinfacht wird.

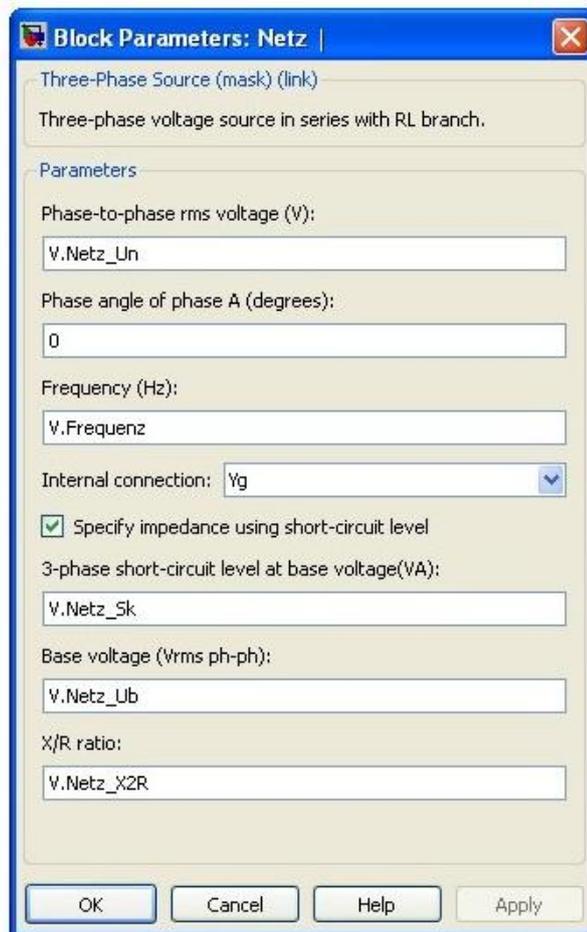
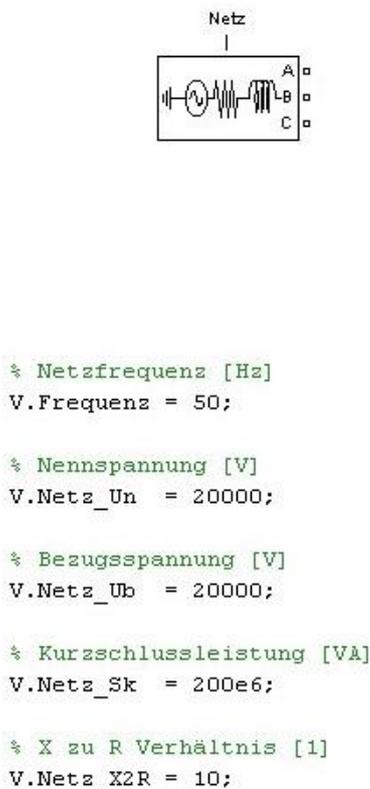


Abb. 2.2.-1: Blockschaltbild und Parameter der Netzeinspeisung in SimPowerSystems

2.3. Messstellen

Um den Aufwand der Berechnungen von der Simulationsumgebung in die MATLAB-Umgebung zu verlagern, werden bei der Simulation keine Kenngrößen berechnet, sondern nur der Verlauf von Spannungen und Strömen in allen Messstellen aufgenommen und ins Workspace übertragen. Nach der Beendigung der Simulation setzt sich das Programm im MATLAB fort und berechnet die gewünschten Kenngrößen (siehe Kapitel 3.6. Berechnung von Kenngrößen).

Die Messung der Spannungs- und Stromeffektivwertes sowie der Wirk- und Blindleistung kann man in Simulink mit Hilfe von Block `šDiskret Active Reactive Powerö` durchführen. Das hat zwei Nachteile. Erstens hat der Block ein gleitendes Fenster über eine ganze Periode und

damit braucht er nur eingeschwungene Messwerte, um die Leistungen für den stationären Betrieb zu ermitteln. Zweitens liefert der Block viele Werte ($2 \cdot 20 \text{ ms} / 50 \mu\text{s} = 800$), die man bei dieser Aufgabenstellung nicht braucht. Durch geeignete Algorithmen kann man mit minimalem Programmieraufwand schon akzeptable Ergebnisse bekommen.

In diesem Modell sind zwei Arten von Messstellen verwendet worden:

1. Eine 3 phasige Verbindung ohne Nullleiter
2. Eine 3 phasige Verbindung mit Nullleiter

Für die dreiphasige Verbindung ohne Nullleiter ist der Block `Three-Phase VI Measurement` verwendet worden. Abb. 2.3.-1 zeigt das Blockschaltbild, die Beschaltung und die Variablennamen. Im Falle, dass die Schaltung irgendwo geerdet ist, kann der Block die Spannungen gegen die Erde messen, das erleichtert Berechnungen bei unsymmetrischer Belastung. In diesem Modell ist der Sternpunkt der Spannungsquelle geerdet worden, weil dies keinen Einfluss auf die Lastflussrechnung hat. Das Signal `MS1_Vabc` enthält die drei Spannungen von Messstelle `MS1` gegen die Erde und im Signal `MS1_Iabc` sind die Messwerte der Phasenströme. Die Signale `MS1_Vabc` und `MS1_Iabc` werden in `MS1-Scope` gespeichert und nach Simulationsende ins `MATLAB` geschickt.

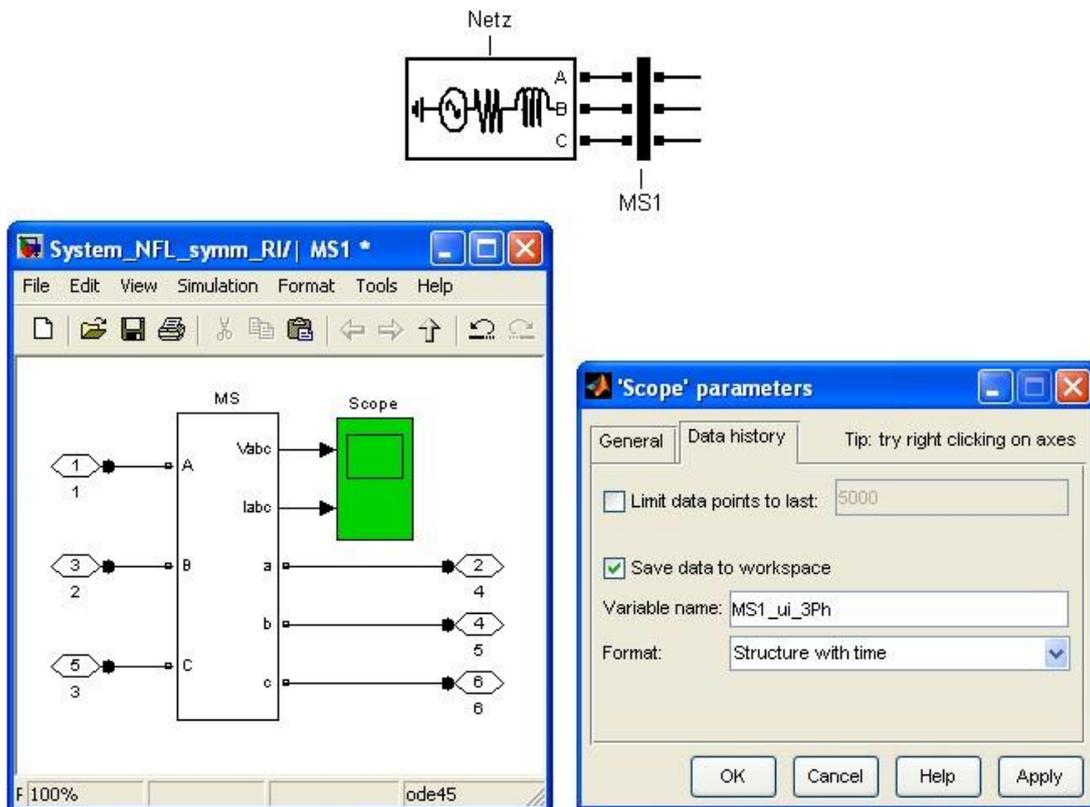


Abb. 2.3.-1: Blockschaltbild, Parameter und die Übergabe von Signalen bei dreiphasiger Messung.

Der Block 'Scope' (siehe Abb.2.3.-2) spielt eine wesentliche Rolle in der Arbeitsweise dieses Simulationssystems. Er ist die Schnittstelle zwischen Simulink und MATLAB in Bezug auf die gemessenen Daten. Man kann die Messwerte beliebig zusammensetzen oder sofort Berechnungen durchführen lassen und dann ans Scope schicken. Die Messwerte sind in Form einer strukturierten Variablen zusammengepackt (siehe Kapitel 3.5.).

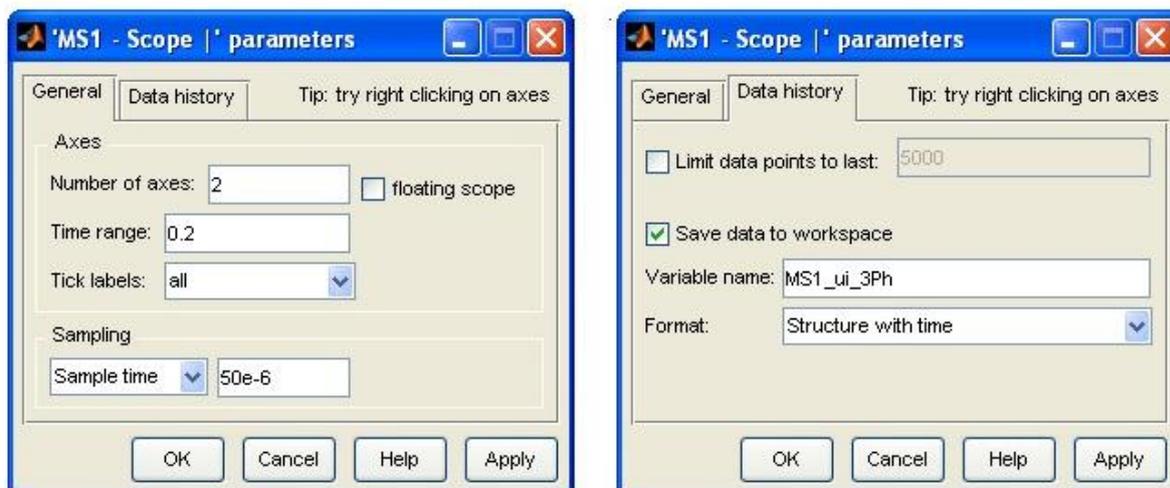
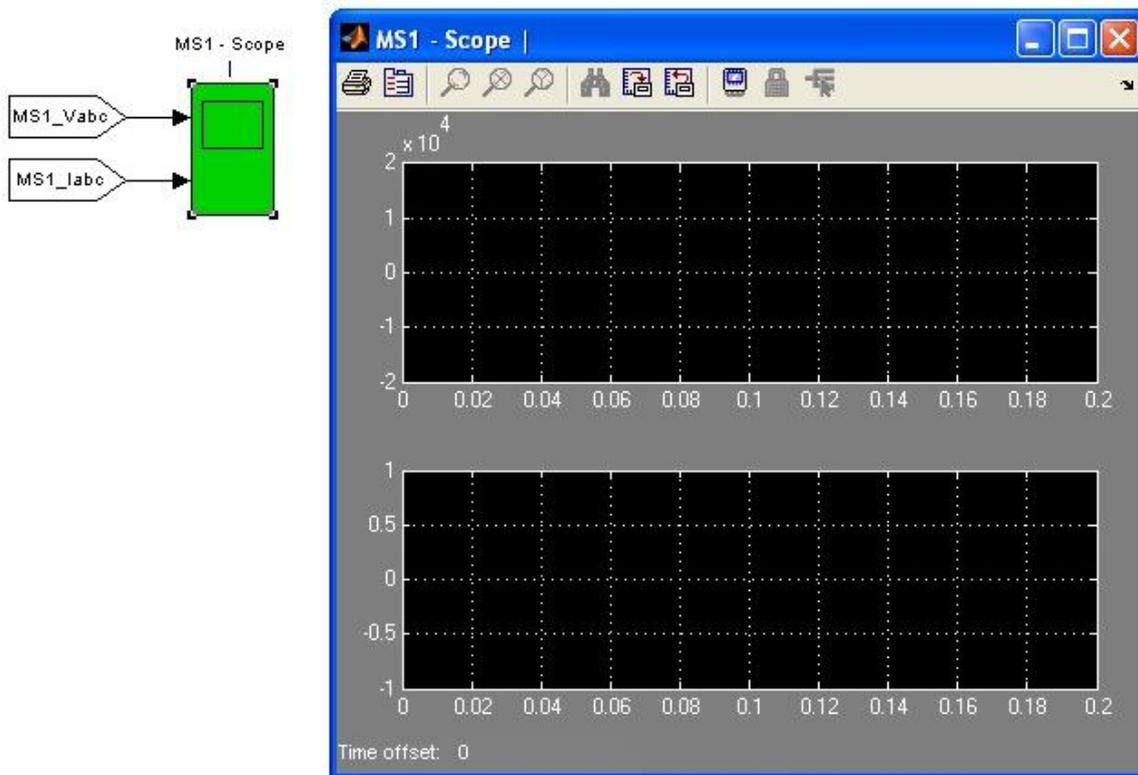


Abb. 2.3.-2: Blockschaltbild, Anzeigefenster und die Parameter von Scope.

Im Niederspannungsnetz ist wegen unsymmetrischer Belastung in drei Phasen ein Nullleiter vorhanden. Es muss in jeder Phase der Strom und die Spannung gegen den Nullleiter gemessen werden (Abb. 2.3.-3). Der Nullleiterstrom wird zur Kontrolle gemessen. Das Ganze wird in ein Subsystem verpackt und als Standard-Block zur Messung verwendet. Standardisierung ist deshalb notwendig, weil das Simulationssystem unabhängig von der

Anzahl der eingesetzten Messstellen sein soll. In jeder Messstelle können die Messsignale den gleichen Namen haben, wenn diese lokal definiert werden. Nur der Variablenamen in Scope sind zu ändern.

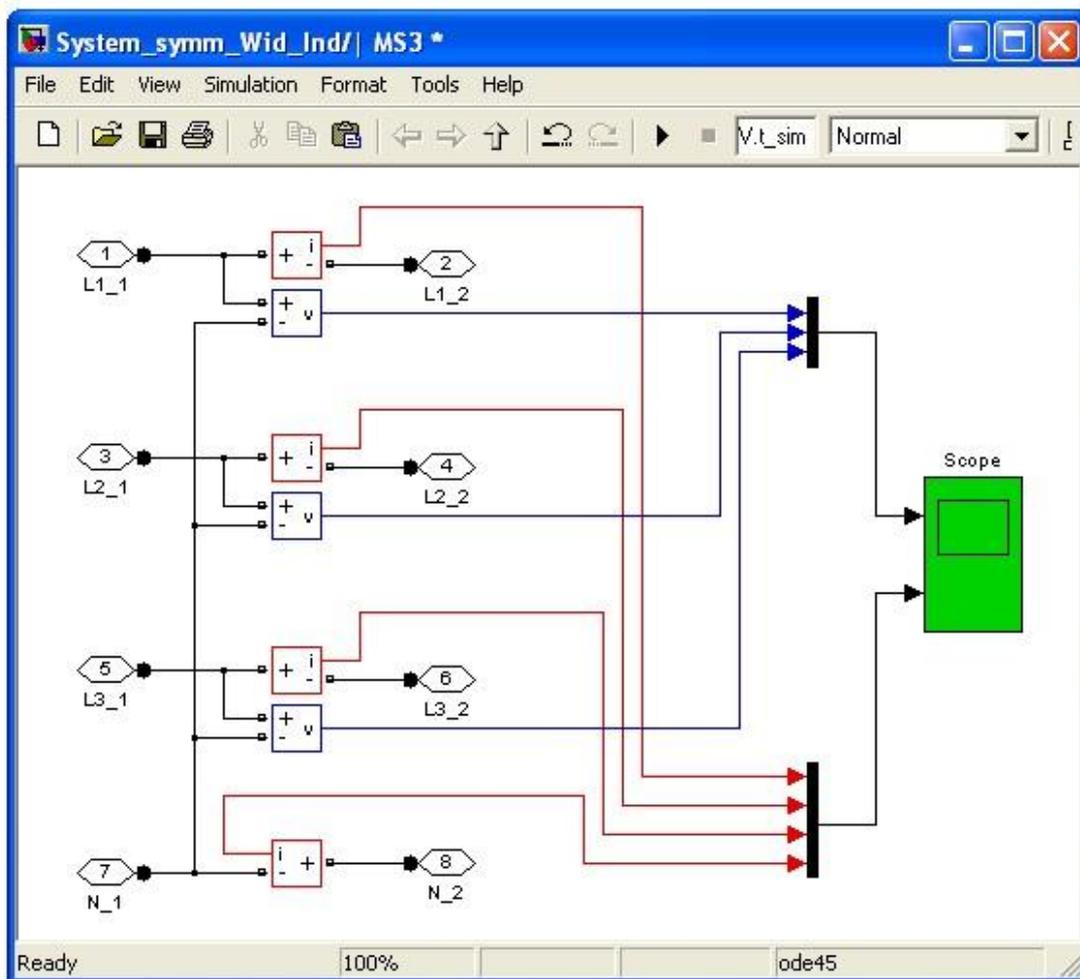
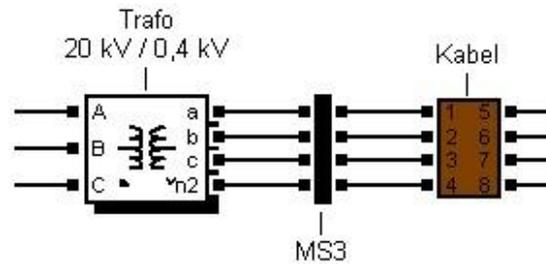


Abb. 2.3.-3: Blockschaltbild der Messstellen im Vierleitersystem und der Aufbau der Messeinrichtung

Testen der Messstelle

Zum Testen der Messstelle wurde folgende Anordnung (Abb. 2.3.-4) verwendet. Die Last ist mit dem Widerstand und der Induktivität nachgebildet. Die aufgenommene Leistung jeder Phase ist mit einem Wattmeter zu messen. Die Beschaltung des Wattmeters ist in Abb. 2.3.-5 dargestellt. Es werden mit einem Standard-Modul von SimPowerSystems die Wirk- und Blindleistung und Effektivwerte von Spannung und Strom gemessen und in Scope dargestellt.

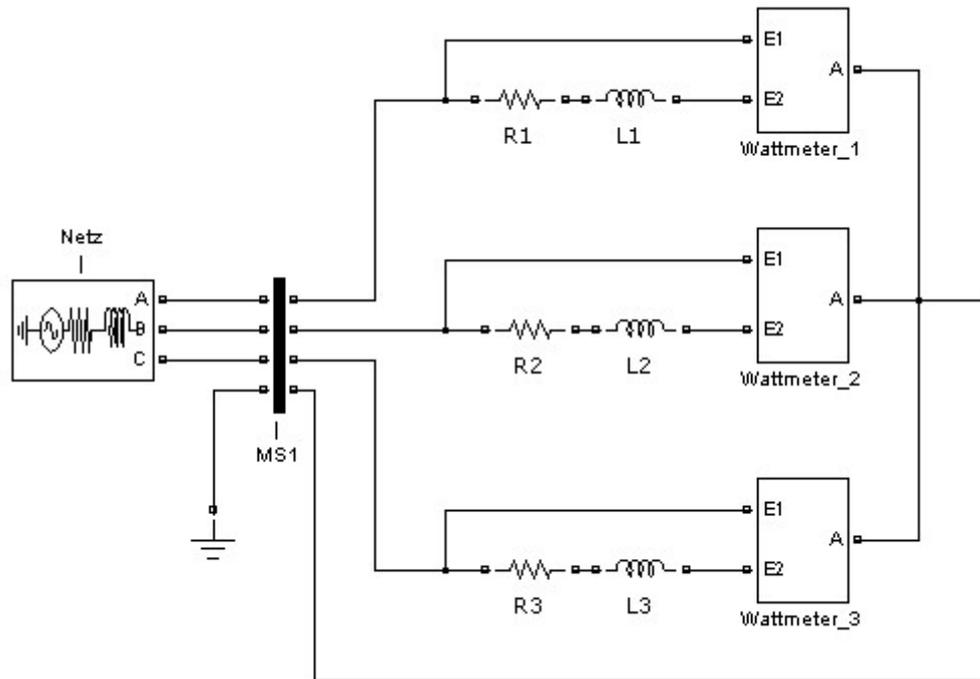


Abb.2.3.-4: Anordnung zum Testen der Messstelle

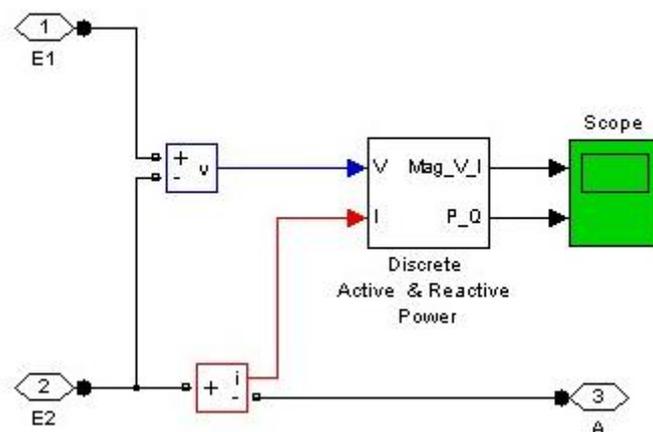


Abb. 2.3.-5: Der Aufbau des Wattmeters

Mittels folgenden Programms werden der Widerstand- und Induktivitätswert aus gegebener Leistung und Leistungsfaktor berechnet.

```
V.Frequenz = 50; [Hz] ... Netzfrequenz

L.U_N = 400; % V ... Nennspannung an der Last

L.S1 = 3000; % VA ... Scheinleistung

L.cosphi1 = 0.8; % 1 ... Leistungsfaktor ( P > Q )
%L.cosphi1 = 0.999999999; % 1 ...Leistungsfaktor(nur P =rein ohmsch)
%L.cosphi1 = 1/sqrt(2); % 1 ... Leistungsfaktor ( P = Q )
%L.cosphi1 = 0.5; % 1 ... Leistungsfaktor ( P < Q )

L.Z1 = 1/3 * L.U_N^2 / L.S1; % Ohm ... Impedanz

L.R1 = L.Z1 * L.cosphi1; % Ohm ... Resistanz = ohmscher Widerstand

L.X1 = sqrt(L.Z1^2 - L.R1^2); % Ohm ... Reaktanz

L.L1 = L.X1/(2*pi*V.Frequenz); % H ... Induktivität

L.P1 = L.S1 * L.cosphi1; % W ... Wirkleistung

L.Q1 = sqrt(L.S1^2 - L.P1^2); % VA ... Blindleistung

L.w1 = acos(L.cosphi1)*180/pi;
```

Die Last in jeder Phase wurde durch ein Wattmeter gemessen und mit gegebenen Leistungswerten verglichen. Die Anordnung funktioniert auch für unsymmetrische Belastung.

2.4. Lastmodellierung mit Stromquelle

Da es in SimPowerSystems keine variablen Widerstände gibt, um die Lastganglinie nachzubilden, wurde in dieser Arbeit versucht, von den Stromquellen Gebrauch zu machen. Die Ströme lassen sich nach dem Prinzip der unabhängigen Quellen durch die Überlagerung der Ströme aus verschiedenen unabhängigen Quellen bilden. Die Spannungsquellen erzeugen Leerlaufspannungswerte aber wegen der Stromquellen und

großen Widerständen erzeuge sie keine Ströme. Abb. 2.4.-1 zeigt eine Schaltung zur Demonstration der Funktionsweise.

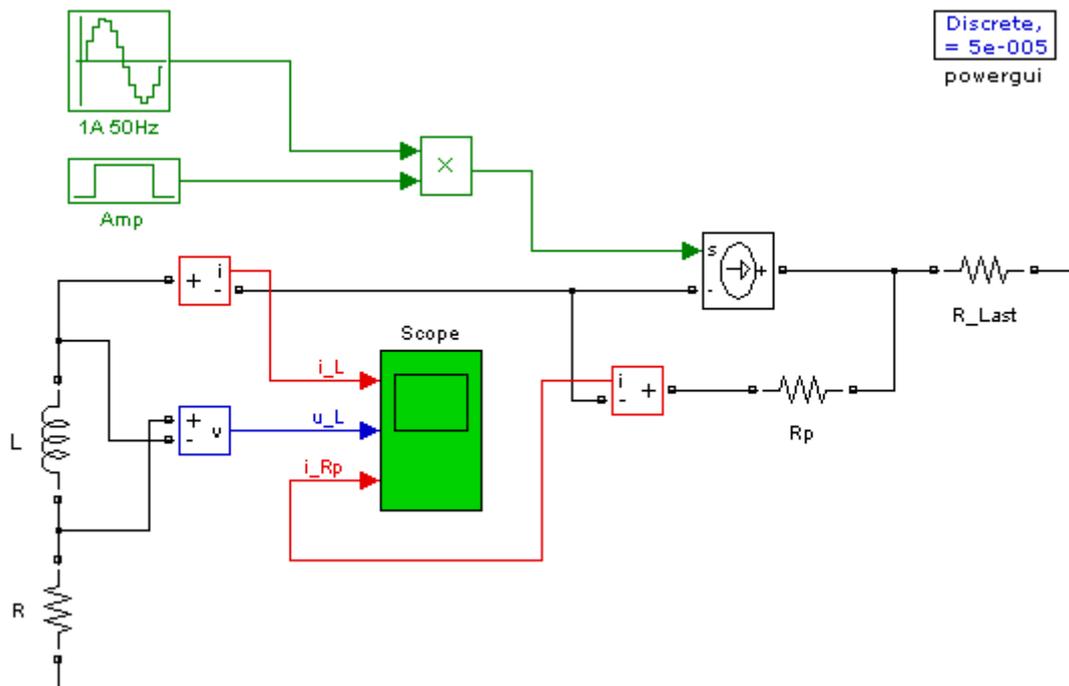


Abb. 2.4.-1: Die Schaltung zur Demonstration der Funktionsweise der Stromquelle

Die aufgenommene Leistung beim Verbraucher hängt von der Anschlussspannung und dem Strom ab und es macht keinen Unterschied, wie der Strom erzeugt wurde. Deshalb ist die Leistung auch unabhängig vom Widerstand, der in Serie an die Stromquelle angeschlossen wird. Die Induktivität ist wie eine Stromquelle und es können nicht zwei Stromquellen in Serie geschaltet werden. Da eine Induktivität in Serie mit der Stromquelle liegt, muss die Stromquelle einen parallelen Widerstand haben. Wenn die Stromquelle die gleichen Ströme ins Netz einspeist, wie ein ohmscher Widerstand das machen würde, sind die Spannungsabfälle und Belastung der Netzbetriebsmittel ebenfalls gleich. Außerdem sind die entstehenden Spannungswerte an den Knoten auch richtig. Die aufgenommene Leistung hängt von Strom und Spannung ab. Da die Spannung wegen der Spannungsabfälle im Kabel sinkt, ist die Leistung der modellierten Last nicht konstant.

Das Signal für die Stromquelle enthält den gewünschten Stromverlauf, der aus einer amplitudenmodulierten Sinusschwingung besteht. Das Modulieren wird mit Hilfe eines Timer-Block šAmpö gemacht. R_p muss so groß sein, dass der entstehende Fehler im Strom vernachlässigbar klein bleibt. Andererseits klingt die Spannungsstörungen sehr spät ab, wenn

der Widerstand zu groß gewählt wird. Die unerwünschten Störungen sind in Abb. 2.4.-2 dargestellt.

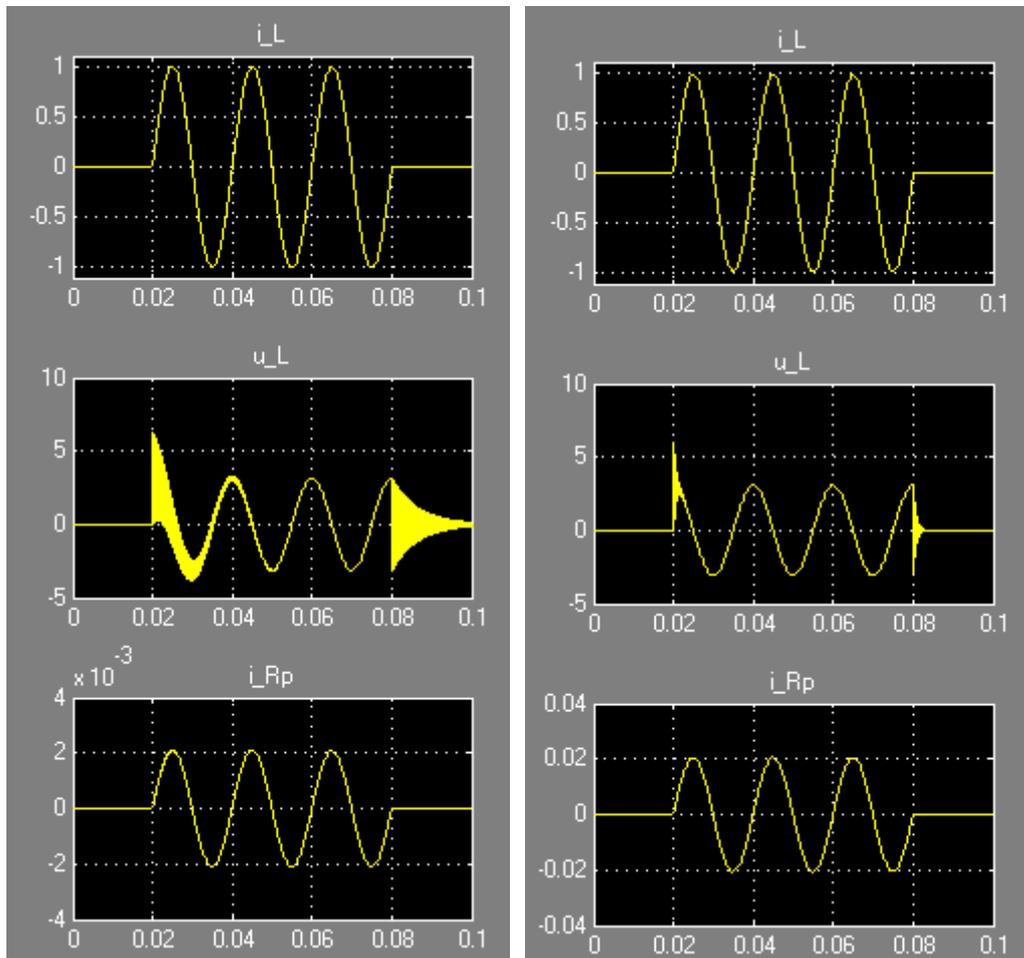


Abb. 2.4.-2: Die Spannungsstörungen, die aus der Änderung der Stromamplitude entstehen.
 links: $R_p = 100 \text{ k}\Omega$, es fließen 2 mA durch R_p ($0,2 \%$ Fehler im Strom)
 Die Schwingung dauert mehr als eine Periode.
 rechts: $R_p = 10 \text{ k}\Omega$, es fließen 20 mA durch R_p (2% Fehler im Strom)
 Die Schwingung dauert weniger als ein Viertel einer Periode.

Um messtechnisch richtige Spannungseffektivwerte zu berechnen, kann man den Mittelwert aus dem Maximum der Spannung und seinem nachfolgenden Wert bilden. Das verfälscht zwar die Ergebnisse in kleinem Maß, aber es wird garantiert kein komplett falscher Wert als Spannung registriert. Abb. 2.4.-3 zeigt das genauere Bild der Störung.

Man kann die Spannung an der Last messen und beim Sinken der Spannung in gleichem Maß den Strom erhöhen. Damit wird ein geschlossener Regelkreis gebildet, der seine eigene

Dynamik hat. Da die Messung der Spannung mit großem Aufwand verbunden ist und die Einschwingvorgang relativ lang dauert, wurde auf die Realisierung einer PQ-Last verzichtet. Trotzdem ist dieses Modell ausreichend, um die Funktionsweise des ganzen Systems darzustellen.

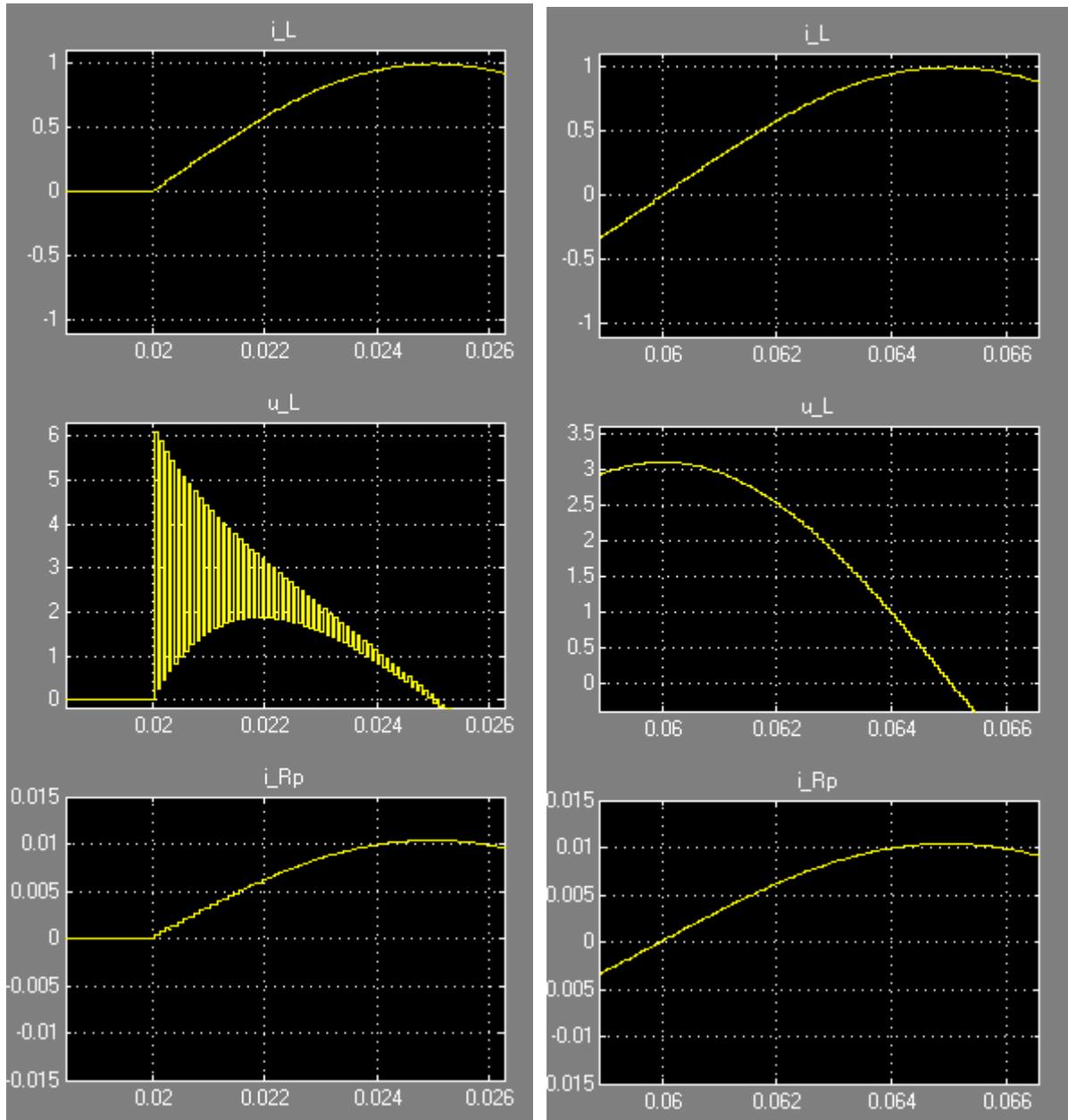


Abb. 2.4.-3: Nähere Betrachtung des Schwingungsverlaufs.

links: Am Anfang springt die Spannung auf fast den doppelten Wert.

rechts: Keine Schwingung, obwohl die Stromschritte die gleichen sind.

2.5. Wohneinheiten

In jedem Wohneinheits-Block gibt es drei einphasige Verbraucher, die unabhängig voneinander verschiedene Lastganglinien haben. Es gibt auch eine einphasige Erzeugungseinheit, die in einen der drei Phasen einspeisen kann. Abb. 2.5.-1 zeigt die Anordnung der Stromquelle. Mit Hilfe von Stromquellen wird der gleiche Strom erzeugt, der durch einen Widerstand fließen würde, um die gleiche Leistung aufzunehmen. Das Signal Sig gibt den Stromverlauf für eine Anschlussspannung von 230V vor. Wenn die Anschlussspannung vergrößert wird, steigt auch die aufgenommene Leistung. Für eine genauere Modellierung soll der Wert der Spannung auch berücksichtigt werden, was aber mit großem Aufwand verbunden ist. Der Widerstand R_{Last} ist so zu dimensionieren, dass bei maximalem Strom (bei Höchstlast) die Netzennennspannung nicht überschritten wird.

Da es meistens nur die Messungen der Wirkleistung vorhanden sind und der Leistungsfaktor der Haushalte auch fast nahe zu Eins (Im Allgemeinen: $\cos \varphi = 0,9$) ist, wird zur Vereinfachung in den Lastgängen nur die Wirkleistung abgebildet. Bei Bedarf kann man durch Verzögerung des Signals die Blindleistungen berücksichtigen.

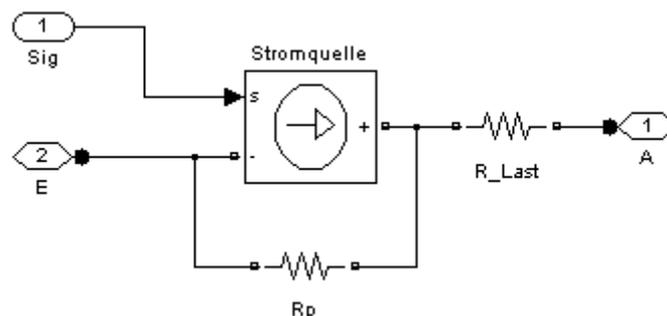


Abb. 2.5.-1: Das Modell für einer einphasige Last

In Abb. 2.5.-2 ist dargestellt, wie aus einem gegebenen Wirkleistungsverlauf momentane Stromwerte erzeugt werden. Es wird zunächst aus der Wirkleistung die Amplitude der Sinusschwingung für den Strom berechnet, indem die Leistung mit dem Faktor $\sqrt{2}$ multipliziert wird. Diese Amplitude wird danach mit einer Sinusschwingung (mit Amplitude Eins und 50 Hz Frequenz) multipliziert und steht für die Stromquelle zur Verfügung. Die Wirkleistung ändert sich nach zwei Perioden (40 ms) und ist in der Zwischenzeit konstant.

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot \frac{P(t)}{U} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{400 \text{ V}} \cdot P(t)$$

$$P_{2i} = \frac{\sqrt{6}}{400}$$

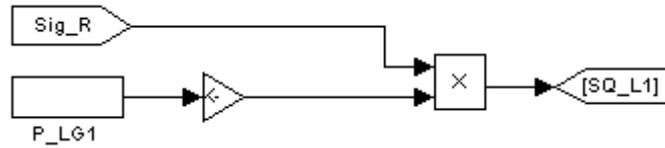


Abb. 2.5.-2: Die Erzeugung des momentanen Stromwertes aus dem Wirkleistungsverlauf

Wenn die Amplitude des Stromes sich sprungartig ändert, entsteht ein Stromsprung (außer, wenn der Stromwert in diesem Zeitpunkt gleich Null ist) und das ist sehr ungünstig für die Messung der Spannungen, da Spannungsstörungen durch die Induktivitäten erzeugt werden. Die Störungen dauern in der Regel mehrere Perioden und stören die Messung. Um dieses Effekt zu vermeiden, wird ein Signal, dessen Anfang und Ende in jeder Periode wie eine Rampe verläuft, mit allen Sinussignalen multipliziert. Durch diese Maßnahme werden die Signale in allen drei Phasen bei Amplitudenänderung gleich Null und es gibt keine Stromsprünge. Um die richtigen Werte zu messen, muss man etwa eine Periode warten und dann erst die Messung der Spannungen durchführen.

Um diesen Vorgang genauer zu erklären, sind in Abb. 2.5.-3 die drei Sinusverläufe dargestellt. Bei Simulationszeitschritten von $T_s = 50 \mu s$ wird eine Periodendauer $T_{50Hz} = 20 ms$ in 400 Schritte aufgeteilt.

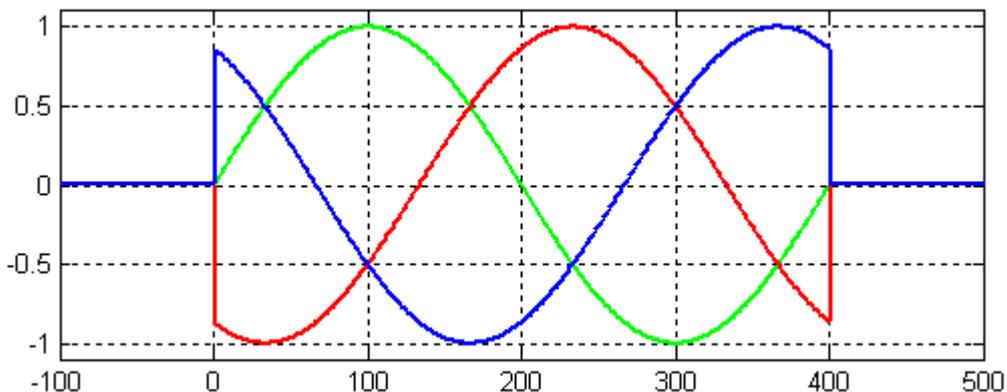


Abb. 2.5.-3: Drei Sinussignale für die Wohneinheiten

Da die Signale zeitlich diskret sind, kann man durch Subtrahieren zweier einander folgender Werte die Schrittsprünge berechnen (Abb. 2.5.-4)

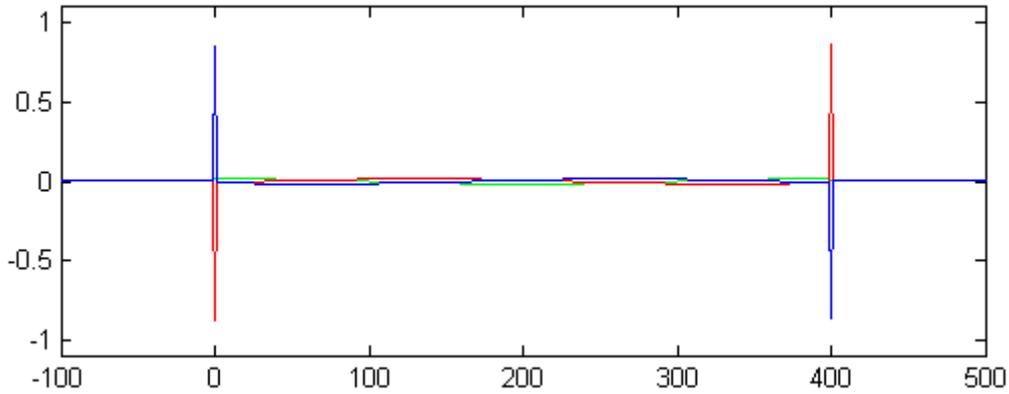


Abb. 2.5.-4: Die Schrittsprünge bei nicht behandelten Sinussignalen

Mit Hilfe einer Gewichtungsfunktion (siehe Abb. 2.5.-5), die am Anfang und Ende jeder Periode einen rampenförmigen Verlauf hat, bewirkt man, dass am gewünschten Zeitpunkt alle drei Sinussignale alle gleichzeitig gleich Null werden.

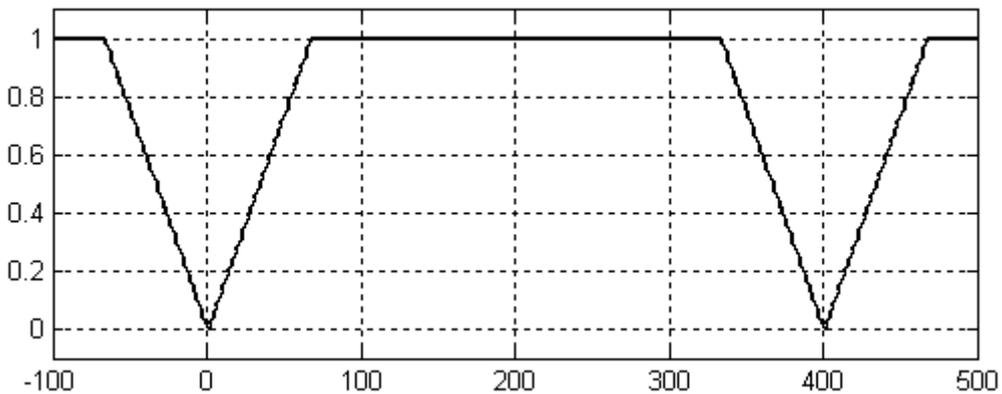


Abb. 2.5.-5: Die Gewichtungsfunktion mit rampenförmigem Verlauf

Abb. 2.5.-6 zeigt die drei Sinusverläufe nach der Multiplikation mit der Gewichtungsfunktion. Die Dauer der Rampe, bis das Signal den Wert Eins erreicht, soll so groß sein, dass die Schrittsprünge nicht größer als die Ableitung des Signals selber sind. Das wurde durch experimentelle Versuche herausgefunden. Es hat sich gezeigt, dass eine Länge einer Viertelperiode ausreichend ist. In Abb. 2.5.-7 sind die Schrittsprünge bei einer Rampendauer von 67 Zeitschritten dargestellt.

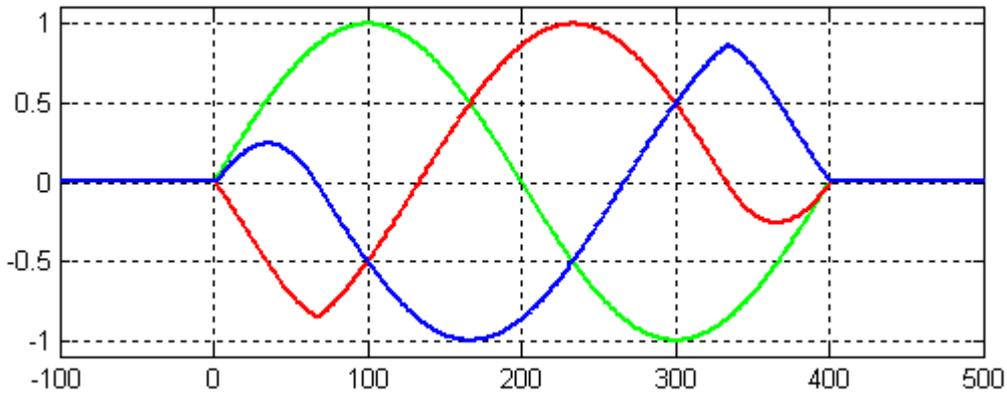


Abb. 2.5.-6: Die drei Sinussignale nach Multiplikation mit der Gewichtungsfunktion

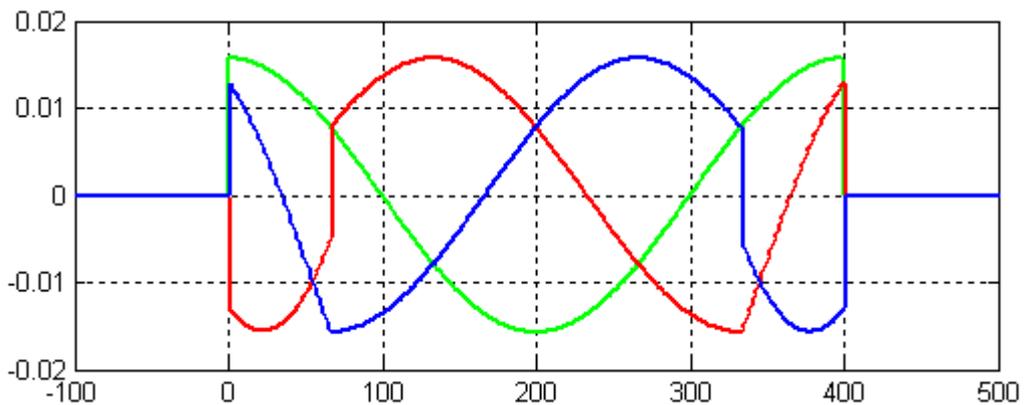


Abb. 2.5.-7: Die Schrittsprünge bei einer Rampenlänge von 67 Zeitschritten

Eine andere Komponente im Wohneinheitsmodell ist der Schalter, der die DEA an eine der drei Phasen anschließt. Damit hat man die Möglichkeit, verschiedene Szenarien für die Verteilung der Einspeisung in die drei Phasen zu untersuchen, ohne in das Modell eingreifen zu müssen. Der Block ist in Abb. 2.5.-8 dargestellt.

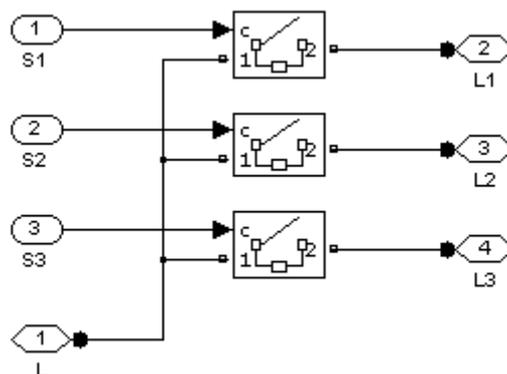


Abb. 2.5.-8: Der Schalter in WE zum Anschließen der DEA an eine der drei Phasen

Abb. 2.5.-9 zeigt das ganze Modell einer Wohneinheit. Beim Hinzufügen einer neuen Wohneinheit muss man die Namen der Variablen in P_DEA, P_LG1, P_LG2, P_LG3, sowie die Konstanten, die an den Schaltern angeschlossen sind, und die Faktoren für die Erzeugung des SQ_DEA Signals entsprechend benennen.

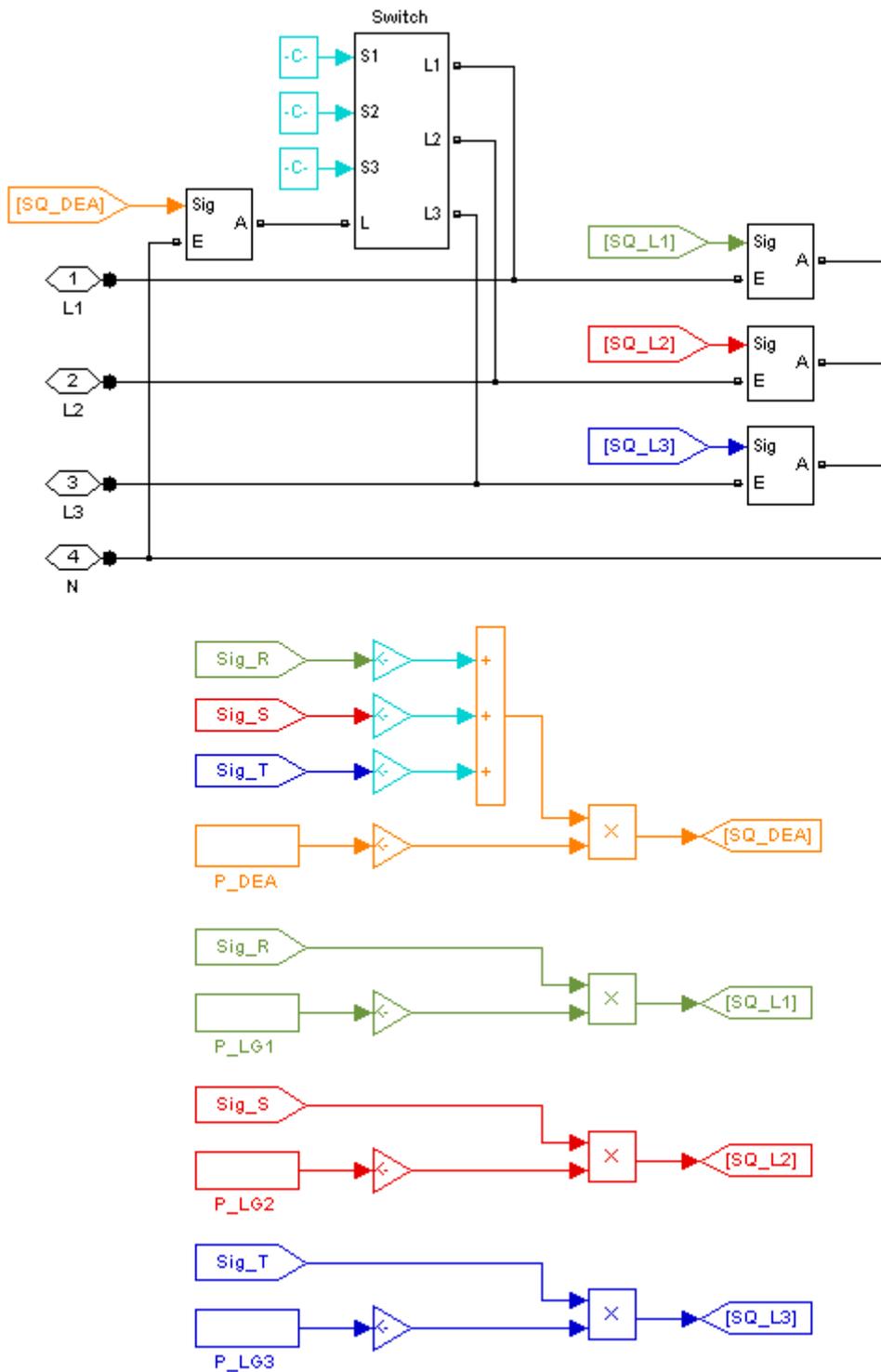


Abb. 2.5.-9: Das Gesamtmodell für eine Wohneinheit.

2.6. Andere Komponenten

Leitungen

Zur Modellierung der Kabel und der Freileitung wurde das Modul šPi Section Lineõ verwendet. Andere Module sind für kurze Längen und Simulationszeitschritte von $T_s = 50 \mu s$ nicht geeignet. Im Freileitungsmodell sind drei Stück und im Kabelmodell vier Stück dieses Moduls eingesetzt (Abb. 2.6.-1).

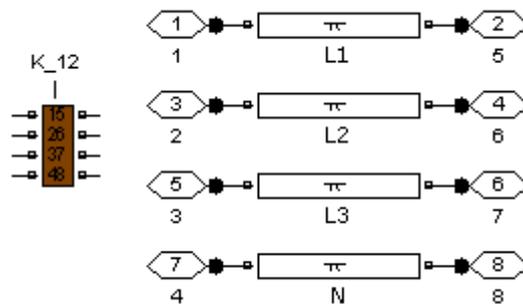


Abb. 2.6.-1: Das Block und der Aufbau des Kabelmodells

Das Ersatzschaltbild der šPi Section Lineõ ist in Abb. 2.6.-2 zu sehen. Man kann die Anzahl der Pi-Stücke bei Bedarf vergrößern, was für kurze Entfernungen nicht notwendig ist.

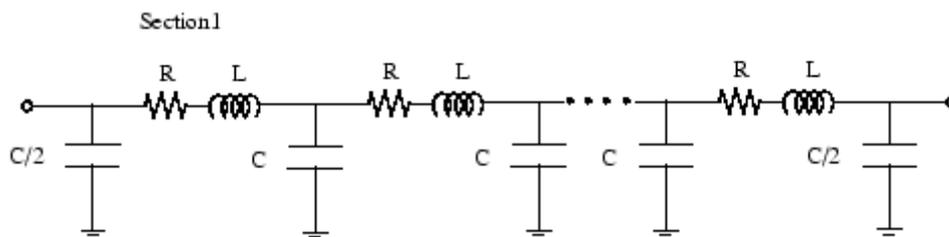


Abb. 2.6.-2: Das Ersatzschaltbild der šPi Section Lineõ [MATLAB-Help]

Abb. 2.6.-3 zeigt das Fenster (in SimPowerSystems) für Parametrierung des Moduls. Die verwendeten Werte der Parameter sind aus Abb. 3.3.1 zu entnehmen. Nachteilig ist, dass es keine Möglichkeit zur Eingabe der Nullsystem Kennwerte gibt.

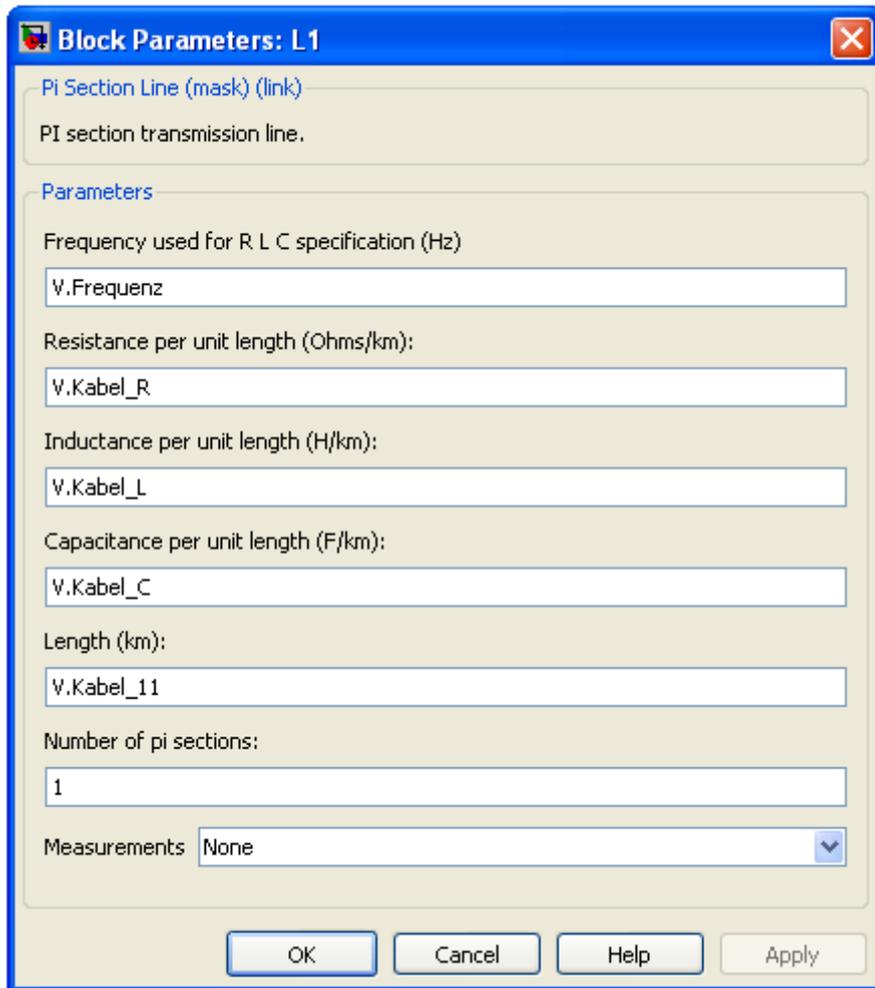


Abb. 2.6.-3: Das Fenster (in SimPowerSystems) für Parametrierung des Kabelmoduls

Transformator

Für die Transformatoren gibt es das fertige Modul *Three Phase Transformer (two Winding)* in der Bibliothek *powerlib*. Nach der Wahl der Schaltgruppe muss man die Phasenverschiebung bei Erzeugung der Sinussignale berücksichtigen. Abb. 2.6.-4 zeigt das Modul und das Ersatzschaltbild des Transformators, das aus der Dokumentation des entsprechenden Blocks entnommen wurde.

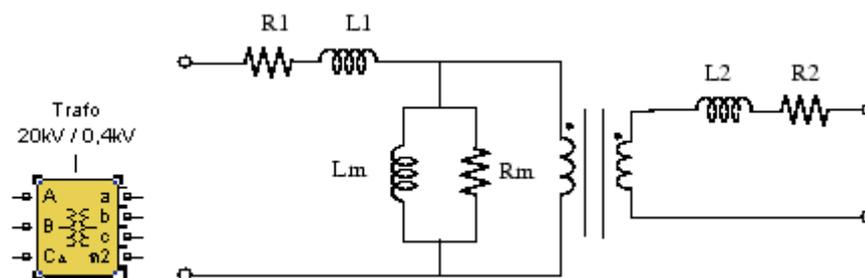


Abb. 2.6.-4: Das Modul und das Ersatzschaltbild der Transformator [MATLAB-Help]

Obwohl die übliche Schaltgruppe im Niederspannungsnetz Dyn5 ist, wurde Dyn11 gewählt, weil nur Dyn1 und Dyn11 zur Verfügung stehen. Die Angabe der Parameter in der Form von Widerständen und Induktivitäten ist nicht optimal, da die Zuordnung der Verluste auf Primär- oder Sekundärseite des Transformators nicht eindeutig zu bestimmen ist. Üblich ist die Vorgabe von Kurzschlussverlustleistung. Einen Überblick über die Parameter des Transformators gibt die Abb. 2.6.-5. Die eingestellten Werte sind aus Abb. 3.3.1 zu entnehmen.

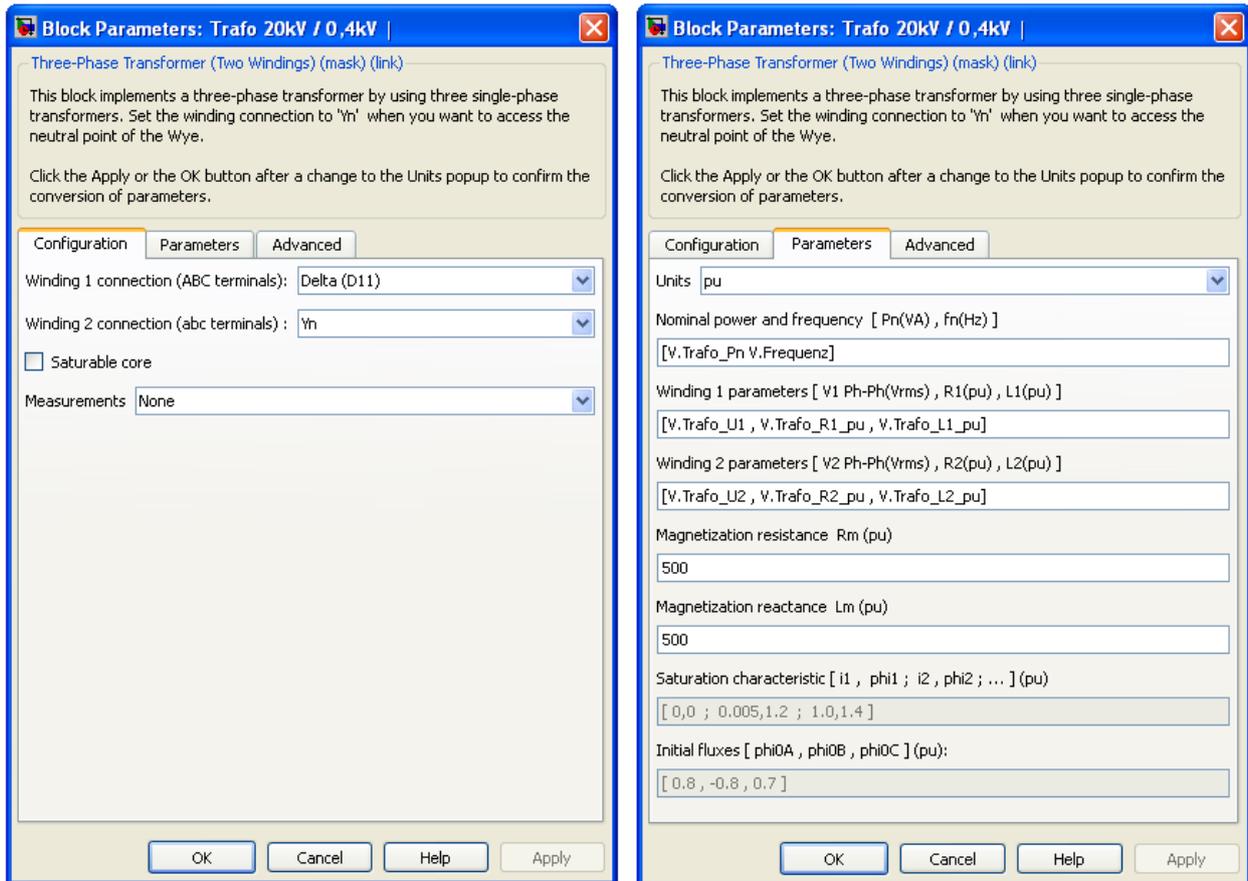


Abb. 2.6.-5: die zwei Fenster (in SimPowerSystems) für Parametrierung des Transformatormoduls

3. Das Modell

3.1. Systemaufbau

Es ist üblich, die Daten, wie Last- und Erzeugungsganglinien, in Excel zu verwalten. Diese Software vereinfacht die Verarbeitung der Daten und unterstützt auch einfache Berechnungen. Die Simulation wird in der Simulink-Umgebung durchgeführt, wo die Modellparameter als Konstanten oder Variablen definiert werden können. Da bei Vorhandensein von Simulink auch die Programmierumgebung MATLAB zur Verfügung bereit steht, kann man komplexe Aufgaben und Berechnungen durch die Programmierung diverser Funktionen realisieren.

Mit geringem Programmieraufwand kann man die drei Umgebungen mit einander verknüpfen. Allerdings sind die Zugriffsmöglichkeiten, wie sie in Abb. 3.1.-1 dargestellt sind, zwischen den Umgebungen beschränkt.

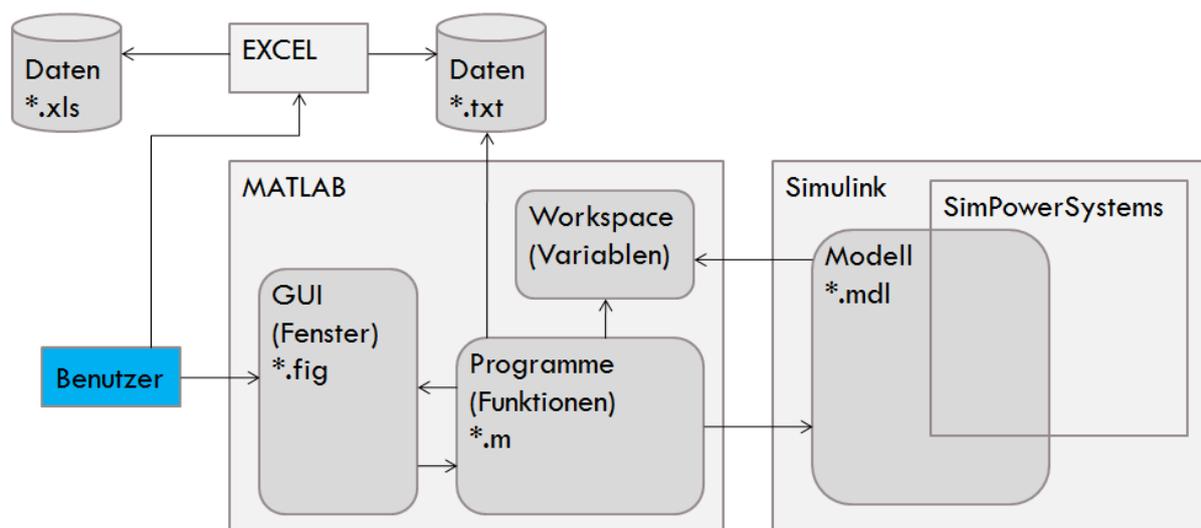


Abb. 3.1.-1: Die Zugriffsmöglichkeiten zwischen den Umgebungen

Der Benutzer kann seine Daten in Excel bearbeiten und in einem festgelegten Format speichern. Es handelt sich um ein neues Format, das zu dieser Aufgabe angepasst wurde (näheres dazu im folgenden Kapiteln) und mit geringem Programmieraufwand verändert werden kann. Die Dateien werden als Text-Datei in einem Ordner gespeichert.

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI) vereinfacht in erster Linie die Ausführung verschiedener Funktionen, wie laden der Dateien, Synthese der Ganglinien und Simulation.

Außerdem erhält man eine Ansicht aller verwendeten Parameter, damit der Benutzer sie kontrollieren kann. Die diversen Funktionen, die in MATLAB programmiert worden sind, werden entweder durch das GUI oder durch andere Funktionen aufgerufen.

Um die Weiterentwicklung und die Erweiterung des Systems zu erleichtern, ist beim Systementwurf ein modularer Aufbau angestrebt worden. Diese Eigenschaft ist in der Entwicklungsphase sehr hilfreich, da wegen der übersichtlichen Aufteilung der Aufgaben zwischen den Modulen die Fehlersuche sehr effizient und schnell erfolgen kann. Dafür sollen Module keine Interaktionen zwischen einander haben, sonst muss man beim Vornehmen der Änderungen in einem Modul auf die mögliche Auswirkung auf andere Module achten, was die Entwicklung des Systems erheblich verkompliziert. Es müssen Schnittstellen für Ein- und Ausgang der Module definiert werden, um die Datenverarbeitung in folgenden Schritten zu erleichtern. Jede Funktion in MATLAB hat ein eigenes Workspace, in das sie ihre Variablen legen kann. Es gibt auch ein Base-Workspace, in das alle Funktionen ihre Variablen kopieren können. In diesem System ist das Base-Workspace als gemeinsames Datenlager für alle Funktionen und auch für das Simulationsmodell verwendet worden. Ein weiterer Vorteil der Anwendung eines gemeinsamen Datenlagers ist, dass man bei der Fehlersuche einen guten Überblick über alle wichtigen Variablen hat.

Das Modell in Simulink kann mit dem Befehl `sim()` in MATLAB gestartet werden. Während des Simulationsablaufs wird das Programm gestoppt und in weiterer Folge gibt es keine Zugriffsmöglichkeit auf das Modell. Vor dem Beginn der Simulation werden alle Variablen, die in den Modulen verwendet worden sind, mit ihrem Variablenwert aus Base-Workspace ersetzt. Nach der Beendigung der Simulation werden die Ergebnisse, wie Strom- und Spannungsverläufe des Blocks Scope, in das Base-Workspace übertragen. Danach setzt das Programm in MATLAB fort und kann die gewünschte Kenngrößen, wie U, I, P, Q, S, usw. aus den Simulationsergebnisse ausrechnen.

Bei der Entwicklung der Berechnungsmethoden ist die Nebenbedingung angenommen, die Simulationszeit in Kosten der Genauigkeit zu optimieren. Dafür sind folgende Maßnahmen getroffen worden:

- Auswahl der zeitdiskreten Simulation.

- Überlagerung des Berechnungsaufwands von Simulink in MATLAB

Minimierung der Simulationszeit für einen Netzzustand

Verzicht auf aufwändige Algorithmen mit sehr hoher Genauigkeit

Da die Aufgaben meistens auf Signalverarbeitung zurück gehen, werden in dieser Arbeit viele Methoden durch Beobachtung von Eigenschaften der Signal und spezielle Rahmenbedingungen entwickelt.

3.2. Modellbildung

Zuerst bildet man in Simulink-Umgebung mit Hilfe einer Bibliothek für elektrische Komponenten (SimPowerSystems) ein Modell. Die Struktur und die Komponenten (bis auf Messstellen und Wohneinheiten) sind unabhängig vom Simulationssystem und können nach der Bedarf frei gewählt werden, um das Netz beliebig genau nachzubilden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Modell eines Niederspannungsnetzes mit wesentlichen Komponenten beispielhaft verwendet, um die Funktionsweise des Systems darzustellen.

Abb. 3.2.-1 zeigt das Modell mit 6 Wohneinheiten.

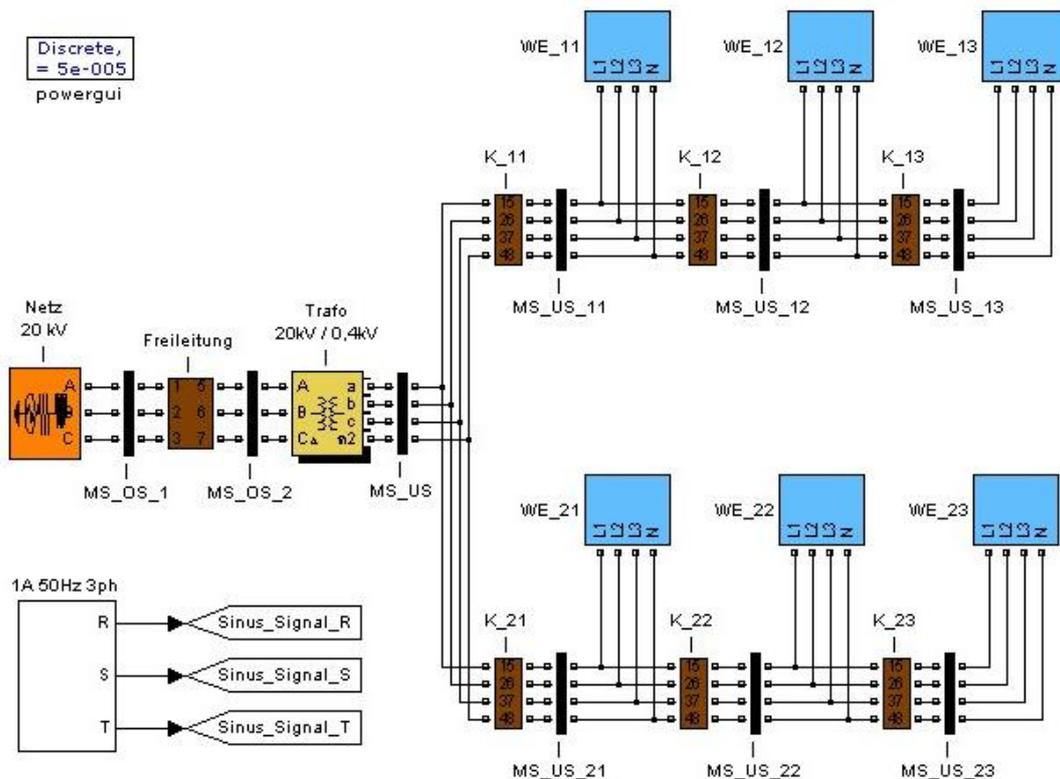


Abb. 3.2.-1: Das Gesamtmodell mit den Komponenten von SimPowerSystems mit 6 Wohneinheiten

3.3. Modellparameter

Nachdem man das zu untersuchende Modell in Simulink/SimPowerSystems schon zusammengebaut hat, gibt es meistens Parameter, die man gerne schnell ändern will, um die Auswirkungen zu untersuchen. Damit das Modell nicht jedes Mal geöffnet werden muss, um einige Parameter zu ändern, gibt es die Möglichkeit, alle relevanten Parameter im Modul als Variablen zu definieren. Diese Variablen werden in eine Excel-Datei mit einer bestimmten Struktur geschrieben. Das Simulationssystem liest die Datei ein und legt die Variablen, die das Modell braucht, in das Workspace.

Grundsätzlich sind 3 Gruppen von Informationen für das System zu definieren.

1. Parameter der Modellkomponenten, die man später ändern möchte
2. Informationen über Verbrauchertyp und die installierte DEA in der Wohneinheiten
3. Informationen über die verwendete Messstellen im Modell

Da die Datenverarbeitung in Excel sehr bequem und effizient ist, wird das Erstellen und die Bearbeiten der Daten im Excel vollgezogen. Danach wird die Parameter-Datei in šText (Tabstopp getrennt) gespeichert, damit das Programm sie einlesen kann. Abb. 3.3.-1 zeigt ein Beispiel der Datenstruktur in Excel.

Eine der Vorteile bei Einlesen einer Tabstopp getrennten Text-Datei ist, dass die leeren Stellen nicht berücksichtigt werden. Das heißt, dass man zur Erhöhung der Übersichtlichkeit beliebig viele Leerzellen und leere Zeilen verwenden kann. Die erste Zelle soll das Wort šVerbrauchermodell beinhalten, damit beim Einlesen sicher gestellt werden kann, dass die richtige Datei ausgewählt wurde. Das Wichtigste ist, dass beim Schreiben in einer Zelle keine Leerzeichen verwendet werden dürfen, sonst wird die Zelle als mehrere Einheiten gelesen und das führt zu einem Fehler bei der Datenverarbeitung. Für Leerzeichen kann man das Zeichen š verwendet, beim Einlesen wird dieses Zeichen durch ein Leerzeichen umgetauscht.

Bei der Einheiten ist zu beachten, dass diese gleich sein müssen wie im Modell. Zur Eingabe von Dezimalzahlen müssen Punkte verwendet werden. Alle Parameter werden als strukturierte Variablen mit Namen V.Variablenname in Base-Workspace von MATLAB

gespeichert. Und die Variablennamen sind genau so zu schreiben, wie es in Modell nach ŠV.÷ gefolgt wird. Variable, die keine Einheit haben, werden mit der Einheit 1 versehen.

	A	B	C	D
1	Verbrauchermodell			
2	Modell_Information			
3				
4	Modellname	System6		
5				
6	Parameter			
7	Netz_Un	20000	V	Netz : Phase-to-phase_rms_voltage [effektive_Aussenleiter
8	Netz_Sk	20	MVA	Netz : 3-phase_short-circuit_level_at_base_voltage [Kurzsc
9	Netz_Ub	20000	V	Netz : Base_Voltage_Phase-to-phase_rms [zur_Berechnur
10	Netz_X2R	10	1	Netz : X/R_ratio
11				
12	FL_R	0.24	Ohm/km	Freileitung : Widerstandsbelag
13	FL_L	0.0011	H/km	Freileitung : Induktivitätsbelag
14	FL_C	9.0e-9	F/km	Freileitung : Kapazitätsbelag
15	FL_D	10	km	Freileitung : Leitungslänge
16				
17	Trafo_Pn	0.1	MVA	Trafo : Nominal_power
18	Trafo_U1	20	kV	Trafo : Winding_1_Ph-Ph_rms_voltage [Trafo_Oberspannun
19	Trafo_R1_pu	0.01	1	Trafo : Widerstand_am_Oberspannungsseite
20	Trafo_L1_pu	0.05	1	Trafo : Induktivität_am_Oberspannungsseite
21	Trafo_U2	0.4	kV	Trafo : Winding_2_Ph-Ph_rms_voltage [Trafo_Unterspannur
22	Trafo_R2_pu	0.01	1	Trafo : Widerstand_am_Unterspannungsseite
23	Trafo_L2_pu	0.05	1	Trafo : Induktivität_am_Unterspannungsseite
24				
25	Kabel_R	0.2568	Ohms/km	Kabel : Resistance_per_unit_length
26	Kabel_L	0.0020	H/km	Kabel : Inductance_per_unit_length
27	Kabel_C	8.6e-9	F/km	Kabel : Capacitance_per_unit_length
28				
29	Kabel_11	0.12	km	Kabel : Length
30	Kabel_12	0.12	km	Kabel : Length
31	Kabel_13	0.12	km	Kabel : Length
32	Kabel_21	0.12	km	Kabel : Length
33	Kabel_22	0.12	km	Kabel : Length
34	Kabel_23	0.12	km	Kabel : Length
35				
36	Ts	50.0e-6	s	Simulationszeitintervalle
37	Frequenz	50	Hz	Netzfrequenz
38	R_Stromquelle	10.0e3	Ohm	WE : Der_Widerstand_parallel_zu_Stromquelle
39				
40	Wohneinheiten			
41	WE_11	Symm	DEA1	L1
42	WE_12	Svmm	DEA1	L1

Abb. 3.3.-1: Die Excel-Datei, in der die Daten des Modells beschrieben werden.
(Die Modellparameter mit ihren Variablennamen, Werten, Einheiten und Beschreibungen)

Nach der Topologie der Siedlung bildet man das Modell und verwendet darin den Wohneinheit-Block statt jedem Haushalt. Da es verschiedene Verbrauchergruppen mit unterschiedlichem Verbrauchsverhalten gibt, ordnet man den Blöcken die entsprechende Last- bzw. Erzeugungsganglinien je nach dem gegebenen Daten der Siedlung zu.

In diesem Schritt werden folgende Informationen für jede Wohneinheit (WE) festgestellt.

1. Typ des Verbrauchers
2. Typ der DEA
3. Die Phase, an die die DEA angeschlossen ist

Abb. 3.3.-2 zeigt, wie man eine WE bzw. eine Messstelle in der Parameter-Datei beschreiben muss.

39				
40	Wohneinheiten			
41	WE_11	Symm	DEA1	L1
42	WE_12	Symm	DEA1	L1
43	WE_13	Symm	DEA1	L1
44				
45	WE_21	Symm	DEA1	L1
46	WE_22	Symm	DEA1	L1
47	WE_23	Symm	DEA1	L1
48				
49	Messstellen			
50	MS_OS_1	20000	3Ph	Netz
51	MS_OS_2	20000	3Ph	Trafo_OS
52	MS_US	400	3PhN	Trafo_US
53				
54	MS_US_11	400	3PhN	Stang1_WE1
55	MS_US_12	400	3PhN	Stang1_WE2
56	MS_US_13	400	3PhN	Stang1_WE3
57				
58	MS_US_21	400	3PhN	Stang2_WE1
59	MS_US_22	400	3PhN	Stang2_WE2
60	MS_US_23	400	3PhN	Stang2_WE3
61				

Abb. 3.3.-2: Die Excel-Datei, in der die Daten des Modells beschrieben werden
(Für die Wohneinheiten und Messstellen)

Die Typ-Dateien, die die Verläufe der Last- bzw. Erzeugungsganglinien beinhalten, müssen in Form von Excel-Dateien im gleichen Ordner liegen (Näheres siehe Kapitel 3.4.), damit das Programm sie einlesen kann. Man muss darauf achten, dass die verwendeten Namen für die

Wohneinheiten im Modell mit den Namen in der Parameter-Datei ident sein müssen. Außerdem müssen die Namen der Typen gleich der Namen der Typ-Dateien sein.

Es wurde ein Fenster (Abb. 3.3.-3) mit Hilfe von šguideõ (mit guide kann man grafische Benutzeroberflächen zusammenstellen) entwickelt, in das man die Modelldaten laden kann, und weiters kann nach der Kontrolle der Parameter der Benutzer die Ganglinien erzeugen, das Modell auswählen und letzten Endes die Simulation durchführen. Der Simulationsausgang (Verlauf der Ströme und Spannungen) und die ausgerechneten Kenndaten (wie U, I, P, Q, S) werden in Base-Workspace zu weiteren Untersuchungen eingelegt.

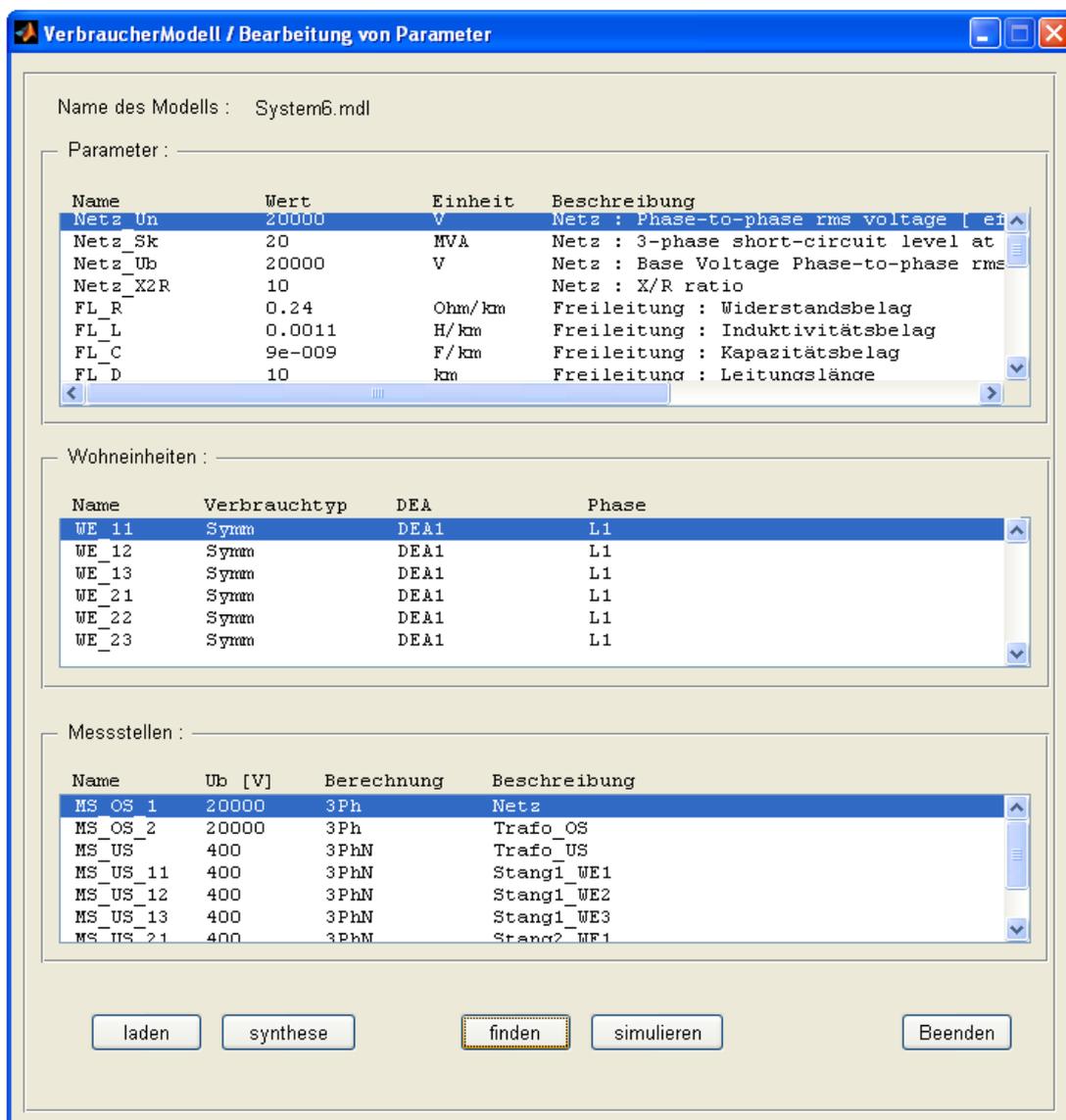


Abb. 3.3.-3: Das Fenster zum Laden und zur Simulation

3.4. Vorbereitung der Ganglinien

Die Wohneinheiten sind in diesem Model als rein ohmsche Verbraucher mit DEA, die nur Wirkleistung produzieren, nachgebildet (die Ganglinien der DEA werden ähnlich wie Lastgänge erzeugt). Den Leistungsverlauf von Haushaltsgeräten kann man in folgende Gruppen aufteilen.

1. Geräte mit sich periodisch wiederholendem Verlauf, wie der Kühlschrank
2. Geräte mit elektrischen Motoren, die Anlaufstrom haben
3. Geräte mit konstantem Leistungsverlauf, wie Beleuchtung
4. Geräte, die ein bestimmtes Arbeitsprogramm haben, wie die Waschmaschine

In Geräten, die einen elektrischen Motor haben, sind die Leistungsspitzen sehr viel größer als die Nennleistung. Der Grund dafür ist, dass die Motoren sehr hohe Anlaufströme brauchen. Zum Beispiel ein Kühlschrank mit 100 W Nennleistung hat beim Anlauf in der ersten Sekunde eine Leistung von etwa 1000 Watt. Diese Spitzen dauern in der Regel weniger als eine Sekunde und deshalb sind sogar die Messgenauigkeiten in Bereich von Minuten nicht ausreichend, um diese Leistungsspitzen zu berücksichtigen.

Die typischen Lastgänge von zwei Haushaltsgeräten sind beispielhaft in den Abbildungen 3.4.-1 und 3.4.-2 dargestellt. Die Wirkleistung wurde im Abstand von einer Minute gemessen.

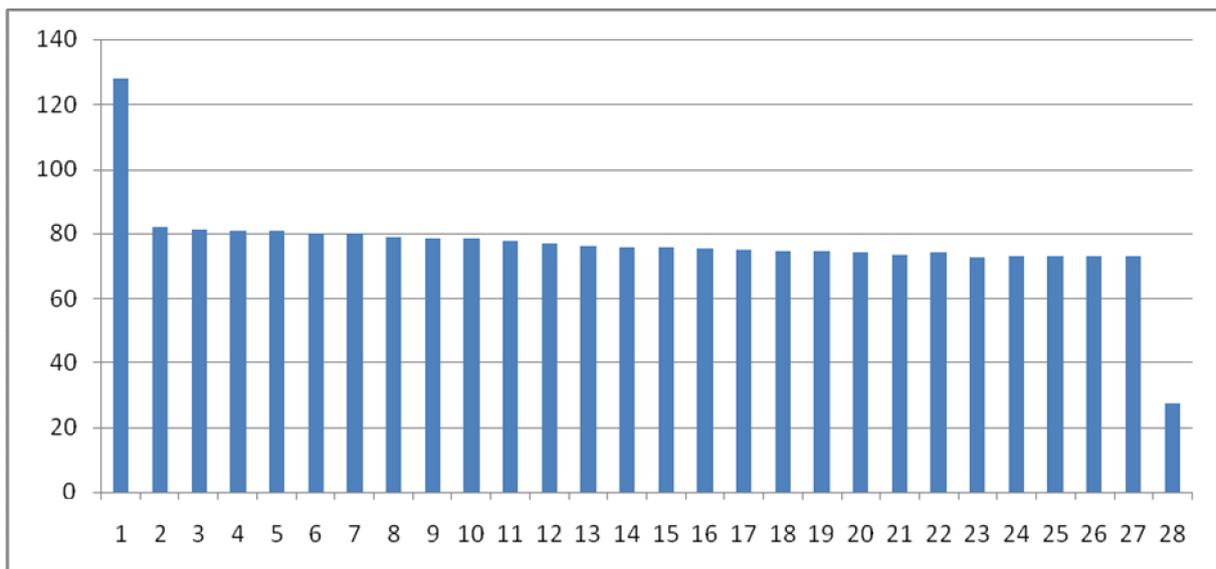


Abb.3.4.-1: Wirkleistungsverbrauch eines Kühlschranks (1 min Intervalle)

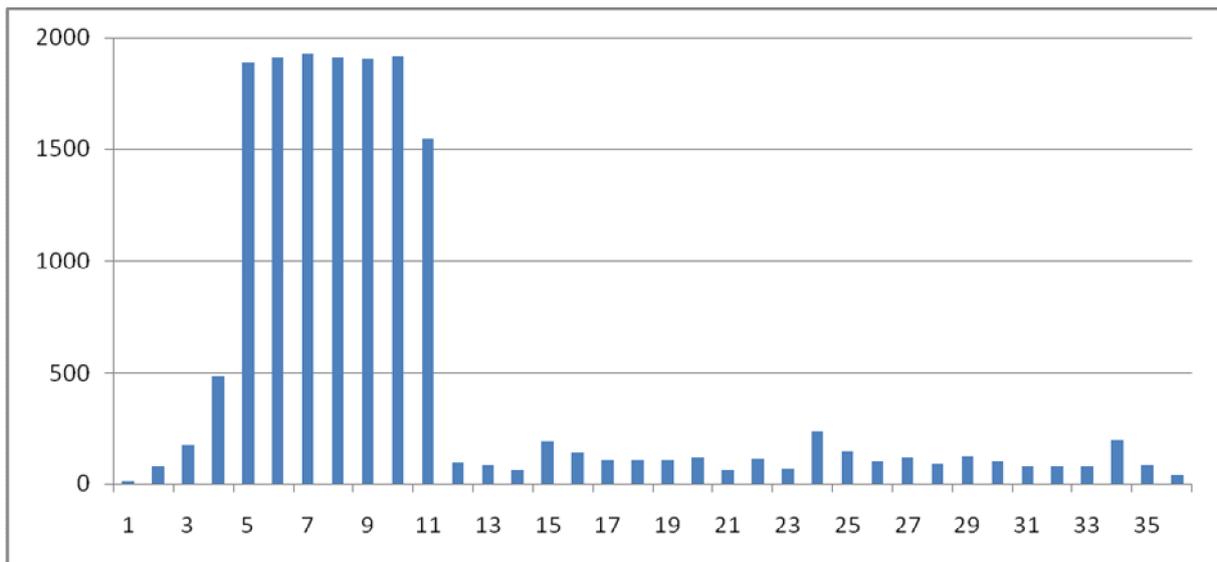


Abb. 3.4.-2: Wirkleistungsverbrauch einer Waschmaschine (1 min Intervalle)

Da im System die Ganglinien in 15 min Schritten verwendet werden, muss der Wirkleistungsverlauf der Geräte in 15-Minuten-Intervalle gemittelt werden. Die Mittelung der Messwerte reduziert die Genauigkeit der Simulation, aber um den Aufwand in Grenzen zu halten, muss zwischen der Genauigkeit der Angaben und dem Aufwand der Simulation ein Kompromiss gefunden werden.

Für jeden Haushalt wird der Verbrauch aller Geräte in einer Excel-Datei beschrieben und als Text-Datei gespeichert (Abb. 3.4.-3). Man kann auch die gemessene Daten Das Programm liest die Informationen aller Wohneinheitstypen ein, bildet die Lastgänge und legt sie in das Base-Workspace, damit das Simulationsmodell sie verwenden kann.

	A	B	C	D	E
1	VerbraucherModell				
2	WohneinheitTyp				
3					
4	Typ	gemessen			
5					
6	Gerät	Phase	Leistung	T1	dt
7					
8	E-Herd	L1	1000	18,00	0,75
9	Licht	L1	100	18,00	3,00
10					
11	Fernsehen	L2	120	20,15	2,00
12	Licht	L2	150	19,00	4,00
13					
14	Waschmaschine	L3	400	19,00	0,25
15	Waschmaschine	L3	200	19,25	0,25
16	Waschmaschine	L3	150	19,50	0,25
17	Waschmaschine	L3	300	19,75	0,25
18					

	A	B	C	D
1	VerbraucherModell			
2	DEATyp			
3				
4	Typ	DEA1		
5				
6	Gerät	Leistung	T1	dt
7				
8	Beispiel	500	0,25	0,25
9	Beispiel	550	0,50	0,25
10	Beispiel	520	0,75	0,25
11	Beispiel	400	1,00	0,25
12	Beispiel	350	1,25	0,25
13	Beispiel	300	1,50	0,25
14	Beispiel	320	1,75	0,25
15	Beispiel	250	2,00	0,25
16	Beispiel	300	2,25	0,25

Abb. 3.4.-3: Excel-Datei für die Typ-Daten (Links: Verbrauch, Rechts: DEA)

Natürlich ist es sinnvoller und realitätsnäher, dass die Ganglinien der Wohneinheiten mit gleichem Typen nicht exakt gleich sind. Die Anfangszeitpunkte und die Einsatzdauer der Verbraucher sollen mit gewisser Wahrscheinlichkeit vom gegebenen Erwartungswert abweichen. Die erzeugten Ganglinien müssen allerdings gespeichert werden, damit der Vergleich zwischen verschiedenen Simulationen möglich wird.

3.5. Simulation

Wenn das Modell, die Parameter und die Ganglinien vorbereitet sind, kann die Simulation beginnen. Die diskrete Simulationsmethode wurde ausgewählt, weil sie für die gewünschte Genauigkeit ausreichend ist (die kontinuierliche Simulation ist für die kurzen und sehr dynamischen Abläufe geeignet). Im Modell wurde als Simulationszeitschritt $50 \mu s$ ausgewählt, was aber je nach Bedarf geändert werden kann. Da die Periodendauer der Sinusschwingung (mit 50 Hz) 20 ms beträgt, wird eine Periode in 400 Simulationsschritte aufgeteilt. Wegen der Störungen, die nach jeder Amplitudenänderung des Stromes in der Spannung erscheinen, benötigt man zwei Perioden für einen Schritt auf der Leistungsganglinie, bis man messbare Signale bekommt.

Um einen ganzen Tag in 15-Minuten-Intervallen zu simulieren, braucht man 96 (4 x 24) Schritte in den Ganglinien. Die Gesamtsimulationszeit und Anzahl der Messwerte betragen

$$t_{Sim} = 24 h \cdot \frac{4 \text{ Werte}}{1 h} \cdot 2 \cdot 20 ms = 3,84 s$$

$$n_{Messwerte} = \frac{t_{Sim}}{d_{Sim}} = \frac{3,84 s}{50 \mu s} = 76800.$$

Mit dem Befehl `sim()` wird die Gesamtsimulationszeit t_{Sim} als Parameter an Simulink übergeben. Damit wird auch das gewünschte Workspace zum Lesen und Schreiben festgelegt. Im Folgenden wird gezeigt, wie man aus dem MATLAB-Programm die Simulation in Simulink starten und die Zeitdauer bestimmen kann.

```
Modell_name = evalin('base', 'Modell_name');
t_Sim = 3,84; % [s] ... Gesamtsimulationszeit
tic;
sim (Modell_name, t_Sim, simset('SrcWorkspace ', 'base',
                              'DstWorkspace ', 'base'));
Dauer_Sim = round(toc);
assignin('base', 'Dauer_Sim', Dauer_Sim);
```

Der Befehl `evalin()` liest den Wert einer Variablen aus einem Workspace. Mit dem Befehl `assignin()` kann man Variablen im Workspace (z.B. in Base-Workspace) schreiben. Mit Hilfe von `tic` und `toc` bestimmt man, wie lange die Ausführung eines bestimmten Programmteils dauerte.

Während der Simulation wird das Programm gestoppt und deshalb gibt es keine Möglichkeit die Variablen zu ändern. Wenn die Simulation beendet ist, werden alle gemessenen Signale in Scope in Form von strukturierten Variablen in den Workspace gelegt. Danach setzt sich das Programm fort und kann nun aus den Messungen die gewünschten Ergebnisse errechnen (Näheres dazu siehe Kapitel 3.6.). Abb. 3.5.-1 zeigt die Struktur der Daten für eine Messstelle.

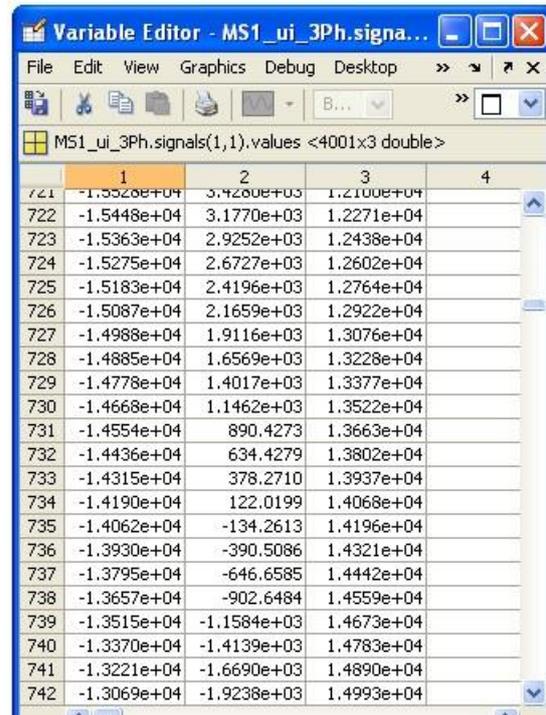
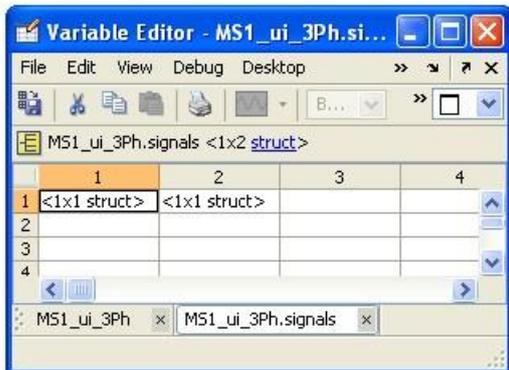
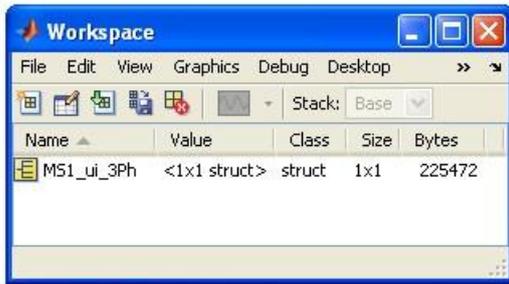


Abb. 3.5.-1: Die strukturierte Variable, die die Messdaten ins Workspace transportiert.

3.6. Berechnung der Kenngrößen

Im Prinzip kann man die Leistungen in einer Phase durch zwei verschiedene Wege berechnen.

1. Aus der Multiplikation von $u(t)$ und $i(t)$ wird die momentane Leistung berechnet. Daraus werden die Scheinleistung und Wirkleistung bestimmt und weiters die Blindleistung und der Leistungsfaktor berechnet.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \rightarrow S, P \rightarrow Q, \cos \varphi$$

2. Aus $u(t)$ und $i(t)$ werden die Effektivwerte von Strom und Spannung bestimmt, und aus ihrer Entfernung zu den Nulldurchgängen findet man die Phasenverschiebung. Danach werden Wirk-, Blind- und Scheinleistung mit der entsprechenden Formel berechnet.

$$u(t), i(t) \rightarrow U, I, \cos \varphi \rightarrow S, P, Q$$

Die Methode mit momentaner Leistung kann relativ leicht und mit geringem Rechenaufwand implementiert werden, da in MATLAB die Matrixberechnungen sehr praktisch und schnell durchgeführt werden. Diese Methode liefert die Ergebnisse am schnellsten, ist aber von der Genauigkeit her nicht die beste. In der vorliegenden Arbeit wurde die Methode mit momentaner Leistung angewendet, um den Zeitaufwand der Simulation in Grenzen zu halten.

Die Methode mit momentaner Leistung

Die zeitlichen Verläufe von Spannung und Strom werden durch cos Funktionen dargestellt.

$$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u)$$

$$i(t) = \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i)$$

Die momentane Leistung ermittelt man aus der Multiplikation von $u(t)$ und $i(t)$.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) \cdot \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i)$$

Durch die Verwendung des folgenden Satzes für die Multiplikation von cos Funktionen kann man eine übersichtlichere Form von $p(t)$ erhalten.

$$\cos x \cdot \cos y = \frac{1}{2} [\cos(x + y) + \cos(x - y)]$$

$$p(t) = \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) + \frac{1}{2} \hat{u} \hat{i} \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad \text{í} \quad \text{Phasenverschiebung}$$

Der erste Term in $p(t)$ ist eine reine Sinusschwingung und damit mittelwertfrei. Der zweite Term ist eine zeitunabhängige Konstante, die man als Wirkleistung bezeichnet. Aus dieser Überlegung folgt, dass die Wirkleistung gleich dem Mittelwert der $p(t)$ ist. Bei sinusförmigem Verlauf kann man den Mittelwert aus dem Maximum und Minimum von $p(t)$ berechnen.

$$P = \frac{1}{2}(p_{\max} + p_{\min}) \quad \text{í} \quad \text{Wirkleistung}$$

Für die Scheinleistung braucht man die Amplitude der mittelwertfreien $p(t)$. Um die Amplitude zu erhalten, muss man den Abstand zwischen dem Maximum und Minimum halbieren.

$$S = \frac{1}{2} \ddot{u} \ddot{i} = \frac{1}{2}(p_{\max} - p_{\min}) \quad \text{í} \quad \text{Scheinleistung}$$

Die Blindleistung und den Leistungsfaktor kann man jetzt aus P und S berechnen.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{í} \quad \text{Blindleistung}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{í} \quad \text{Leistungsfaktor}$$

Bei unsymmetrischer Last sind die Leistungen für jede Phase zu berechnen und dann zusammenzuaddieren.

$$S_{ges} = S_1 + S_2 + S_3$$

$$P_{ges} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Um die Effektivwerte von Spannung und Strom zu berechnen, ist bei sinusförmigen Signalen die Amplitude durch die Wurzel aus 2 zu dividieren.

$$U_{L1,N} = \frac{1}{\sqrt{2}} \ddot{u}_{L1,N} \quad , \quad I_{L1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \ddot{i}_{L1}$$

Vorbehandlung der Messsignale

Abb. 3.6.-1 zeigt die Spannungs- und Stromverläufe in drei Phasen für 2 verschiedene Stromamplituden bei symmetrischer Belastung. Die Zeitpunkte, in denen der Leistungswert sich ändert, sind 0,12 , 0,16 , 0,20. Man sieht, dass, bevor der Strom seine Amplitude ändert, alle Stromsignale abklingen und bei Null die Amplitudenänderung auftritt. Danach schwingen die Signale zu ihrem normalen Verlauf hin. Es ist auch zu sehen, dass genau mit dem Anfang

des Abklingvorganges die Schwingungen erzeugt werden. Um die Störungen im Messsignal zu vermeiden, wird der Signalbereich vor dem Beginn der Schwingungen für die Berechnungen genommen.

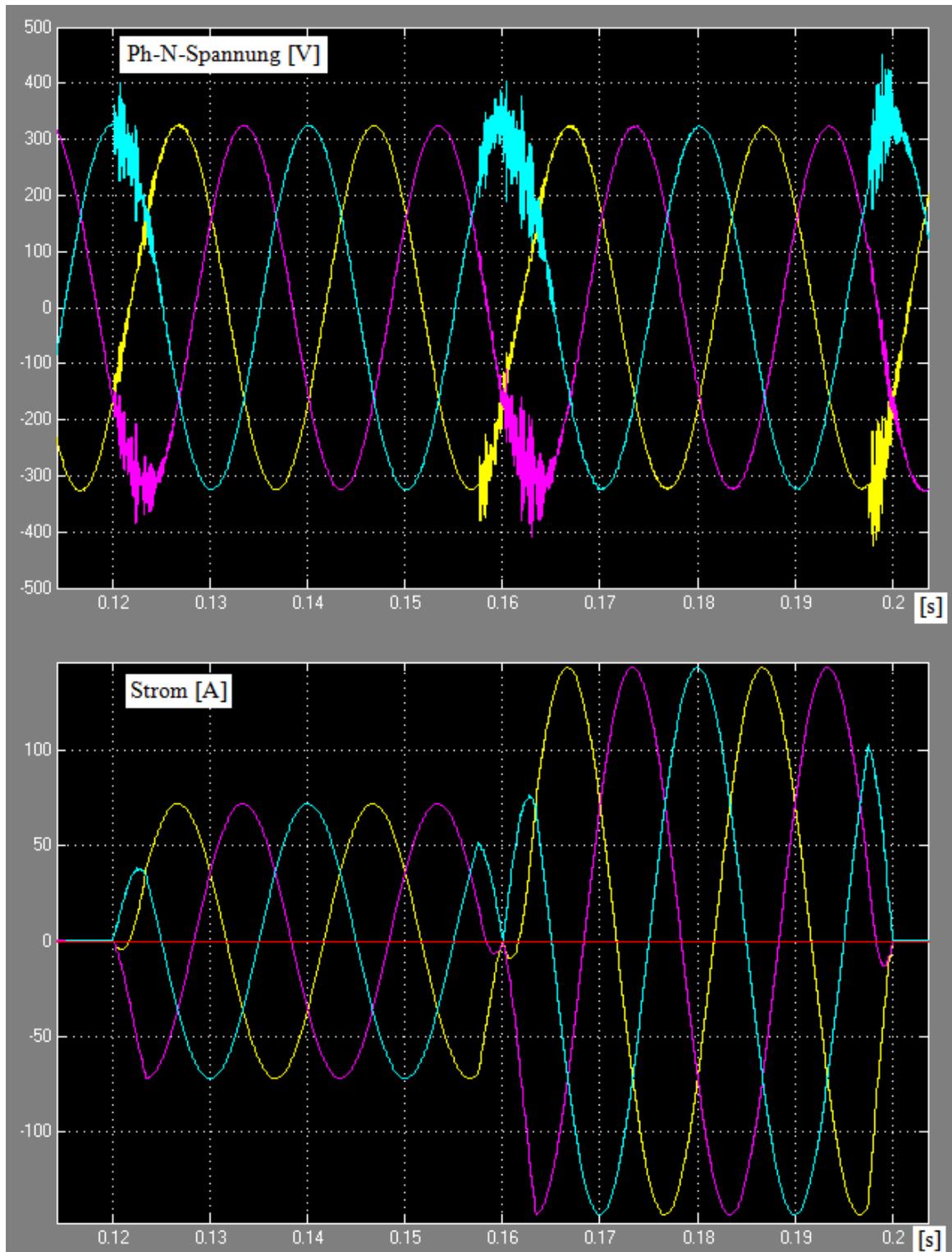


Abb. 3.6.-1: Messstelle $\check{M}S_{US}$ (direkt an der Unterspannungsseite des Transformators) bei symmetrischer Belastung. In oberem Bild: Phase-zu-Null Spannungen

Eine interessante Tatsache in Bezug auf diese Schwingungen sieht man in Abb. 3.6.-2. So lange das Stromsignal keinen sauberen Sinusverlauf hat, sind die Störungen unregelmäßig. Aber danach ändern sie sich zu Schwingungen um den ungestörten Spannungswert und klingen rasch ab.

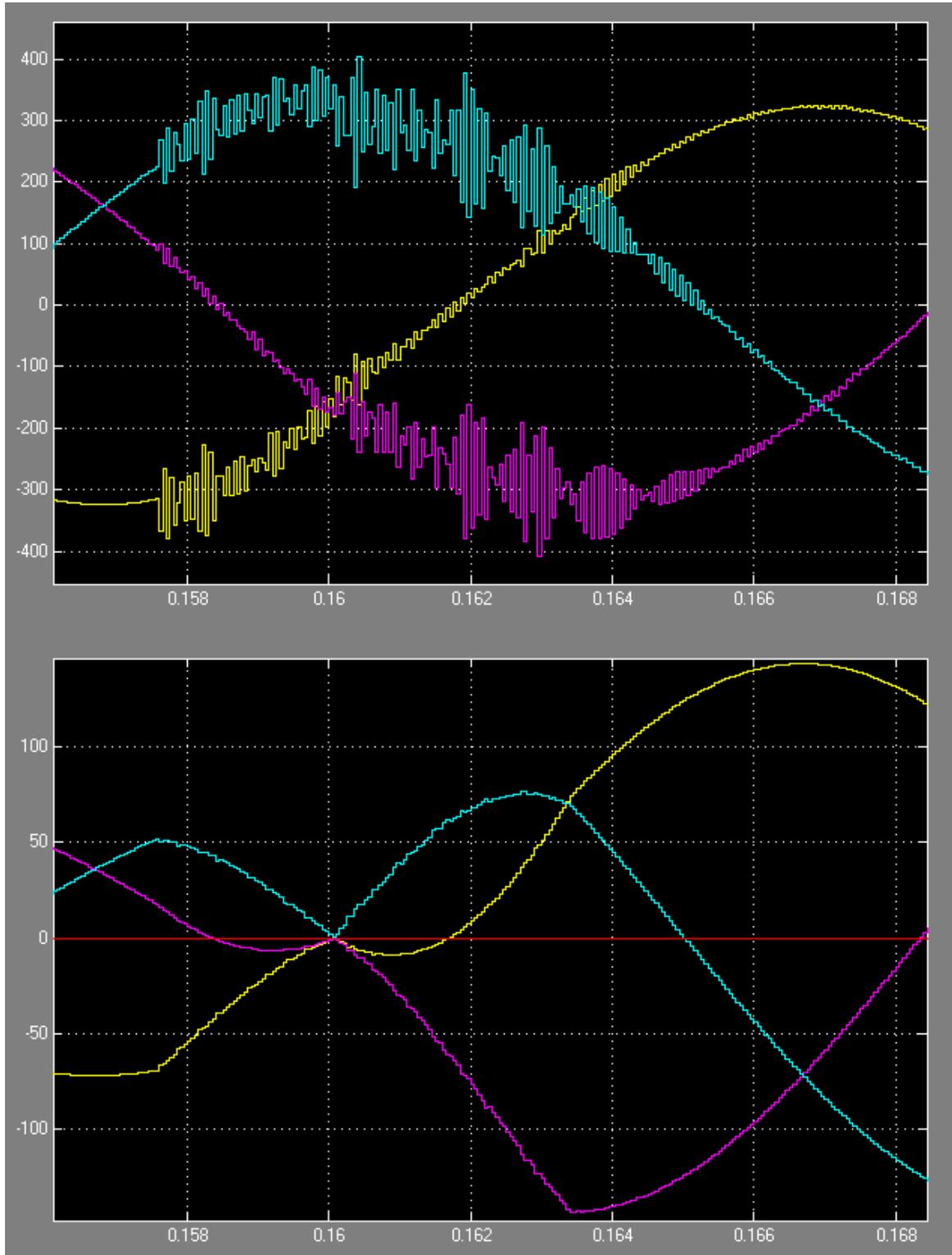


Abb. 3.6.-2: Genauere Ansicht der Spannungsschwingungen

Der folgende Programmteil schneidet 440 Messwerte vor dem Beginn der Störungen aus dem gesamten Messsignal. Der Vorgang wird für alle 96 Schritte der Ganglinie durchgeführt.

```
np      = 400; % 20ms / 50us
n_ab    = 50 ; % Abklingzeit
n_mess  = 440;

u1_ges = signals(1,1).values(:,1);

for i = 1:96

    n1 = i*(2*np) - n_ab - 3 - n_mess;
    n2 = n1 + n_mess;

    u1(1:n_mess) = u1_ges(n1+1:n2); % beste Abschnitt zur Berechnung

    % Das Programmteil zur Berechnung von Kenngrößen
    . . .
end
```

Der Programmteil zur Berechnung der Kenngrößen

Um die Effektivwerte und die Leistungen zu berechnen, ist immer wieder den Maximum das Sinussignales zu bestimmen. Abb. 3.6.-3 zeigt das Intervall rund um den Maximalwert in einem rein sinusförmigen Signal.

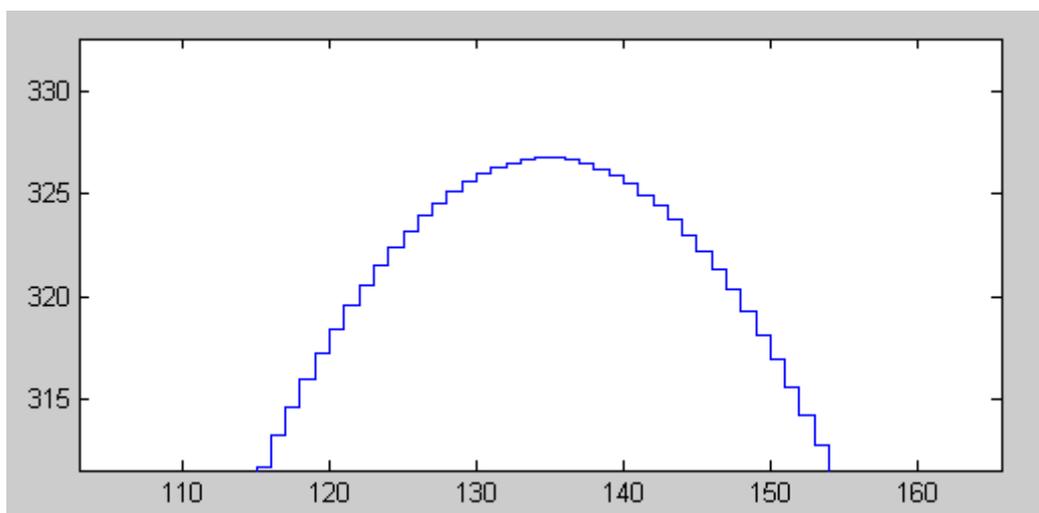


Abb. 3.6.-3: Der Verlauf eines störungsfreien sinusförmigen Signals rund um das Maximum.

Es gibt zwei Arten von Störungen, die in Form von Schwingungen auftreten.

1. Jene, die eine Periodendauer von zwei Simulationszeitschritten haben.

2. Jene, die eine Periodendauer von größer als zwei Simulationszeitschritten haben

Die Störungen der ersten Art kann man durch Mittelwertbildung aus den benachbarten Messwerten mit guter Genauigkeit wegfiltern. Dieser Vorgang ist mit geringem Rechenaufwand zu implementieren. Abb. 3.6.-4 zeigt ein Beispiel dieser Art von Störungen.

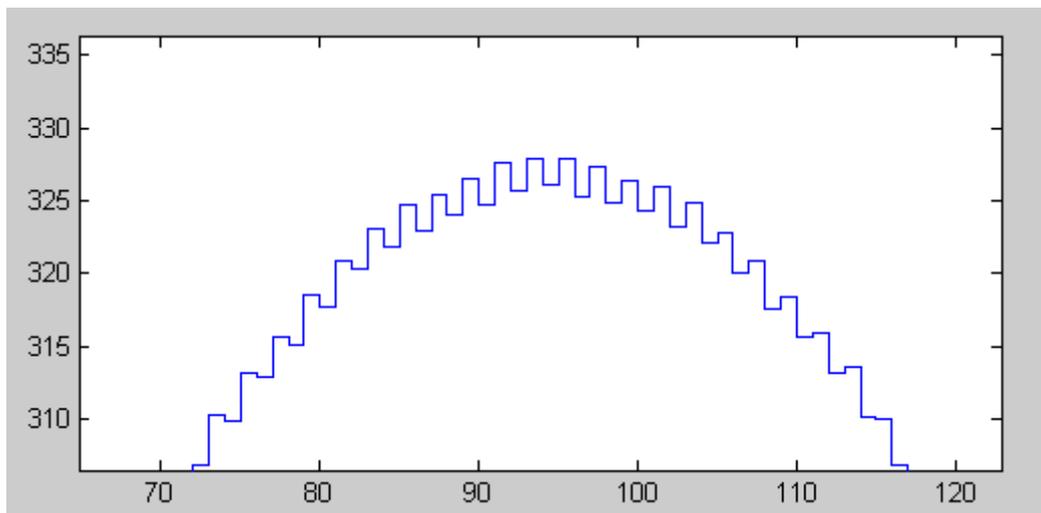


Abb. 3.6.-4: Die Störung mit der Periodendauer, die zwei Simulationszeitschritte dauert

Der Vorgang läuft so, dass zuerst der Betrag des Signals gebildet und das Maximum gefunden wird. Dann nimmt man einen Messwert von linker Seite des Maximums und einen von der rechten, und bildet den Mittelwert des Maximums mit jedem dieser Werte. Danach wird der Mittelwert der beiden Mittelwerte gebildet und als Maximalwert gespeichert. Der folgende Programmteil zeigt die Implementierung des beschriebenen Vorgangs in MATLAB zur Berechnung des Effektivwertes der Spannung.

```
u1 = abs(u1); % Betrag des Signals

% function: find_max
u1_max = max(u1);
u1_max_i = find(u1 == u1_max);
if u1_max_i < max(size(u1)) % die Länge von u1
    u1_max_r = u1(u1_max_i+1);
else
    u1_max_r = u1_max; % bei letztem Element
end
if u1_max_i > 1
    u1_max_l = u1(u1_max_i-1);
```

```

else
    u1_max_l = u1_max;           % bei erstem Element
end
u1_max_mit_r = (u1_max + u1_max_r)/2;
u1_max_mit_l = (u1_max + u1_max_l)/2;
u1_max_mit   = (u1_max_mit_r + u1_max_mit_l)/2;
U1 = u1_max_mit/sqrt(2);

```

Zur Berechnung der Leistung verwendet man einen Vorgang, ähnlich des vorher beschriebenen Vorgangs an $p(t)$, um das Maximum und Minimum von $p(t)$ zu bestimmen. Danach ermittelt man die gewünschten Kenngrößen mit Hilfe des folgenden Programmteiles.

```

p1 = u1 .* i1;
p1_max = find_max(p1);
p1_min = find_min(p1); % funktioniert wie find_max
% Mittelwertbildung wie bei den Spannungen
S1 = (p1_max - p1_min)/2;
P1 = (p1_max + p1_min)/2;
Q1 = sqrt(S1^2 - P1^2);
W1 = acos(P1/S1)*180/pi;

```

Weitere Schwierigkeiten bei der Messung

An der Oberspannungsseite des Transformators werden sehr starke Störungen durch die Freileitung erzeugt. Abb. 3.6.-5 zeigt die Stromverläufe und die merklichen Störungen in der Messstelle MS_OS_1, die eine Periodendauer von mehr als zwei Simulationszeitschritten haben. Die verwendete Methode zum Filtern der Schwingungen ist für Störungen dieser Art nicht geeignet.

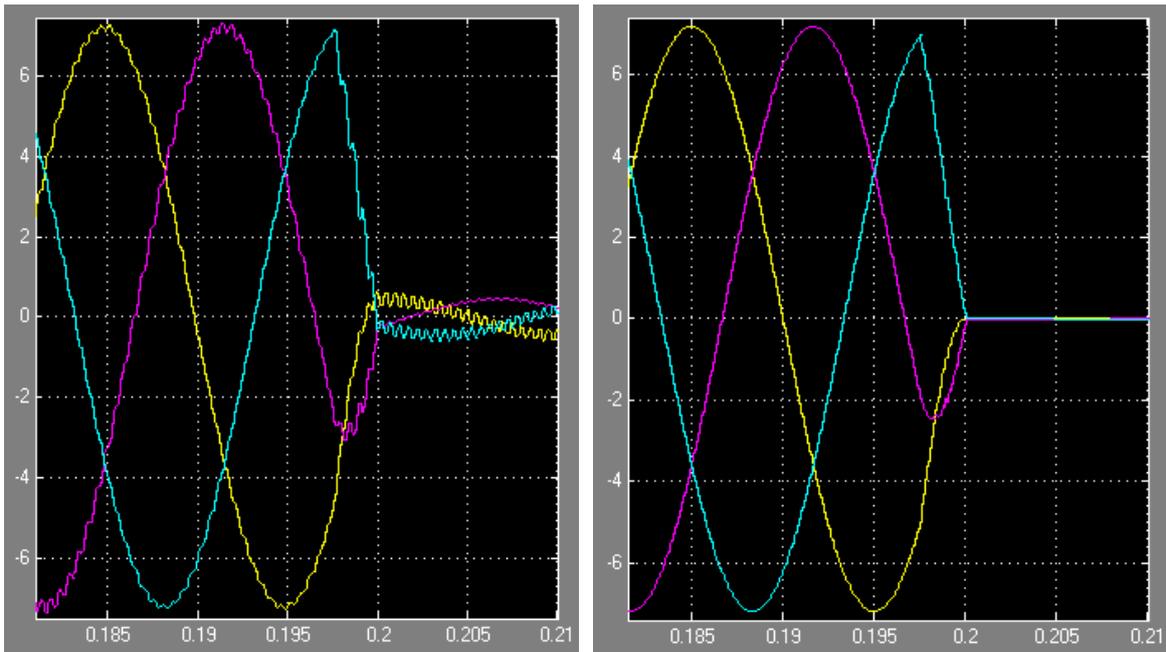


Abb. 3.6.-5: Die Stromverläufe in der Oberspannungsseite an beiden Seiten der Freileitung (links: MS_OS_1 , rechts: MS_OS_2)

Die Methode der Berechnung des Verschiebungswinkels

Diese Methode liefert zwar genauere Ergebnisse für die Blindleistung (weil die kleine Abweichung von $\cos \varphi$ einen großen Einfluss in der Blindleistung hat), ist aber sehr zeitaufwändig. Um den Nulldurchgang zu bestimmen, wird der Betrag des Signals gebildet und dessen Minimum bestimmt (Damit findet man die Position des Nulldurchganges). Es werden die zwei Werte um den Nulldurchgang gefunden und aus ihrer Entfernung zueinander der Verschiebungswinkel bestimmt. Wenn es auf die Genauigkeit der Ergebnisse ankommt, lassen sich die Nulldurchgänge durch die Interpolation der Messwerte um die Null, sogar bis zu einer Größenordnung genauer bestimmen.

Das Standard-Modul in SimPowerSystems zur Berechnung der Leistungen

In der Powerlib Bibliothek gibt es bereits ein Modul zur Berechnung der Wirk- und Blindleistung aus Spannungs- und Stromverläufen. Es heißt 'Discrete Active & Reactive Power'. Die Verwendung dieses Moduls im Messknoten hat drei Nachteile. Erstens ist es sehr komplex aufgebaut, und das macht das Simulink- Berechnungsmodell sehr langsam. Zweitens, wie alle anderen Komponenten von Simulink, arbeitet das Modul die ganze Zeit, was eigentlich unnötig ist. Drittens braucht das Modul die Spannungs- und Stromamplituden, und dafür muss das Fenster (für Berechnung der Effektivwerte) die Länge einer Periode

haben. Abb. 3.5.-6 zeigt das Modul zur Berechnung von Spannungs- und Stromamplituden, sowie der Wirk- und Blindleistung.



Abb. 3.6.-6: Das Modul der Powerlib Bibliothek zur Berechnung von Amplituden und Leistungen

4. Simulation

Spannungsabfall

Um die Spannungsabfälle entlang des Kabels zu demonstrieren, sind für alle Wohneinheiten gleiche symmetrische Lasten von 4kW eingestellt. Nach der Simulation sind die Spannungseffektivwerte für die Phase L1 auf 230V Bezugsspannung bezogen und in Prozent dargestellt (Abb. 4.-1).

In folgender Liste werden die Messstellen beschrieben.

1. MS_OS_1 Oberspannungsseite (zwischen Netzeinspeisung und Freileitung)
2. MS_OS_2 Oberspannungsseite (zwischen Freileitung und Trafo)
3. MS_US Unterspannungsseite (genau nach dem Transformator)
4. MS_US_11 Strang 1, WE 1
5. MS_US_12 Strang 1, WE 2
6. MS_US_13 Strang 1, WE 3
7. MS_US_21 Strang 2, WE 1
8. MS_US_22 Strang 2, WE 2
9. MS_US_23 Strang 2, WE 3

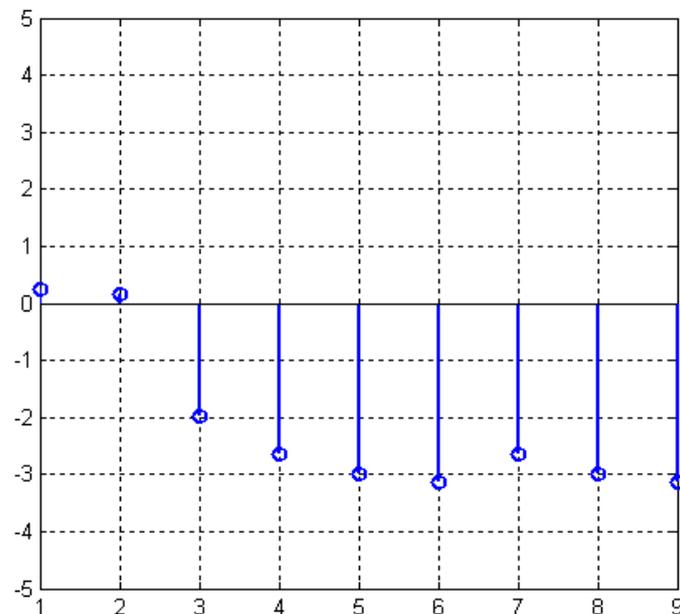


Abb. 4.-1: Spannungsabfall in Messstellen in Prozent bzgl. Bezugsspannungen
(Nr. 1 und 2 sind wegen größeren Störungen nicht richtig)

Unsymmetrische Belastung wegen DEA

Um einen unsymmetrischen Fall zu demonstrieren, sind in der Wohneinheit zusätzlich zu drei symmetrischen Lasten in drei Phasen, noch eine Einspeisung in der Phase L1 berücksichtigt. Hier haben alle Wohneinheiten gleiche Last von 2kW und 500W Einspeisung an Phase L1.

Die Ströme durch den Transformator sind in Abb. 4.-2 dargestellt.

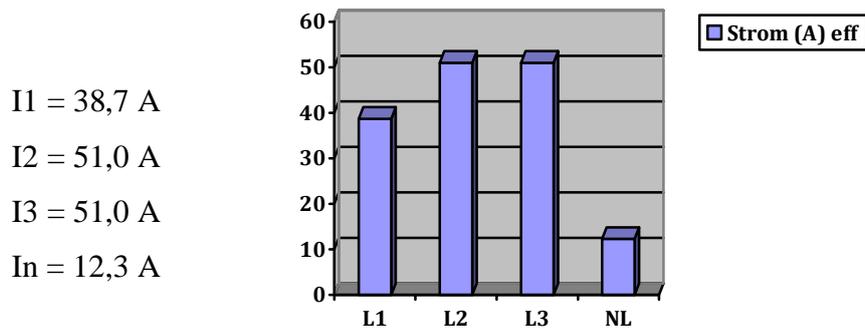


Abb. 4.-2: Der Effektivwert der Ströme am Unterspannungsseite der Trafo (MS_US)

Die Leistungen an der Messstelle MS_US sind: ($\cos \phi = 1$)

$$S1 = 8,89 \text{ kVA}, S2 = 11,7 \text{ kVA}, S3 = 11,7 \text{ kVA}, S = 32,3 \text{ kVA}$$

Man sieht, dass in diesem Fall die Phase L1 entlastet wird und der Nullleiter wird stattdessen belastet. Wenn man die Einspeisungen gleich zwischen Wohneinheiten verteilt (Abb. 4.-3), beträgt der Strom in drei Phasen 46,9 A und es fließt kein Strom durch den Nullleiter mehr.

Wohneinheiten :			
Name	Verbrauchtyp	DEA	Phase
WE_11	Sym	DEA1	L1
WE_12	Sym	DEA1	L2
WE_13	Sym	DEA1	L3
WE_21	Sym	DEA1	L1
WE_22	Sym	DEA1	L2
WE_23	Sym	DEA1	L3

Abb. 4.-3: gleichmäßige Aufteilung der Einspeisungen in drei Phasen

Die Leistungen an der Messstelle MS_US sind: ($\cos \phi = 1$, ϕ ist etwa 1 Grad)

$$S1 = 10,8 \text{ kVA}, S2 = 10,8 \text{ kVA}, S3 = 10,8 \text{ kVA}, S = 32,3 \text{ kVA}$$

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die neuen technologischen Entwicklungen im Bereich dezentraler Erzeugungsanlagen (DEA) werden diese Anlagen vermehrt im Niederspannungsnetz eingesetzt und damit verändern sich die elektrischen Verhältnisse in dieser Spannungsebene. Aus diesem Grund sollen die durch Einsatz der DEA entstandenen Auswirkungen mit Hilfe genauerer Modellierung der Wohneinheiten untersucht werden.

Nach der Untersuchung der Möglichkeiten zur Nutzung von SimPowerSystems (Toolbox von MATLAB/Simulink) zur Modellierung der Verbraucher und Erzeuger, wurde zuerst ein Modell für einen steuerbaren Verbraucher bzw. Erzeuger in Hinsicht auf die aufgenommene bzw. abgegebene Leistung erstellt. Daraus ist ein Modell für eine Wohneinheit zusammengestellt, in dem drei einphasige Verbraucher und ein einphasiger Erzeuger eingesetzt sind. Zum Berechnen der Kenngrößen wie U, I, S, P, Q usw. wurde ein Modul entwickelt, das die Spannungs- und Stromverläufe messen, aufnehmen und in MATLAB übertragen kann. Weiters ist ein Beispielnetz mit Wohneinheiten in der Niederspannungsebene zusammengebaut, um die Simulation durchführen zu können.

Um den Aufwand der Vorbereitung der Daten und die Berechnung der Kenngrößen zu reduzieren, wurde ein Simulationssystem entwickelt. Durch Auswahl eines modularen Aufbaus wurde eine klare Aufteilung der Aufgaben und ein übersichtlicher Ablauf des Simulationsvorganges ermöglicht. Weiters erleichtert dieses Konzept die Weiterentwicklung der Module und Erweiterungen des Systems erheblich. Die Datenverarbeitung ist in Excel durchzuführen, in dem normalerweise sich auch die Datenbanken befinden. Durch geeignete Verbindungen zwischen MATLAB, Simulink und Excel ist es möglich geworden, die Vorteile jeder dieser Software zu nutzen. Es wurde auch eine grafische Benutzeroberfläche entworfen, mit deren Hilfe der Benutzer die wichtigsten Parameter des Systems kontrollieren und die Simulationsschritte durchführen kann. Zur Darstellung der Funktionsweise werden eine symmetrische und eine unsymmetrische Belastung simuliert.

Es hat sich gezeigt, dass es optimaler ist, nur die durch Untersuchungen herausgefundenen kritischen Zustände des Netzes zu simulieren, und genauere Ergebnisse mit getrennten Simulationen zu erzielen.

Verwendete Formelzeichen

c	Sicherheitsfaktor
d_{Sim}	Simulationszeitschritt
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
\hat{i}	Amplitude des Stromes
$i(t)$	Stromverlauf
I_{L1}	Effektivwert des Stromes einer Phase
I_k''	Anfangskurzschlussstrom
k	Stromkennzahl
$n_{Messwerte}$	Anzahl der Messwerte
P_{2i}	Umwandlungsfaktor (Leistung zu Strom)
$p(t)$	momentane Leistung
P	Wirkleistung
p_{max}	Maximumwert der momentanen Leistung
p_{min}	Maximumwert der momentanen Leistung
P_{elek}	elektrische Leistung
P_{thrm}	thermische Leistung
Q	Blindleistung
S	Scheinleistung
$S_{K,VP}''$	Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt
S_k''	Kurzschlussleistung
S_B	Bezugsleistung für alle Spannungsebenen
t_{Sim}	Gesamtsimulationszeit

\hat{u}	Amplitude der Spannung
$u(t)$	Stromverlauf
$U_{L1,N}$	Effektivwert der Phasenspannung zu Nulleiter
U_{VP}	Nennspannung am Verknüpfungspunkt
U_N	Nennspannung
$U_{B,OS}$	Bezugsspannung für die Oberspannungsebene
\underline{Z}_{VP}	Netzersatzimpedanz am Verknüpfungspunkt
\underline{Z}_{MS}	Ersatzimpedanz des Mittelspannungsnetzes
\underline{Z}_{Trafo}	Ersatzimpedanz des Transformators
\underline{Z}_{Trafo}	Ersatzimpedanz der Leitung
Z_k	Kurzschlussimpedanz
$Z_{B,OS}$	Bezugsimpedanz für die Oberspannungsebene
$Z_{Netz,pu}$	Netzimpedanz in pu
φ	Phasenverschiebung
φ_u	Nullphasenwinkel der Spannung
φ_i	Nullphasenwinkel des Stromes

Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmotor
DEA	Dezentrale Erzeugungsanlagen
KWK-Anlagen	Kraftwärmekoppelung -Anlagen
WE	Wohneinheit

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.2.-1:	Spannungsabfall entlang des Kabels	7
Abb. 1.2.-2:	Schematische Darstellung Anschlussspannung bei Schwach- und Höchstlast, mit Optimierung der Nutzung des Spannungsbandes	8
Abb. 1.2.-3 :	Zulässiger Bereich der Versorgungsspannung ohne dezentrale Einspeisung [4]	9
Abb. 1.4.-1:	Prinzipielle Abhängigkeit der Netzurückwirkungen von dezentralen Erzeugungsanlagen von der Kurzschlussleistung und der Anlagenleistung [4]	13
Abb. 1.4.-2:	Leistungsumkehr und Spannungsanhebung durch Längstspannungsabfall im Zuleitungskabel	14
Abb. 1.4.-3:	Zulässige Bereiche der Versorgungsspannung mit dezentraler Einspeisung [4]	14
Abb. 1.5.-1:	Tageslastganglinien an einem Montag im Winter.[6] 1 110/10-kV-Umspannstation, 60% Sondervertragskunden 2 10/0,4-kV-Netzstation, 10% Gewerbekunden, 3 Vollelektrifiziertes Vierfamilienhaus	17
Abb. 1.7.-1:	Die Bibliothek für die Komponenten des SimPowerSystems	19
Abb. 2.1.-1:	Modellierung der Netztopologie bei niedriger Bebauungsdichte. [4]	21
Abb. 2.1.-2:	Ersatzschaltbild eines Niederspannungsnetzes mit den wichtigsten Komponenten	22
Abb. 2.2.-1:	Blockschaltbild und Parameter der Netzeinspeisung in SimPowerSystems	24
Abb. 2.3.-1:	Blockschaltbild, Parameter und die Übergabe von Signalen bei dreiphasiger Messung.	25
Abb. 2.3.-2:	Blockschaltbild, Anzeigefenster und die Parameter von Scope	26
Abb. 2.3.-3:	Blockschaltbild der Messstellen im Vierleitersystem und der Aufbau der Messeinrichtung	27
Abb.2.3.-4:	Anordnung zum Testen der Messstelle	28
Abb. 2.3.-5:	Der Aufbau des Wattmeters	28
Abb. 2.4.-1:	Die Schaltung zur Demonstration der Funktionsweise der Stromquelle	30

Abb. 2.4.-2:	Die Spannungsstörungen, die aus der Änderung der Stromamplitude	31
	entstehen.	
	links: $R_p = 100 \text{ k}\Omega$, es fließen 2 mA durch R_p (0,2 % Fehler im Strom)	
	Die Schwingung dauert mehr als eine Periode.	
	rechts: $R_p = 10 \text{ k}\Omega$, es fließen 20 mA durch R_p (2 % Fehler im Strom)	
	Die Schwingung dauert weniger als ein Viertel einer Periode.	
Abb. 2.4.-3:	Nähere Betrachtung des Schwingungsverlaufs	32
	links: Am Anfang springt die Spannung auf fast den doppelten Wert.	
	rechts: Keine Schwingung, obwohl die Stromschritte die gleichen sind.	
Abb. 2.5.-1:	Das Modell für einer einphasige Last	33
Abb. 2.5.-2:	Die Erzeugung des momentanen Stromwertes aus dem	33
	Wirkleistungsverlauf	
Abb. 2.5.-3:	Drei Sinussignale für die Wohneinheiten	34
Abb. 2.5.-4:	Die Schrittsprünge bei nicht behandelten Sinussignalen	34
Abb. 2.5.-5:	Die Gewichtungsfunktion mit rampenförmigem Verlauf	35
Abb. 2.5.-6:	Die drei Sinussignale nach Multiplikation mit der Gewichtungsfunktion . . .	35
Abb. 2.5.-7:	Die Schrittsprünge bei einer Rampenlänge von 67 Zeitschritten	36
Abb. 2.5.-8:	Der Schalter in WE zum Anschließen der DEA an eine der drei Phasen	36
Abb. 2.5.-9:	Das Gesamtmodell für eine Wohneinheit	37
Abb. 2.6.-1:	Das Block und der Aufbau des Kabelmodells	38
Abb. 2.6.-2:	Das Ersatzschaltbild der π Section Line \bar{o} [MATLAB-Help]	38
Abb. 2.6.-3:	Das Fenster (in SimPowerSystems) für Parametrierung des Kabelmoduls . . .	39
Abb. 2.6.-4:	Das Modul und das Ersatzschaltbild der Transformator [MATLAB-Help] . . .	39
Abb. 2.6.-5:	Die zwei Fenster (in SimPowerSystems) für Parametrierung des	40
	Transformatormoduls	
Abb. 3.1.-1:	Die Zugriffsmöglichkeiten zwischen den Umgebungen	41
Abb. 3.2.-1:	Das Gesamtmodell mit den Komponenten von SimPowerSystems	43
	mit 6 Wohneinheiten	
Abb. 3.3.-1:	Die Excel-Datei, in der die Daten des Modells beschrieben werden	45
	(Die Modellparameter mit ihren Variablennamen, Werten, Einheiten und	
	Beschreibungen)	
Abb. 3.3.-2:	Die Excel-Datei, in der die Daten des Modells beschrieben werden	46
	(Für die Wohneinheiten und Messstellen.)	

Abb. 3.3.-3:	Das Fenster zum Laden und zur Simulation	47
Abb.3.4.-1:	Wirkleistungsverbrauch eines Kühlschranks (1 min Intervalle)	48
Abb. 3.4.-2:	Wirkleistungsverbrauch einer Waschmaschine (1 min Intervalle)	49
Abb. 3.4.-3:	Excel-Datei für die Typ-Daten (Links: Verbrauch, Rechts: DEA)	49
Abb. 3.5.-1:	Die strukturierte Variable, die die Messdaten ins Workspace transportiert . .	51
Abb. 3.6.-1:	Messstelle $\check{S}MS_US$ ÷(direkt an der Unterspannungsseite des	54
	Transformators) bei symmetrischer Belastung. In oberem Bild: Phase-zu-Null Spannungen	
Abb. 3.6.-2:	Genauere Ansicht der Spannungsschwingungen	55
Abb. 3.6.-3:	Der Verlauf eines störungsfreien sinusförmigen Signals rund um	56
	das Maximum	
Abb. 3.6.-4:	Die Störung mit der Periodendauer, die zwei Simulationszeitschritte dauert .	57
Abb. 3.6.-5:	Die Stromverläufe in der Oberspannungsseite an beiden Seiten	58
	der Freileitung (links: MS_OS_1 , rechts: MS_OS_2)	
Abb. 3.6.-6:	Das Modul der Powerlib Bibliothek zur Berechnung von Amplituden	59
	und Leistungen	
Abb. 4.-1:	Spannungsabfall in Messstellen in Prozent bzgl. Bezugsspannungen	60
	(Nr. 1 und 2 sind wegen größeren Störungen nicht richtig)	
Abb. 4.-2:	Der Effektivwert der Ströme am Unterspannungsseite der Trafo (MS_US) . .	61
Abb. 4.-3:	gleichmäßige Aufteilung der Einspeisungen in drei Phasen	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.3.-1 Kennwerte von KWK-Kleinanlagen zur Hausenergieversorgung11
(Hersteller-angaben bzw. voraussichtliche Kennwerte bis 2005
([38-54] aus Literatur von [4]) (PFMFC steht für Polymer Electrolyte
Membran Fuel Cell ó Polymerelektrolytmembran Brennstoffzelle.
SOFC steht für Solid Oxide Fuel Cell ó Festoxid (oxidkeramische)
Brennstoffzelle) [4])

Literaturverzeichnis

- [1] Brauner, Günther:
Vorlesungsskriptum, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien
Energieversorgung
- [2] Brauner, Günther:
Vorlesungsskriptum, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien
Energieübertragung und Kraftwerke
- [3] Brauner, Günther:
In: e&i (Elektrotechnik und Informationstechnik) Heft 3.2009, S. 78 -81
Perspektiven der dezentralen Energieversorgung.
- [4] Pöpl, Georg:
Dissertation (2004), TU Wien.
Planung und Optimierung von Niederspannungsnetzen bei dezentraler Stromerzeugung.
- [5] Einfalt A., Tiefgraber D., Haidvogel H., Czermak K.:
In: e&i (Elektrotechnik und Informationstechnik) Heft 3.2009, S. 105 -109
Netzintegration von Mikro-KWK-Anlagen.
- [6] Hosemann G.:
Hütte, 29. Auflage, Springer-Verlag 1988
Elektrische Energietechnik, Band 3 Netze
- [7] Oeding, Dietrich, Oswald, Bernd R.:
6. Auflage, Springer-Verlag 2004
Elektrische Kraftwerke und Netze