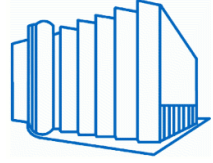




**PROFESSUR FÜR ELEKTRISCHE
ENERGIEVERSORGUNGSNETZE**

Extraordinarius: Prof. Dr.-Ing. R. Witzmann



Bachelorarbeit

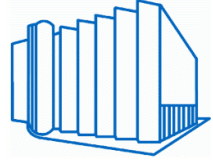
Hardwarenachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators

Sittenberger Timo



**PROFESSUR FÜR ELEKTRISCHE
ENERGIEVERSORGUNGSNETZE**

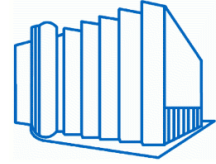
Extraordinarius: Prof. Dr.-Ing. R. Witzmann



Bachelorarbeit

Hardwarenachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators

Betreuer:	Lindner Marco
Eingereicht am:	08. Mai 2017
Verfasser:	Sittenberger Timo
Geburtsdatum, Geburtsort:	11.05.1994, Dillingen a.d. Donau
Wohnort:	München
Matrikelnummer:	03648770



Aufgabenstellung

Die Spannungshaltung im Verteilnetz ist die zentrale, technische Herausforderung bei der Integration von dezentralen, erneuerbaren Energien wie Photovoltaik, Onshore-Wind, und Biogas. Bisher wurden die auftretenden Spannungsprobleme häufig nur über teuren konventionellen Netzausbau gelöst. Erste Studien über die dezentrale Bereitstellung von Blindleistung sowie regelbare Ortsnetztransformatoren („rONTs“) haben gezeigt, dass es wirkungsvolle und wirtschaftliche Alternativen zum Netzausbau gibt. Im Forschungsprojekt U-Control sollen erstmals mit Hilfe von Simulationen, Labortests und Feldversuchen detailliert und umfassend zugehörige Forschungsfragen untersucht werden. Das dafür notwendige Labor an der Professur für elektrische Energieversorgungsnetze ist bis auf die Hardwarenachbildung eines rONT vollständig.

Zur Realisierung dieser Nachbildung steht eine voll programmierbare 45kVA AC-Quelle vom Typ MX45-3PI zur Verfügung. Diese rückspeisefähige Quelle kann Ihre Ausgangsspannung in Höhe und Form beliebig einstellen und somit alle in der Realität auftretenden Netzsituationen abbilden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Programm zur Steuerung der AC-Quelle in MATLAB auf einer bereits vorhandenen Grundlage entwickelt, im Labor getestet und anhand von einschlägigen Simulationstools und Messdaten eines realen rONT der Firma MR validiert werden.

Konkret sollen folgende Punkte bearbeitet werden:

- Literaturrecherche und Einarbeitung in die Thematik “rONT”
- Einarbeitung in die Laborumgebung an der Professur für elektrische Energieversorgungsnetze
- Implementierung einer Steuerung für die vorhandene AC-Quelle der Firma California Instruments in MATLAB
- Realisieren der Hardware-Nachbildung eines rONT verschiedener Leistungsklassen inklusive vollumfänglicher Parametrierungsmöglichkeiten
- Implementierung aller bekannten Regelungscharakteristika (Totzeit, Schnellrückschaltung, Lastabhängige Sollwertanpassung)
- Validieren der Hardware-Nachbildung gegen ein vorhandenes EMT-Softwaremodell in Simulink
- Validieren der Hardware-Nachbildung gegen reale Messdaten eines rONTs der Firma MR

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

München, 08. Mai 2017

Sittenberger Timo

Abstraktum

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Nachbildung des Verhaltens eines realen regelbaren Ortsnetztransformators. Zu diesem Zweck wurde eine MATLAB[®]-Applikation mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt. Zusammen mit einer voll programmierbaren, dreiphasigen Spannungsquelle im Labor der Professur für elektrische Energieversorgungsnetze an der Technischen Universität München beeinflusst die Nachbildung die Ausgangsspannung der Quelle entsprechend der eines realen Ortsnetztransformators. Die implementierte Regelung passt den Spannungswert dabei anhand vieler einstellbarer Parameter an. Die Nachbildung wurde anschließend anhand von Messdaten eines realen rONT validiert und mit den Ergebnissen eines bereits vorhandenen EMT-Softwaremodells in Simulink[®] verglichen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
1. Spannungshaltung im Verteilnetz	1
2. Grundlagen des regelbaren Ortsnetztransformators	3
3. Hard-/Software-nachbildung im Labor	9
3.1. Laboraufbau und Geräte	9
3.2. Programmerstellung in MATLAB®	16
3.2.1. MATLAB® AppDesigner	16
3.2.2. Grafische Benutzeroberfläche	17
3.2.3. Wichtige Funktionen	24
Initialisieren der Simulation	24
Stufenschaltung	26
3.2.4. Implementierte Regelalgorithmen	30
Schnellschaltung	31
Totzeit	31
Totzeit und Schnellschaltung	31
Lastabhängige Sollwertanpassung	31
Manuelle Stufung	35
4. Validierung der Hardware-nachbildung anhand realer Messdaten	37
4.1. Messdaten	37
4.2. Verifizierung der Nachbildung	38
5. Validierung und Anpassung des vorhandenen Simulink®-Modells	45
6. Fazit und Ausblick	48
Literaturverzeichnis	49

A. Anhang	50
A.1. MATLAB [®] -App auf CD	51

Abbildungsverzeichnis

2.1. Widerstandsschnellschalter nach Jansen	3
2.2. Vakuum-Schalteinheit ECOTAP VPD	4
2.3. Nutzbares Spannungsband bei Einsatz eines ONT	5
2.4. Zusätzlich nutzbares Spannungsband durch rONT	6
2.5. Konventionelles Spannungsband	6
2.6. Spannungsband bei punktuelltem rONT-Einsatz	7
2.7. Spannungsband bei flächendeckendem rONT-Einsatz	7
2.8. Verzögerungszeiten bei der rONT-Stufung	8
2.9. ECOTAP VPD von MR	8
3.1. Prinzipskizze des Laboraufbaus	10
3.2. Labornetz mit externer Sense-Leitung und PAC4200	11
3.3. Schalttafel der Netznachbildung	12
3.4. Netznachbildungen der Stränge nach Q1 und Q13	12
3.5. Wechselrichter im Netzlabor	13
3.6. DC-Quellen im Netzlabor	13
3.7. DEWETRON DEWE-800 Messgerät	14
3.8. SIEMENS [®] SENTRON [®] PAC4200	15
3.9. Benutzeroberfläche rONT-Simulation	17
3.10. GUI-Detailansicht: Transformator und Laststufenschalter	18
3.11. GUI-Detailansicht: Regelungsparameter	19
3.12. Drop-Down-Menüs der rONT-Regelung	19
3.13. GUI-Detailansicht: Messwerte-Panel	19
3.14. GUI-Detailansicht: Spannungsprofil	20
3.15. Einstellmöglichkeiten der lastabhängigen Sollwertanpassung	21
3.16. Beeinflussung MS-Ebene	22
3.17. GUI-Detailansicht: Stufenschalter-Anzeige und Status-Panel	23
3.18. Programmablaufplan der Simulationsinitialisierung	25
3.19. Programmablaufplan der Stufenschaltung	29
3.20. Anteile der Schleifenzeit	30
3.21. Programmablaufplan bei Totzeit und Schnellschaltung	32

3.22. Leistungskennlinie der Quelle MX-45	33
3.23. Programmablaufplan bei Lastabhängiger Sollwertanpassung	34
3.24. Programmablaufplan Manuelle Stufung	36
4.1. Messaufbau und rONT-Parametrierung an der RWTH Aachen	38
4.2. Ausschnitt aus der Messung der RWTH Aachen	38
4.3. Vergleich der Nachbildung mit den Messdaten aus Aachen	39
4.4. Detailansichten des Vergleichs mit den Messdaten aus Aachen	40
4.5. Statische Spannungsabweichung zwischen Nachbildung und realem rONT	41
4.6. Zeitliche Abweichungen der Stufenschaltungen	42
4.7. Detailvergleich der Stufenschaltung hinsichtlich der Zwischenstufe	43
4.8. Messung zur Validierung der lastabhängigen Sollwertanpassung	44
5.1. Vergleich der Simulink-Daten mit der Nachbildung und den Messdaten	46
5.2. Detailvergleich aller Ergebnisse	47

Tabellenverzeichnis

3.1. Transformator-Induktivitäten und zugehörige Leistungsklassen	10
3.2. Spannungssprünge des realen rONT	26
3.3. Spannungssprünge nach Formel 3.2	27

1. Spannungshaltung im Verteilnetz

Nach Vorgabe der DIN EN 50160 sollen die, in Wochenintervallen gemessenen, 10-Minuten-Mittelwerte des Effektivwertes der Versorgungsspannung zu 95% im Bereich $\pm 10\%$ der Versorgungsspannung liegen. Bedingt durch eine hohe und weiterhin steigende installierte Einspeiseleistung aus dezentralen Erzeugungsanlagen wird die Einhaltung der Spannungsgrenzen im Verteilnetz für Netzbetreiber zu einer immer schwieriger werdenden Angelegenheit. Um dieser Problematik Einhalt zu gewähren, stehen den Netzbetreibern mittlerweile viele verschiedene Konzepte zur Verfügung. Zu den Wichtigsten gehören der konventionelle Netzausbau, Blindleistungsregelung über $\cos(\varphi)$ oder Q(U) sowie die in dieser Arbeit thematisierte Anwendung eines regelbaren Ortsnetztransformators. Aus der Studie 'Statische Spannungshaltung' [3], die 2015 vom Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE) veröffentlicht wurde, geht hervor, dass sich allein durch den Einsatz einer Q(U)-Regelung bis zu etwa 60% mehr dezentrale Erzeugungsanlagen in einen bestehenden Netzstrang integrieren lassen. Durch Kombination mit regelbaren Ortsnetztransformatoren lässt sich dieses Potential weiter steigern. Die Studie besagt weiterhin, dass sowohl die aktive Blindleistungsregelung, als auch der Einsatz von geregelten Verteilnetztransformatoren kostengünstiger ist als der konventionelle Netzausbau, bei dem, parallel zu den bereits vorhandenen, weitere Leitungen hinzu gebaut werden. Obwohl die Blindleistungsregelung, vor allem durch den bedarfsgerechten Einsatz von Blindleistung bei der Q(U)-Variante, das Einspeisepotenzial im Verteilnetz massiv erhöhen kann und die Umsetzung im Vergleich zu regelbaren Ortsnetztransformatoren nochmals wirtschaftlicher ist, wird sie von den Verteilnetzbetreibern nur ungern genutzt. Die Studie zeigt hierzu auf, wie diese Regelungstechnik zu unerwünschten Netzschwingungen und damit zu Instabilitäten im Netz führen könnte, falls sie falsch parametrier ist und gibt an, mit welchen Parametern Q(U) eingesetzt werden kann, ohne dass es zu wesentlichen Störeffekten im Netz kommt. Um dieses Risiko und den durch die Blindleistungsregelung verursachten zusätzlich fließenden Blindstrom, welcher Verluste verursacht und die im Netz vorhandenen Betriebsmittel zusätzlich belastet, zu vermeiden, setzen die Betreiber der Niederspannungsnetze vermehrt auf die im Höchst- und Hochspannungsnetz bewährte Technik der Laststufenschalter. Diese findet nun in Form von regelbaren Ortsnetztransformatoren auch in der unteren Spannungsebene ihre Anwendung. Dies begründet die Zweckmäßigkeit

der Auseinandersetzung mit dem Thema rONT und offenbart die Aktualität des Themas der vorliegenden Arbeit.

2. Grundlagen des regelbaren Ortsnetztransformators

Ein regelbarer Ortsnetztransformator ist im Wesentlichen baugleich zu einem konventionellen Verteilnetztransformator. Die Besonderheit im Vergleich zu seinem unregulierten Mitstreiter liegt in der Nutzung eines Laststufenschalters, dessen Grundlage eine Erfindung von Dr.-Ing. Bernhard Jansen aus dem Jahre 1926 bildet. Mithilfe des in Abbildung 2.1 gezeigten Widerstandsschnellschalters kann das Übersetzungsverhältnis von Transformatoren unter Last unterbrechungsfrei geändert werden.

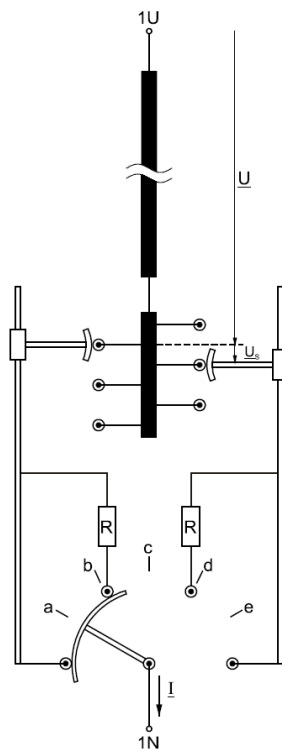


Abbildung 2.1. – Widerstandsschnellschalter nach Jansen[4]

In regelbaren Ortsnetztransformatoren werden heutzutage Vakuum-Schaltkammern (Abbildung 2.2) verwendet. Im Vergleich zu in Isolieröl schaltenden Laststufenschaltern besitzt

die Vakuum-Technik, bedingt durch den nicht vorhandenen Lichtbogen während des Schaltvorgangs, eine weitaus größere erreichbare Schaltleistung. Ebenso tritt in der Folge keine Ölverrußung oder Gasbildung im Öl ein, was den Wartungsaufwand erheblich reduziert. Die Maschinenfabrik Reinhausen gibt für ihren speziell für Ortsnetztransformatoren entwickelten Laststufenschalter ECOTAP VPD bis zu 500.000 wartungsfreie Schaltungen an und übertrifft dadurch mit fast 70 möglichen Schalthandlungen pro Tag die übliche 20-jährige Lebensdauer eines entsprechenden Verteilnetztransformators. [2]

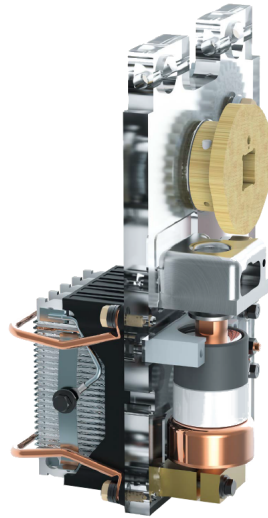


Abbildung 2.2. – Vakuum-Schalteinheit des ECOTAP VPD Laststufenschalters von MR [2]

Das Konzept des im Betrieb verstellbaren Übersetzungsverhältnisses wurde bislang nur bei Netzkupplern zwischen der Höchst- und Hochspannungsebene, beziehungsweise zwischen der Hochspannungs- und Mittelspannungsebene verwendet. Konventionelle Ortsnetztransformatoren besitzen zwar zum Teil eine einstellbare Übersetzung, doch kann eine Veränderung nur händisch von einem Techniker vor Ort und lediglich im spannungsfreien Zustand durchgeführt werden. Solche Umschaltungen werden nur in ungewöhnlichen Situationen, wie zum Beispiel nach einem Blackout, getätigt. Der allgegenwärtige Verteilnetztransformator besitzt also ein prinzipiell fest eingestelltes Übersetzungsverhältnis und kann dementsprechend nicht dynamisch der aktuellen Netzauslastung folgen. Die letzte Stellmöglichkeit, mit der sich eine Veränderung der Spannung am Ende eines Verteilungsstrangs bewirken lässt, befindet sich also an der Schnittstelle zwischen Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz und damit weit entfernt vom letzten Verbraucher beziehungsweise Erzeuger, was weitreichende Konsequenzen nach sich zieht.

Im Falle hoher Einspeisung steigt die Spannung im Netzstrang über den Spannungswert an. Die eingespeiste Leistung wird also durch die von der DIN EN 50160 fest vorgegebene maximale Spannungsabweichung begrenzt, selbst wenn die Betriebsmittel im Netz noch

nicht maximal ausgelastet werden. Bei hoher Last am Versorgungsstrang ergibt sich ein entgegengesetztes Bild. Die Spannung sinkt in diesem Fall unter den gewünschten Sollwert, wodurch die maximal abgebbare Leistung ebenfalls nach DIN EN 50160 beschränkt wird, auch wenn das Netz und seine Betriebsmittel eine höhere Auslastung zulassen würden. Diese beiden Szenarien beschreibt Abbildung 2.3. Die maximal zulässige, durch dezentrale Erzeugungsanlagen verursachte, Spannungsanhebung in der Niederspannung liegt nach VDE-AR-N-4105 bei lediglich 3% der Nennspannung. [8]

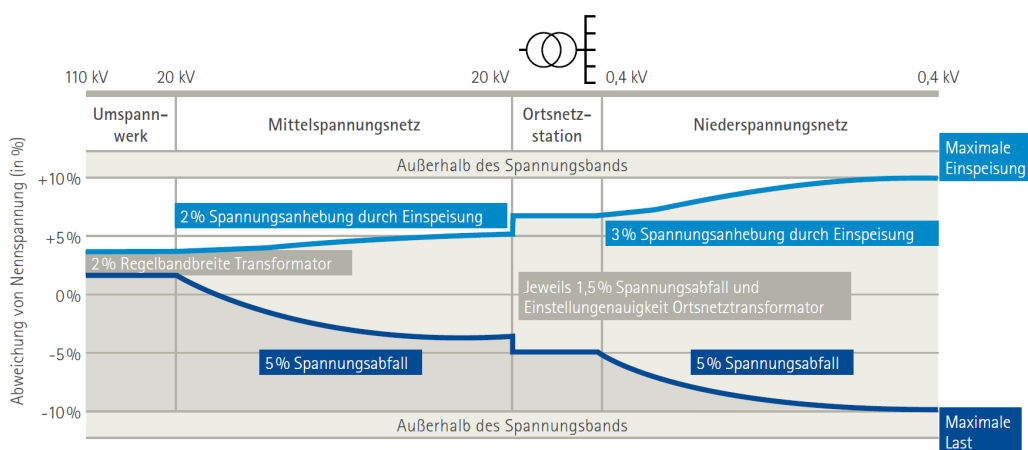


Abbildung 2.3. – Nutzbares Spannungsband bei konventionellen Ortsnetztransformatoren [2]

Ein regelbarer Ortsnetztransformator kann hier eingreifen und bei entsprechender Auslegung, ausgehend von der aktuellen Netzauslastung und Stromflussrichtung, die Stromtragfähigkeit aller Betriebsmittel im Netz bis hin zu ihrer thermischen Grenzleistung ausnutzen und bietet damit eine einfache und doch effektive Erhöhung der Einspeise- beziehungsweise Lastkapazität des Netzstrangs. Im Einspeisefall wird das Übersetzungsverhältnis erhöht, wodurch die Spannung auf der Sekundärseite des Transformators sinkt und unter dem eigentlichen Sollwert liegt. Die aus der Einspeisung resultierende Spannungsanhebung hebt nun diese Spannung in einen vorab definierten Bereich rund um den gewünschten Wert an. Ist die Spannung, aufgrund der Einspeisung, zu hoch oder sinkt Selbige unter einen Grenzwert, da Einspeiseleistung wegfällt, schaltet der regelbare Ortsnetztransformator um und sorgt so immer für eine relativ konstante Spannung beim Endverbraucher. Das Netz kann also allein durch den Einsatz eines rONT höhere Leistungen bereitstellen oder aufnehmen und das ohne teure Netzerweiterungen. Abbildung 2.4 verdeutlicht das, durch den regelbaren Ortsnetztransformator ermöglichte, zusätzlich nutzbare Spannungsband und macht erkennbar, dass sich durch die Entkopplung des Mittelspannungs- vom Niederspannungsnetzes wesentlich höhere Leistungen in vorhandenen Netzen übertragen lassen. Dies legt auch eine Berechnung der Deutschen Energie-Agentur dena dar, nach der mit Hilfe von regelbaren Ortsnetztransformatoren bis 2030 allein im Niederspannungsnetz Kosten für den Netzausbau in Höhe von rund 1,4 Milliarden Euro eingespart werden können. [1]

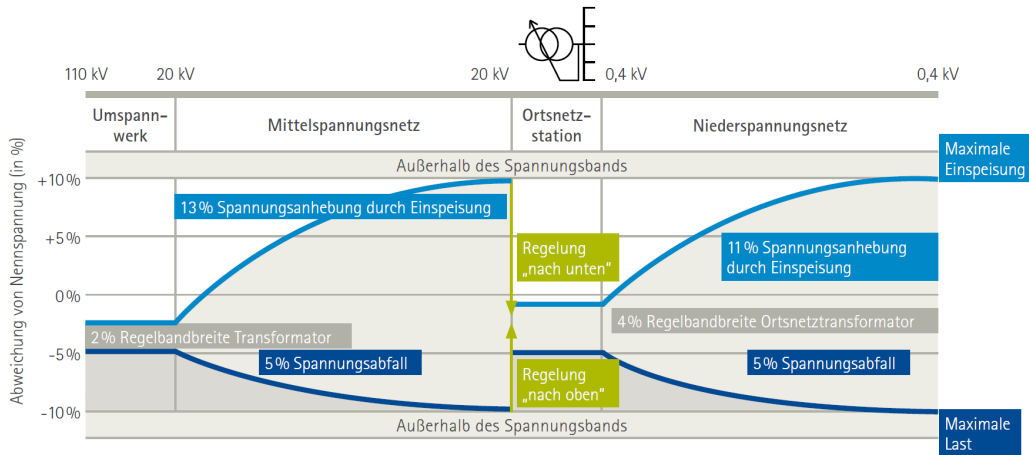


Abbildung 2.4. – Zusätzlich nutzbares Spannungsband durch den Einsatz eines rONT [2]

Die Breite des insgesamt nutzbaren zusätzlichen Spannungsbandes ergibt sich aus der Netzkonfiguration und aus der Entscheidung, wie viele und an welchen Stellen regelbare Ortsnetztransformatoren eingesetzt werden. Mit konventionellen Verteiltransformatoren ergibt sich lediglich das in Abbildung 2.5 gezeigte Spannungsband, welches durch die generellen Vorschriften der DIN EN 50160 beschränkt ist.

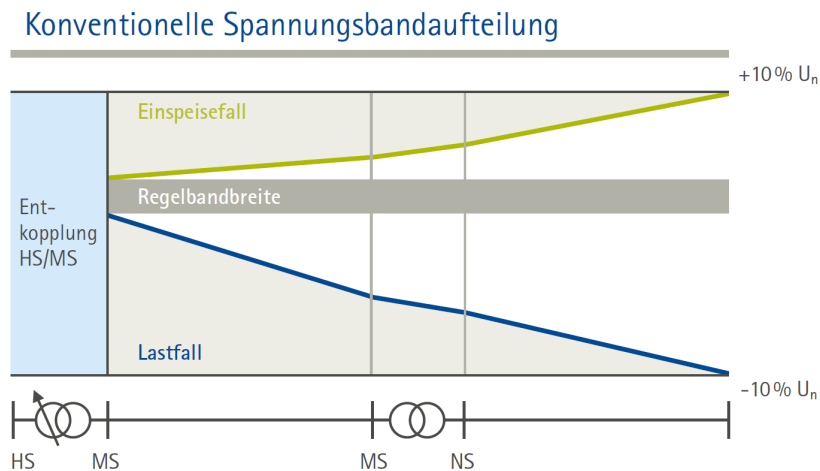


Abbildung 2.5. – Nutzbares Spannungsband mit konventionellem ONT [2]

Durch punktuellen Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators wird das daran angeschlossene Niederspannungsnetz von der Mittelspannungsebene entkoppelt und kann durch die aktive Regelung mehr Leistung aufnehmen beziehungsweise abgeben. Die maximale Spannungsabweichung im Mittelspannungsnetz wird hierbei nicht oder nur geringfügig beeinflusst, da die Grenzen der DIN EN 50160 in jedem Strang eingehalten werden müssen. In einem Netz, bei dem nur einzelne Niederspannungsstränge Probleme in der Spannungshaltung verursachen,

kann der punktuelle Einsatz geregelter Transformatoren die Problematik deutlich entschärfen und ist somit anzuraten. Abbildung 2.6 zeigt, wie sich durch die Entkopplung der beiden Spannungsebenen eine erhöhte Regelbandbreite in der Niederspannungsebene ergibt.

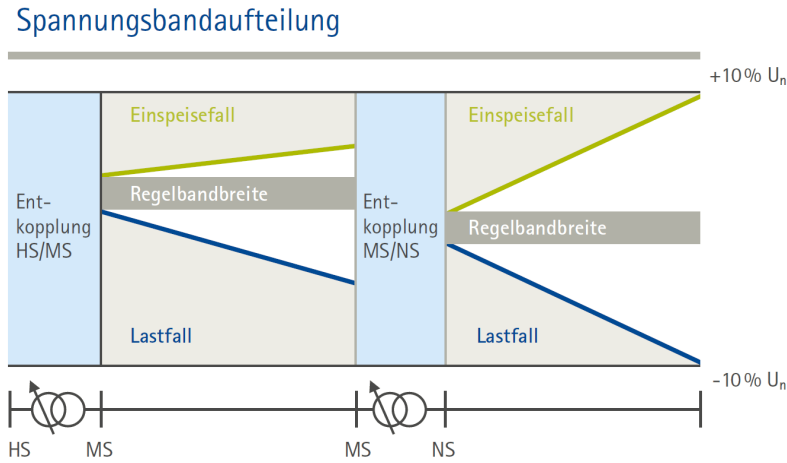


Abbildung 2.6. – Zusätzliche Regelbandbreite bei punktuellm Einsatz eines rONT [2]

Werden regelbare Ortsnetztransformatoren flächendeckend eingesetzt und wird somit ein komplettes Niederspannungs- vom Mittelspannungsnetz entkoppelt, ergibt sich unter Berücksichtigung der DIN EN 50160 zusätzlich zu der eben genannten erhöhten Regelbandbreite auf der Niederspannungsseite ein erhöhtes Einspeise- beziehungsweise Lastpotential in der Mittelspannungsebene. Wie Abbildung 2.7 deutlich macht, nutzen die dadurch insgesamt ermöglichten Leistungsaufnahmen/-abgaben die Kapazität der im Netz vorhandenen Betriebsmittel deutlich besser aus und erhöhen dadurch deren Wirtschaftlichkeit.

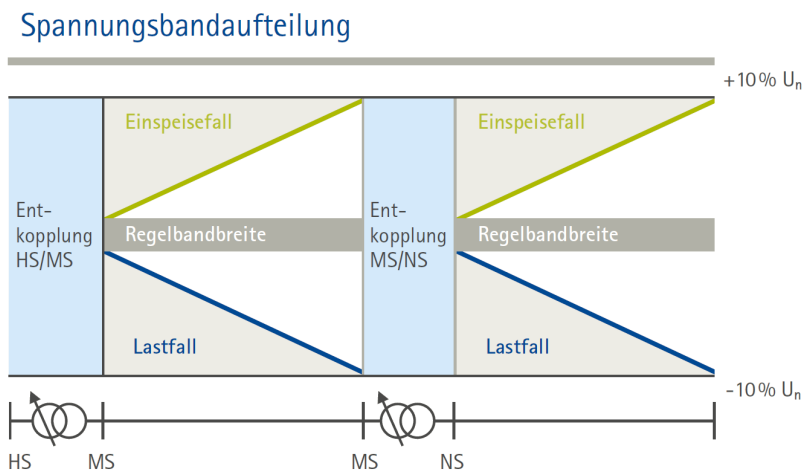


Abbildung 2.7. – Zusätzliche Regelbandbreite bei flächendeckendem rONT-Einsatz [2]

Um unnötige Schalthandlungen bei kurzzeitigen Spannungsschwankungen im Netz zu vermeiden, besitzt der regelbare Ortsnetztransformator verschiedene Verzögerungszeiten, die in Abbildung 2.8 erkennbar sind. Verlässt die vom rONT gemessene Spannung das eingestellte zulässige Spannungsband beginnt eine Zeitzählung. Liegt der Wert länger als beispielsweise zehn Sekunden außerhalb der vorgegebenen Grenzen wird eine Schalthandlung ausgelöst. Steigt die Spannung plötzlich extrem an und verletzt dabei eine der Schnellschaltgrenzen wird der Schaltvorgang bereits nach einer wesentlich kürzeren Zeit eingeleitet. Die genauen Zahlenwerte für beide Zeiten sind, wie auch die jeweiligen Spannungsgrenzen, frei wählbar.

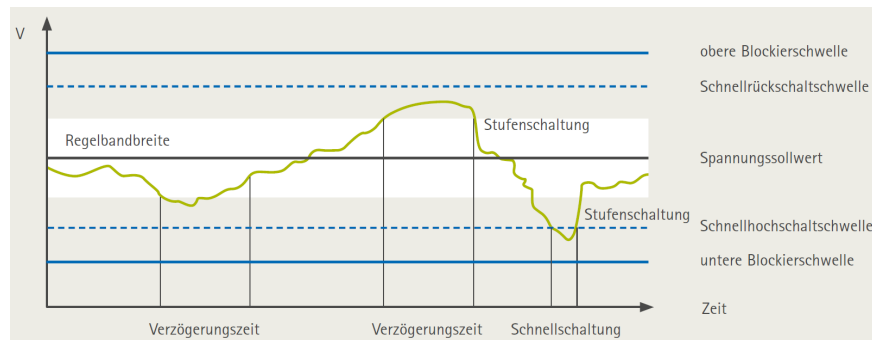


Abbildung 2.8. – Verzögerungszeiten bei der rONT-Stufung [2]

Die in dieser Arbeit angefertigte Hardwarenachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators folgt, im Bezug auf den Stufenschalter, im Wesentlichen den Eigenschaften des ECOTAP VPD der Maschinenfabrik Reinhausen (Abbildung 2.9). Die voreingestellten Werte beim Start der Applikation entsprechen den Standardeinstellungen von MR. Die Auswahl dieses Stufenschalters begründet sich in der langen Erfahrung des Familienunternehmens und der damit verbundenen Weltmarktführerschaft im Bereich der Laststufenschalter. Zudem stammen die zur Validierung der Nachbildung genutzten Messdaten eines realen Ortsnetztransformators (siehe Kapitel 4.1) ebenfalls von einem rONT mit Stufenschalter der Maschinenfabrik Reinhausen.

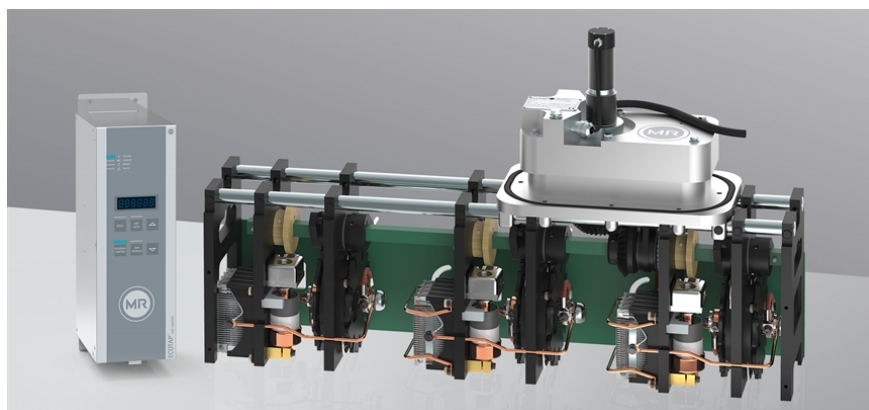


Abbildung 2.9. – ECOTAP VPD Laststufenschalter der Maschinenfabrik Reinhausen [2]

3. Hard-/Softwareachbildung im Labor

Dieses Kapitel beschtigt sich mit der Modellierung des Verhaltens eines realen Ortsnetztransformators auf Basis der Entwicklungsumgebung MATLAB[®] und des vorhandenen Netzlabors.

3.1. Laboraufbau und Geräte

Grundlage für die Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators ist das Labor der Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze (EEN) im vierten Stock des Lehrstuhls für Hochspannungs- und Anlagentechnik an der Technischen Universität München. Dort steht eine vollständige Nachbildung eines Niederspannungsnetzes zur Verfügung, deren prinzipieller Aufbau in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

Im Folgenden ein Überblick über die wichtigsten Komponenten:

AC-Quelle

Als Spannungsquelle wird eine California Instruments MX45-3Pi des Herstellers AMETEK[®] Programmable Power eingesetzt. Diese stellt die Unterspannungsseite eines Mittelspannungs-/Niederspannungs-Transformators in der Netznachbildung dar. Die Quelle ist über eine integrierte Ethernet-Schnittstelle mittels SCPI¹-Befehlen sowie über das eingebaute Display voll programmierbar und verfügt über eine Ausgangsleistung von 45kVA. Die Ausgangsspannung kann dabei über verschiedenste Einstellungen beeinflusst werden. Neben der Bereitstellung von Wechselspannung besteht auch die Möglichkeit phasengenau Gleichspannungen auszugeben. Durch einstellbare Phasenwinkel, Transienten und harmonische Oberschwingungen lässt sich eine sehr detailgetreue Nachbildung eines realen Versorgungsnetzes erreichen. Neben Sinus-, Rechteck, und Sagezahnschwingungen lassen sich mit der Quelle auch eigens definierte Schwingungsformen nachbilden. Zudem verfügt die MX45-3Pi über einen sogenannten externen Sense-Eingang, der über die Einstellungen angewählt werden kann. Standardmäßig misst die Quelle ihre Ausgangsspannung direkt selbst und regelt dementsprechend auf diesen

¹Standard Commands for Programmable Instruments

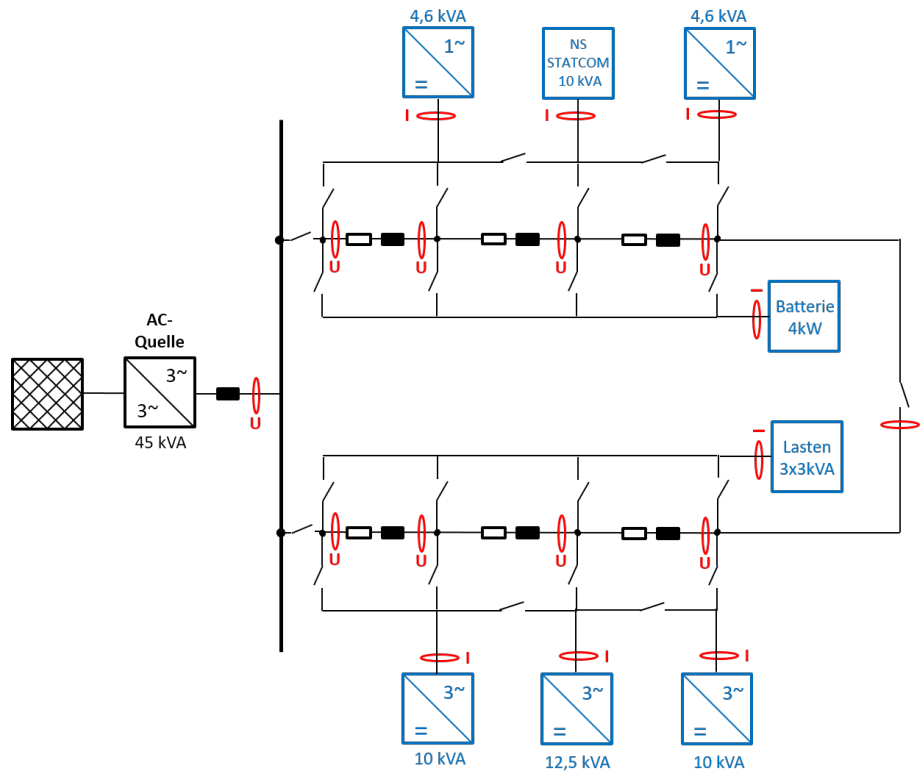


Abbildung 3.1. – Prinzipskizze des Laboraufbaus

Wert aus. Durch den externen Sense-Eingang kann eine zusätzliche Messleitung an den Punkt verlegt werden, an dem der eingestellte Spannungswert erreicht werden soll. Somit können Verluste, die in den Leitungen zwischen der Quelle und der imaginären Sammelschiene des Transformators auftreten, ausgeregelt werden. Um diese Funktion auch in der Nachbildung des regelbaren Ortsnetztransformators verwenden zu können, wurde entsprechend eine Messleitung vom externen Sense-Eingang der Spannungsquelle bis direkt vor die Transformator-Induktivitäten verlegt. Des Weiteren bietet die MX45-3Pi die Möglichkeit der Rückspeisung von in der Netznachbildung eingespeister Energie bis hin zu ihrer vollen Ausgangsleistung. Abgerundet wird die Abbildung des Transformators durch einstellbare Induktivitäten zwischen dem Ausgang der Quelle und dem Beginn der Netznachbildung, mit deren Hilfe sich Transformatoren mit unterschiedlichen Scheinleistungen nachbilden lassen. Die im Netzlabor einstellbaren Induktivitäten und die zugehörigen Leistungsklassen des Transformators zeigt Tabelle 3.1.

Induktivität [mH]	0.05	0.07	0.12	0.18	0.3
Leistungsklasse [kVA]	630	400	250	100	50

Tabelle 3.1. – Transformator-Induktivitäten und zugehörige Leistungsklassen

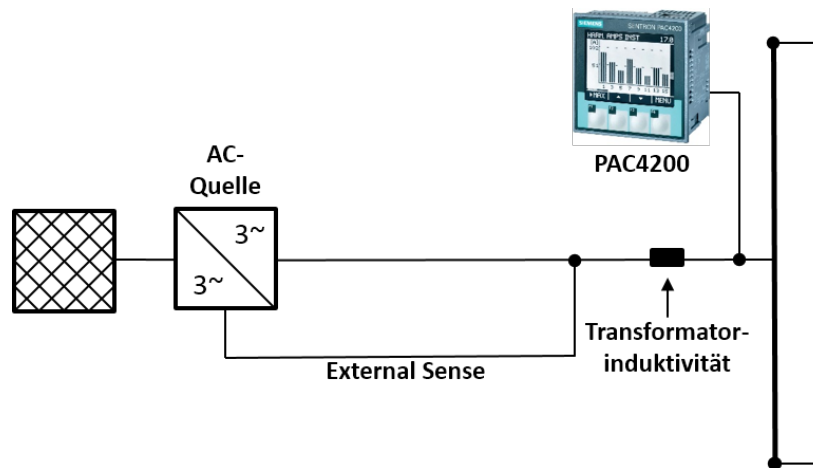


Abbildung 3.2. – Labornetz mit externer Sense-Leitung und eingebautem Messgerät PAC4200

Netznachbildung

Zur Simulation eines Niederspannungsnetzes stehen einstellbare, konzentrierte Elemente, in Form von Widerständen und Induktivitäten zur Verfügung. Die einzelnen Abzweige der Netznachbildung sind entsprechend eines realen Netzes über die in Abbildung 3.1 erkennbaren Schütze zu- und abschaltbar. Die Bedienung erfolgt dabei über das in Abbildung 3.3 gezeigte Tableau. Ist ein Schütz geschlossen, wird dies über eine im Schalter integrierte Leuchtdiode angezeigt. Nach einer Spannungsunterbrechung der Labor-Stromversorgung sind alle Schütze sicherheitshalber stets geöffnet. Die jeweiligen Leitungsbeläge sind innerhalb zweier Rack-Gehäuse einstellbar, die nach den beiden Sammelschienenabgängen Q1 und Q13 (Abbildung 3.4) aufgeteilt sind.

Neben den Leitungsnachbildungen sind auch zahlreiche Wechselrichter unterschiedlicher Hersteller und verschiedenster Leistungsklassen in das Labornetz integriert (Abbildung 3.5). Die Umrichter können über eine Auswahl vielfältiger DC-Quellen versorgt werden, welche sich in einem weiteren Rack befinden (Abbildung 3.6). Die Auswahl der Quelle für die jeweiligen Wechselrichter ist beliebig und geschieht über Photovoltaik-Steckverbinder.

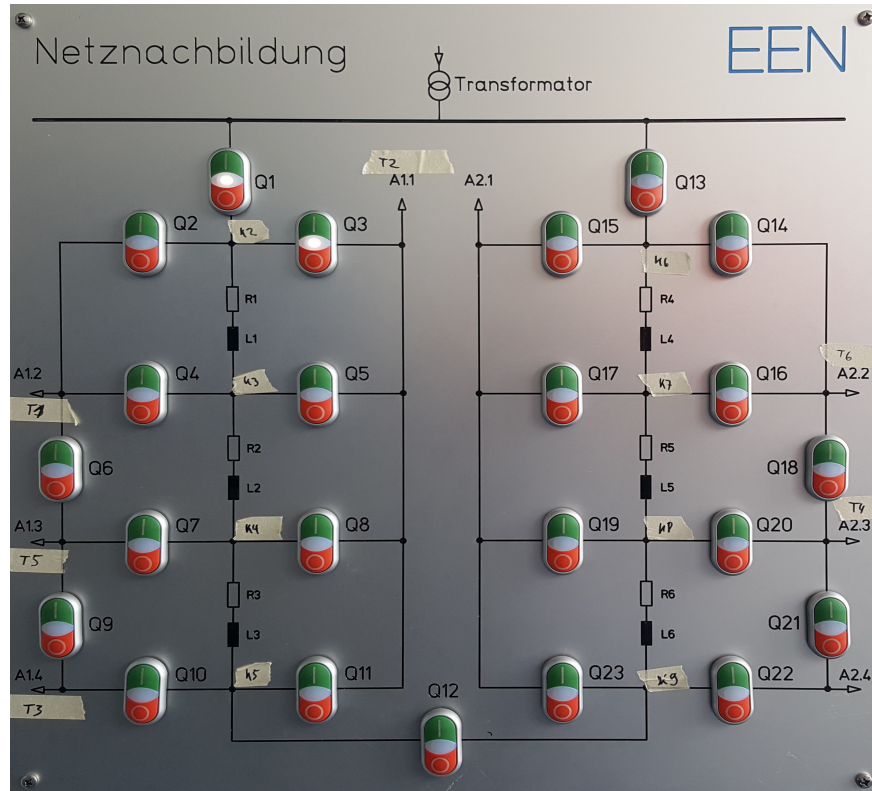
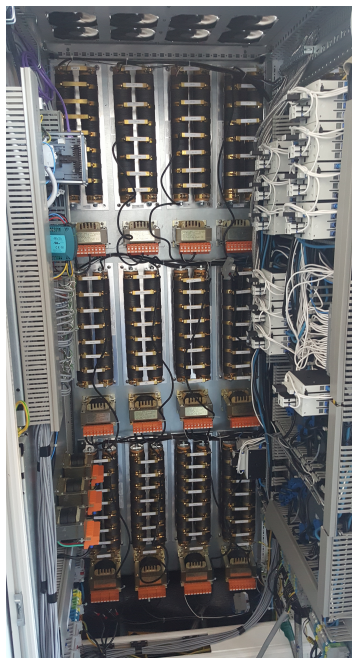


Abbildung 3.3. – Schalttafel der Netznachbildung im Labor des EEN



Strang nach Q1



Strang nach Q13

Abbildung 3.4. – Netznachbildungen der Stränge nach Q1 und Q13



Abbildung 3.5. – Im Labor eingesetzte Wechselrichter verschiedener Hersteller



Abbildung 3.6. – DC-Quellen zur Ansteuerung der Wechselrichter

DEWETRON-Messgerät

Zur Kontrolle und exakten Messung aller im Labor durchgeführten Tests ist ein DEWETRON DEWE-800 (Abbildung 3.7) in einem vierten Rack verbaut. Zahlreiche in die Netznachbildung integrierte Messpunkte und eine Abtastrate von 100kHz garantieren eine vollständige Abdeckung aller gewünschten Messwerte im nachgebildeten Niederspannungsstrang.



Abbildung 3.7. – DEWETRON DEWE-800 Messgerät

SIEMENS® SENTRON® PAC4200

Für die Nachbildung des regelbaren Ortsnetztransformators wurde zusätzlich ein SIEMENS® SENTRON® PAC4200 in die Netzabbildung eingebaut. Das Gerät wurde, wie in Abbildung 3.8 gezeigt, mittels eines Hutschienenadapters befestigt und entsprechend der Bedienungsanleitung über einen Leitungsschutzschalter mit 0,5A und Auslösecharakteristik C abgesichert. Benötigt wird das Gerät zur Spannungsmessung an der imaginären Sammelschiene des Transformators, also nach den im Labor verbauten Transformator-Induktivitäten. Durch einfaches Umschließen der Messleitungen an einen beliebigen Punkt innerhalb der Netznachbildung können auch, in der Realität ebenfalls genutzte, abgesetzte Messpunkte im Netz zur Steuerung des regelbaren Ortsnetztransformators verwendet werden. Die Messgenauigkeit für den Spannungswert liegt bei nur 0,2%. Zunächst war angedacht jene Spannung ebenfalls über die Quelle zu messen. Da diese jedoch den von ihr gemessenen Wert auch zwangsläufig zur Regulierung der Ausgangsspannung benutzt erwies sich diese Lösung als unpraktikabel. Schließlich sollen die in der Realität auftretenden Spannungsfälle über der Transformator-Reaktanz nicht durch die Quelle ausgeregelt werden. Abbildung 3.2 zeigt den Messpunkt des zusätzlich installierten PAC4200. Folglich wird der Spannungsfall über der Reaktanz von der Quelle nicht erfasst. Die Kommunikation verläuft auch hier über eine integrierte Ethernet-Schnittstelle, jedoch wird als Protokoll Modbus TCP verwendet.

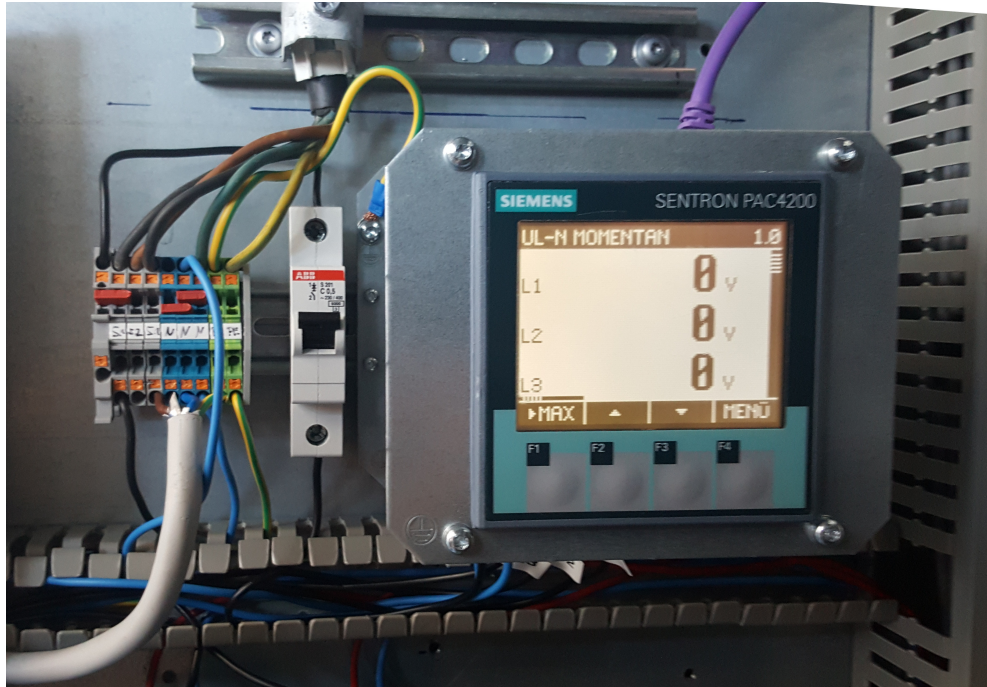


Abbildung 3.8. – Eingebautes Messgerät SIEMENS® SENTRON® PAC4200

3.2. Programmerstellung in MATLAB®

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Applikation zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators wurde in MATLAB® programmiert. Wichtige Punkte bei der Wahl dieser Programmierumgebung waren der große Bekanntheits- und Verbreitungsgrad des Programms sowie die einfache Kommunikation mit der Spannungsquelle und dem Messgerät PAC4200. Programmierung und Test der Applikation wurden auf Grundlage der Version R2016b durchgeführt. Trotz größter Sorgfalt beim Entwurf des Programms empfiehlt es sich Selbiges für jede neue Simulation auch neu zu öffnen, um wirklich alle Variablen zurückzusetzen und unerwünschte Effekte zu vermeiden. Die im Rahmen dieser Arbeit angefertigte Applikation befindet sich im Anhang A.1 auf CD.

Zum Starten der Applikation müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein, die an dieser Stelle kurz erwähnt werden sollen:

- MATLAB®-Version R2016a oder neuer
- Installierte Toolboxes:
 - Instrument Control
 - Statistics and Machine Learning
 - Curve Fitting

3.2.1. MATLAB® AppDesigner

Mit der Einführung von Version R2016a wurde MATLAB® um eine neue Entwicklungsumgebung für MATLAB®-Apps mit grafischer Bedienoberfläche namens App Designer erweitert. Diese vereinfacht den Prozess des Layouts der visuellen Komponenten einer Benutzeroberfläche und umfasst zahlreiche Steuerelemente, um eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zu erstellen. App Designer integriert die beiden Hauptaufgaben bei der Erstellung einer App – die Konzeption der grafischen Benutzeroberfläche und die Programmierung des App-Verhaltens in einer einzigen Umgebung. Der Wechsel zwischen visuellem Design im Zeichenbereich und Codeentwicklung mit dem eingebetteten Editor ist schnell und direkt möglich. Zusätzlich lassen sich neue Eigenschaften, Callbacks und andere Funktionen mit einem einzigen Klick hinzufügen. Mit AppDesigner erstellte Apps bestehen aus nur einer einzigen .mlapp-Datei, die sowohl das Layout als auch den Code enthält. [5]

3.2.2. Grafische Benutzeroberfläche

Um das Programm zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators möglichst einfach bedienen zu können und jederzeit einen Überblick über die wichtigsten aktuellen Daten zu haben, wurde eine grafische Benutzeroberfläche erstellt, die Abbildung 3.9 zeigt.

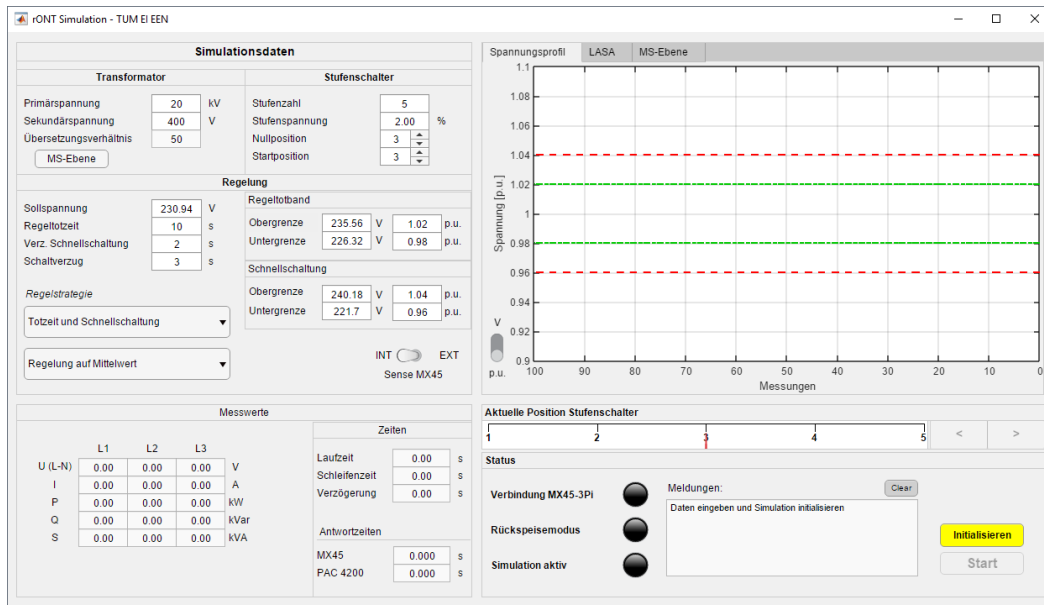


Abbildung 3.9. – Grafische Benutzeroberfläche der rONT-Simulations-App

Die Oberfläche lässt sich im Wesentlichen in drei Teile aufteilen. Im linken oberen und mittleren Teil der App (Abbildungen 3.10 und 3.11) lassen sich diverse Einstellungen tätigen. So werden grundsätzliche Angaben zum Transformator, wie die Primär- und Sekundärnennspannung getätigt. Das Übersetzungsverhältnis berechnet sich hierbei automatisch neu, sobald einer der beiden Werte geändert wurde. Daneben finden sich Anpassungsmöglichkeiten für die Anzahl der Stufen, die Stufenspannung, die Nullposition sowie für die Startposition des zu simulierenden Laststufenstellers. Die Einstellung der Nullposition ist nötig, falls ein rONT mit unsymmetrisch verteilten Stufen nachgebildet werden soll. Da die Fertigung von Stufenstellers stets nach Kundenwunsch geschieht, können beispielsweise 9 Stufen auf +4/-4, +2/-6 oder jede andere erdenkliche Kombination aufgeteilt werden. Die Startposition legt die bei Simulationsbeginn aktive Stufe fest. Über den Button MS-Ebene gelangt man zu Einstellmöglichkeiten, die die hypothetische Oberspannungsseite des simulierten regelbaren Ortsnetztransformators beeinflussen. Konkrete Angaben dazu finden sich bei Abbildung 3.16.

Simulationsdaten			
Transformator		Stufenschalter	
Primärspannung	20	kV	Stufenzahl
Sekundärspannung	400	V	Stufenspannung
Übersetzungsverhältnis	50		Nullposition
MS-Ebene			Startposition

Abbildung 3.10. – Angaben zum Transformator und Laststufenschalter

Unterhalb der Transformator- und Stufensteller-Daten werden die Regelparameter des regelbaren Ortsnetztransformators eingestellt. Wie auch in der Realität wird eine Sollspannung vorgegeben, anhand derer sich die Schaltgrenzen orientieren. Im Falle des ECOTAP VPD der Maschinenfabrik Reinhausen werden die Grenzen in 0,5%-Schritten rund um den Sollwert festgelegt. In der entwickelten Nachbildung sind die Grenzen sogar komplett unabhängig voneinander einstellbar, um auch weiterführende Überlegungen und Tests realisierbar zu machen. Die Schaltgrenzen können hierbei sowohl in Volt, als auch prozentual angegeben werden. Das jeweils andere zugehörige Feld ändert seinen Wert automatisch, entsprechend der gemachten Eingaben. Selbstverständlich lassen sich auch die Verzögerungszeiten für den normalen Schaltvorgang und für die Schnellschaltung festlegen. Zusätzlich gibt es eine Einstellmöglichkeit für den Schaltverzug, also die Zeit zwischen Ablauf der Totzeit und dem tatsächlichen Zeitpunkt der Stufenschaltung. Der Standardwert beläuft sich auf die kürzeste Zeit zwischen zwei Stufenschaltungen beim ECOTAP VPD und damit laut Betriebsanleitung auf drei Sekunden [7]. Über zwei Drop-Down-Menüs, die in Abbildung 3.12 im Detail zu sehen sind, lassen sich die verschiedenen implementierten Regelalgorithmen und auch der zur Regelung genutzte Spannungswert auswählen. Standardmäßig wird auf den Mittelwert aller drei Phasen geregelt. Es ist aber auch möglich nur Phase 1 zu betrachten oder die Phase mit der jeweils maximalen Abweichung vom Sollwert als Eingangswert auszuwählen. Die eingebauten Algorithmen werden in Abschnitt 3.2.4 näher erläutert. Um die Regelung im Labor möglichst genau nachbilden zu können, wurde, wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, eine externe Messleitung von der Quelle bis direkt vor die Transformator-Induktivitäten verlegt. Da die Spannungsquelle bei nicht ordnungsgemäß angeschlossener Leitung die Ausgangsspannung stets erhöhen würde, bis eine Schutzschaltung greift und dies die nachgelagerten Geräte beschädigen könnte, muss der externe Sense-Eingang in der Oberfläche nach jedem Neustart der Applikation von Hand ausgewählt werden. Dies geschieht durch einen kleinen Schalter in der Benutzeroberfläche. Wird dort der externe Messeingang ausgewählt, erscheint zusätzlich ein Warndialog, der nochmals darauf verweist, dass die Messleitung verbunden sein muss.

Regelung			
Sollspannung	230.94	V	
Regeltotzeit	10	s	
Verz. Schnellschaltung	2	s	
Schaltverzögerung	3	s	
<i>Regelstrategie</i>			
Totzeit und Schnellschaltung			
Regelung auf Mittelwert			
INT <input type="checkbox"/> EXT <input checked="" type="checkbox"/> Sense MX45			
Regeltotband			
Obergrenze	235.56	V	1.02 p.u.
Untergrenze	226.32	V	0.98 p.u.
Schnellschaltung			
Obergrenze	240.18	V	1.04 p.u.
Untergrenze	221.7	V	0.96 p.u.

Abbildung 3.11. – Parameter der rONT-Regelung

Regelstrategie

Totzeit und Schnellschaltung

Schnellschaltung

Totzeit

Totzeit und Schnellschaltung

Lastabhängige Sollwertanpassung

Manuelle Stufung

Totzeit und Schnellschaltung

Regelung auf Mittelwert

Regelung auf Mittelwert

Regelung auf Phase 1

Regelung auf Min / Max

Abbildung 3.12. – Drop-Down-Menüs der rONT-Regelung

Im linken unteren Bereich der Bedienoberfläche (Abbildung 3.13) werden aktuelle Messwerte und verschiedene Zeitangaben zum Simulationsverlauf angezeigt. Für jede der drei Phasen lassen sich hier jederzeit die Leiter-Erde-Spannung, der fließende Strom, sowie die Wirk-, Blind- und Scheinleistung ablesen. Rechts daneben findet sich die Angabe der seit Simulationsbeginn verstrichenen Zeit, die jeweils aktuelle Dauer für den letzten Schleifendurchgang des Regelungsalgorithmus und die bisher vergangene Verzögerungszeit im Falle einer Grenzverletzung. Zusätzlich werden auch die jeweiligen Antwortzeiten der Spannungsquelle MX-45 und des Messgeräts PAC4200 angezeigt.

Messwerte				
	L1	L2	L3	
U (L-N)	0.00	0.00	0.00	V
I	0.00	0.00	0.00	A
P	0.00	0.00	0.00	kW
Q	0.00	0.00	0.00	kVar
S	0.00	0.00	0.00	kVA

Zeiten	
Laufzeit	0.00 s
Schleifenzeit	0.00 s
Verzögerung	0.00 s
Antwortzeiten	
MX45	0.000 s
PAC 4200	0.000 s

Abbildung 3.13. – Messwertanzeige der Simulationsanwendung

Den größten und am schnellsten ersichtlichen Teil der Applikation nimmt die in Abbildung 3.14 gezeigte Darstellung der letzten 100 Messwerte und das daraus resultierende Spannungsprofil in Anspruch. Pro Schleifendurchgang kommt ein Messwert hinzu. Die Anzeige dient nicht der Messung oder Protokollierung des gesamten Simulationsverlaufs, sondern soll nur den Verlauf der Spannung und eventuelle Schalthandlungen im letzten Messzeitraum für den Benutzer leichter nachvollziehbar machen. Für Messungen, bei denen die rONT-Nachbildung ebenfalls verwendet werden soll, steht das in Kapitel 3.1 erwähnte DEWETRON Messgerät zur Verfügung, welches mit seiner Abtastrate von bis zu 100kHz und seinen vielen Messpunkten auch wesentlich exaktere Daten liefern kann. Die Visualisierung der letzten Messwerte ist über einen kleinen Schalter jederzeit beliebig zwischen einer Ansicht mit Volt-Werten und einer p.u. - Darstellung umschaltbar. Letztere bezieht sich stets auf den einphasigen Wert der eingestellten Sekundärnennspannung des Transformators. Neben dem für die Regelung genutzten aktuellen Spannungsmesswert vom PAC4200 werden auch die Schaltgrenzen für die normale und die Schnellschaltung in grün beziehungsweise rot angezeigt.

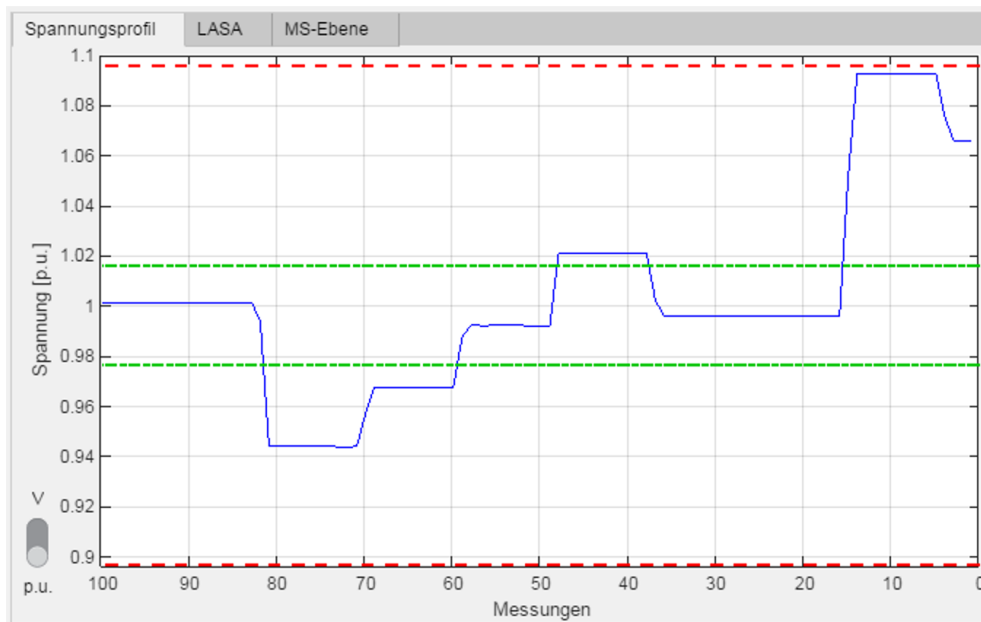


Abbildung 3.14. – Detailansicht des Spannungsprofils

Über einen Reiter kann zwischen dem Spannungsprofil, Einstellungen für die lastabhängige Sollwertanpassung und Vorgaben aus der Mittelspannungsebene gewechselt werden. Abbildung 3.15 zeigt die einstellbaren Parameter der lastabhängigen Sollwertanpassung und die frei festlegbare Kennlinie dieses Algorithmus. Als Regelgröße, also als für den zur Regelung genutzten Leistungswert, kann zwischen Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung gewählt werden. Die Kennlinie kann anhand von fünf nahezu frei definierbaren Kennlinienpunkten definiert werden und wird entsprechend angezeigt. Die Endpunkte der Kennlinie sind, bezo-

gen auf die Leistung, nicht veränderbar und entsprechend der Ausgangsleistung der Quelle definiert. Ebenfalls sind die aus dem Spannungsprofil bekannten Schaltgrenzen dargestellt, die abhängig vom eingestellten p.u. - Wert sind. Während einer aktiven Simulation wird die aktuelle Position auf der Kennlinie durch einen schwarzen Punkt dargestellt. Zusätzlich wurde ein Skalierungsfaktor eingebaut, der trotz der begrenzten Leistung der Quelle die Nachbildung üblicher Leistungsklassen von Ortsnetztransformatoren ermöglicht. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Skalierungsfaktor bei Messungen mit dem DEWETRON berücksichtigt werden muss. Die sich durch den Faktor ergebenden Beeinflussungen der Messwerte werden in Abschnitt 3.2.4 näher beleuchtet.

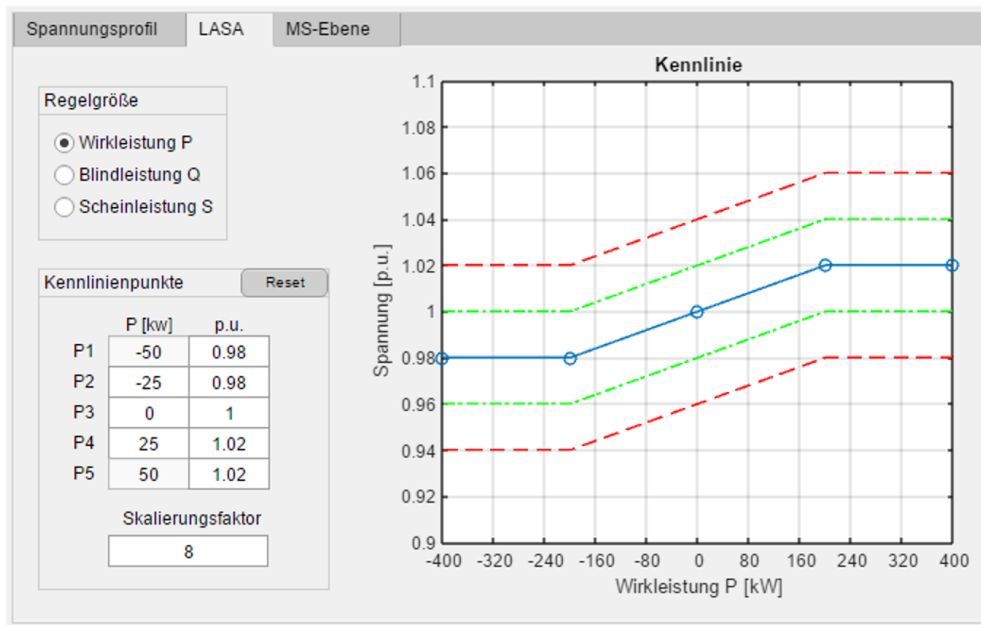


Abbildung 3.15. – Einstellmöglichkeiten der lastabhängigen Sollwertanpassung

Im letzten Reiter lassen sich Vorgaben aus dem Mittelspannungsnetz tätigen. Wie Abbildung 3.16 zeigt, können die Spannungswerte der einzelnen Phasen in Volt oder prozentual getätigt werden und auch der jeweilige Phasenwinkel ist frei definierbar. Die Spannungswerte sind hierbei auf die Unterspannungsseite des Transformators bezogen. Ein kleines Zeigerdiagramm veranschaulicht die getätigten Einstellungen. Zu Beginn der Simulation werden die eingetragenen Angaben als Startwerte an die Quelle MX-45 übertragen. Nach Simulationsstart können die Werte nach wie vor geändert werden und über einen Klick auf den während der Simulation freigeschalteten Übertragen-Button der Spannungsquelle übergeben werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Übertragen der Werte einen kleinen Moment in Anspruch nehmen kann und aufgrund der Regelschleife nicht immer sofort ausgeführt wird. Sobald die neuen Werte übertragen wurden, wird dies im in Abbildung 3.17 gezeigten Meldungsfenster angezeigt.

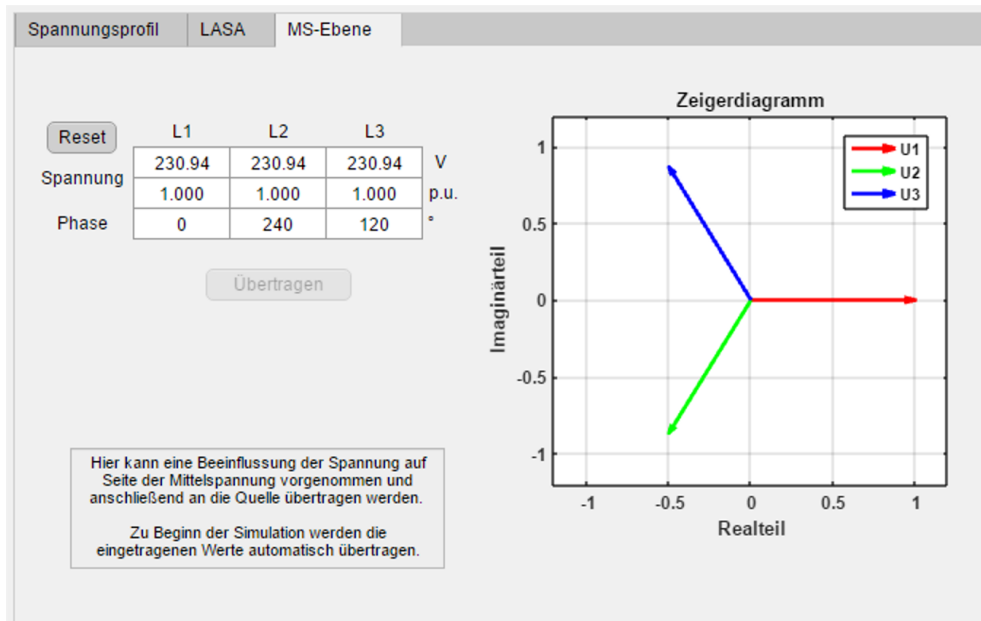


Abbildung 3.16. – Einstellmöglichkeiten zur Beeinflussung der Mittelspannungsebene

Im, in Abbildung 3.17 gezeigten, rechten unteren Teil der Benutzeroberfläche wird die aktuelle Position des Laststufenschalters signalisiert. Rechts daneben finden sich zwei Schaltflächen, mit denen sich die Stufe manuell verstellen lässt, falls die Manuelle Stufung als Regelalgorithmus ausgewählt wurde. Darunter befinden sich drei Lampen, die verschiedene wichtige Zustände grafisch darstellen. Die oberste Lampe signalisiert den Verbindungsstatus mit der Quelle. Darunter wird der Zustand des Rückspeisemodus der MX-45 angezeigt. Nur wenn dieser aktiv ist, kann die Simulation gestartet werden. Der Modus wird zwar durch die Applikation automatisch eingeschaltet, jedoch wird danach zusätzlich überprüft, ob dieser auch wirklich aktiv ist. Falls nicht, wäre die Einspeiseleistung beschränkt, da die Quelle den ihr zugeführten Strom dann nur in Wärme umwandeln würde, die nur begrenzt abgeführt werden kann und schlussendlich zu einem Abschalten wegen Übertemperatur führen würde. Die dritte Lampe zeigt an, ob die Simulation und damit die Regelung aktiv ist. Um dem Benutzer Fehlermeldungen und Informationen übersichtlich und über die gesamte Simulationsdauer hinweg anzeigen zu können, wurde ein Textfeld mit Meldungen auf der Bedienoberfläche untergebracht. Die jeweils neueste Meldung wird mit einem Zeitstempel versehen und leicht versetzt oben in der Box angezeigt. Sind die Grenzen des Textfelds erreicht, erscheint automatisch eine Scrollbar. Über einen Schalter kann der Inhalt des Textfeldes gelöscht werden. Im rechten unteren Eck befinden sich die wohl wichtigsten Schaltflächen des gesamten Programms. Zunächst muss die Simulation initialisiert werden, woraufhin die Start-Taste freigegeben wird und eine Abbruch-Schaltfläche erscheint, falls doch noch Änderungen an den Einstellungen getätigt werden sollen. Der genaue Ablauf beim Initialisieren wird in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. Ist die Simulation aktiv, wird aus der Start-Taste die Stopp-Taste. An

dieser Stelle sei erwähnt, dass das Stoppen der Simulation, bedingt durch den Schleifenaufbau der Regelung, einige Sekunden in Anspruch nehmen kann.

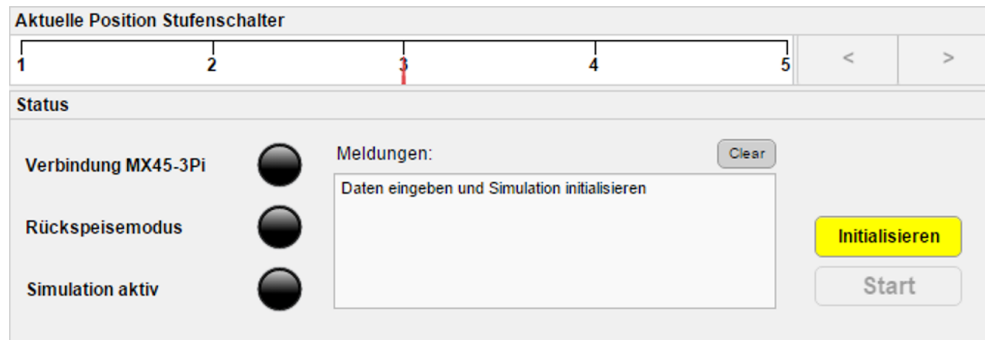


Abbildung 3.17. – Anzeige der Position des Stufenschalters und Status-Panel

Bei der gesamten Konzeption der Benutzeroberfläche wurde darauf geachtet selbige sehr responsiv zu gestalten. Viele Änderungen an eingetragenen Daten werden sofort in der Oberfläche ersichtlich angezeigt. So wirkt sich eine Änderung der Stufensteller-Daten direkt auf die Anzeige der Position des Stufenschalters im unteren rechten Bereich aus. Eine Änderung der eingestellten Sollspannung führt zu einer Anpassung der Schaltgrenzen abhängig vom eingetragenen p.u.-Wert und einer angepassten Darstellung der Grenzen im Spannungsprofil. Auch die Kennlinie der lastabhängigen Sollwertanpassung oder das Zeigerdiagramm zur Visualisierung der eingetragenen Mittelspannungswerte passen sich automatisch veränderten Eingaben an. Die Auswahl der lastabhängigen Sollwertanpassung bewirkt einen Wechsel von der Anzeige des Spannungsprofils hin zur Kennlinie desselben Algorithmus.

3.2.3. Wichtige Funktionen

Dieses Kapitel geht im Detail auf zwei wichtige Funktionen ein, die für die Funktionsfähigkeit und Korrektheit der Nachbildung von zentraler Bedeutung sind. Zum Einen der Programmablauf beim Initialisieren der Simulation und zum Anderen die exakte Nachbildung des Stufenstellers und der damit verbundenen Spannungssprünge zwischen den einzelnen Stufen im Bezug auf die eingestellte Stufenspannung.

Initialisieren der Simulation

Wenn alle Werte des zu simulierenden regelbaren Ortsnetztransformators eingetragen wurden und die Simulation gestartet werden soll, muss diese zunächst initialisiert werden. Dabei laufen einige Prozesse ab, welche Abbildung 3.18 zeigt und auf die im Folgenden eingegangen werden soll. Zunächst werden die meisten der Eingabe- und Interaktionsfelder für Eingaben gesperrt und die Daten auf Plausibilität überprüft. So muss die Sollspannung innerhalb der eingestellten Schaltgrenzen liegen und die Stufenzahl ungerade sein. Ist eine dieser Voraussetzungen nicht erfüllt, bricht die Initialisierung ab und die Eingabefelder werden wieder entsperrt. Sollte der Laststufenschalter mehr als $\pm 10\%$ der Nennspannung schalten können, wird der Benutzer über eine Meldung darüber informiert, dass die ausgegebenen Spannungen eventuell nicht mehr der DIN EN 50160 entsprechen. Die Initialisierung bricht in diesem Fall allerdings nicht ab, sondern beendet die Prüfung der Daten mit positivem Ergebnis. Danach wird die aktuell eingestellte Startposition des Stufenschalters festgelegt und auf der Oberfläche angezeigt. Nach der Speicherung einiger Parameter für die lastabhängige Sollwertanpassung und Interpolation seiner Kennlinie wird versucht die Spannungsquelle MX-45 zu erreichen und eine Verbindung herzustellen. Klappt dies nicht, wird die Initialisierung ebenfalls abgebrochen und die Eingabefelder werden wieder freigegeben. Besteht eine Verbindung mit der Quelle, wird diese zunächst zurückgesetzt, woraufhin grundlegende Einstellungen getätigt werden. Unter Anderem wird hier der Rückspeisemodus der Quelle aktiviert und im Anschluss daran geprüft, ob selbiger wirklich aktiv ist. Falls nicht, folgt auch hier der Funktionsabbruch. Anschließend werden die im Bereich der MS-Ebene eingetragenen Spannungen und Phasenwinkel der einzelnen Phasen in Abhängigkeit der aktuellen Stufenposition als Startwerte an die Quelle übertragen. Es folgt der Versuch, eine Verbindung mit dem, in der Netznachbildung integrierten, Messgerät PAC4200 von SIEMENS[®] herzustellen. Gelingt auch dies, endet die Initialisierung mit dem Freigeben des Start-Buttons und der Anzeige eines Abbruch-Buttons. Fast alle der angesprochenen Ereignisse erscheinen ebenfalls im Meldungsfenster und können so mitverfolgt werden. Im Falle eines Fehlers erscheint jeweils zusätzlich eine Fehlermeldung.

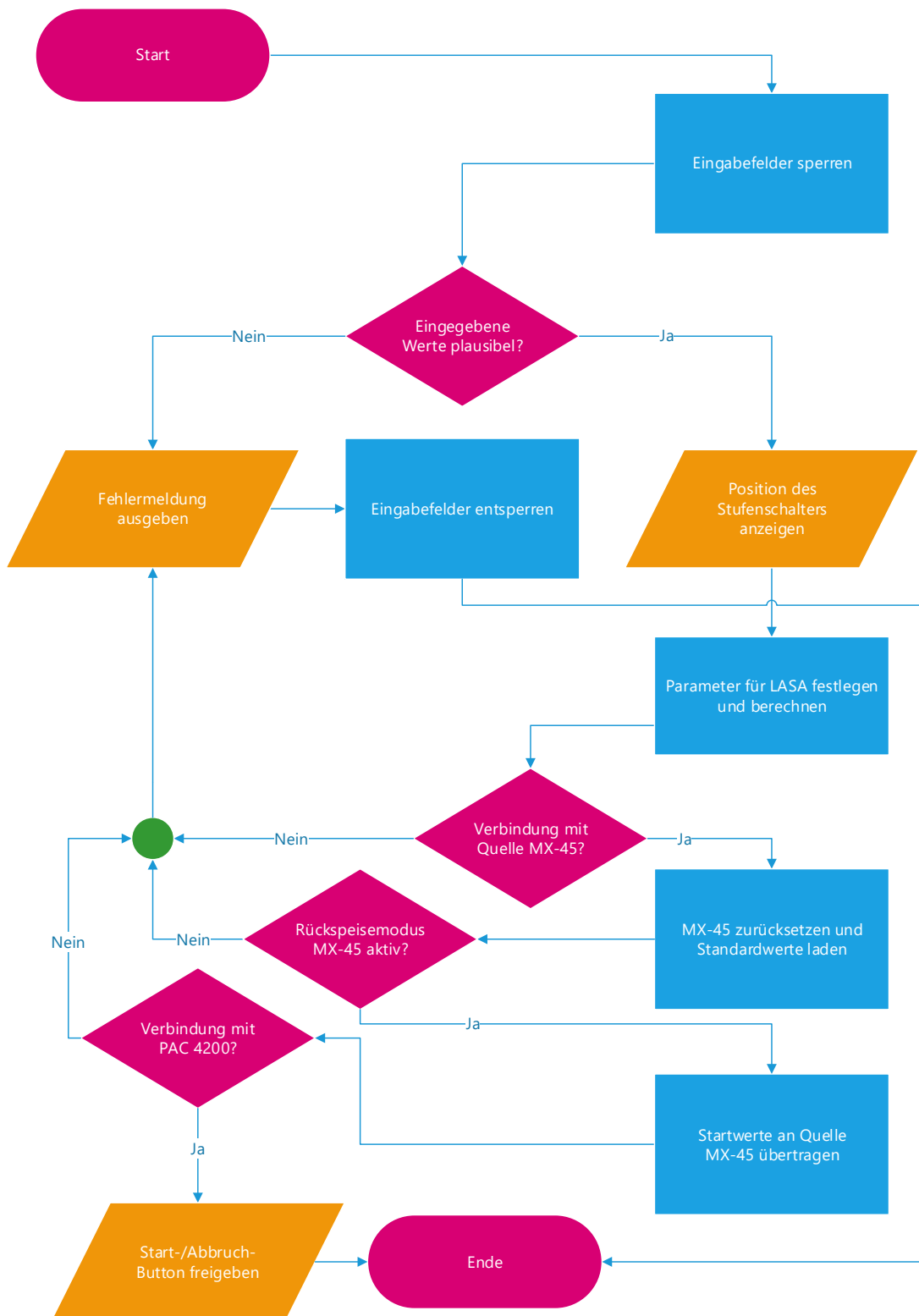


Abbildung 3.18. – Programmablaufplan der Simulationsinitialisierung

Stufenschaltung

Bei Betrachtung der Daten des regelbaren Ortsnetztransformators fällt der Begriff der Stufenspannung auf, welcher in Form eines Prozentwertes angegeben wird. Jedoch gibt es keine nähere Erläuterung, auf welchen Wert sich die Prozentangabe bezieht. Zuerst würde man annehmen, dass sich die Spannungsdifferenz bei der Stufenschaltung an dem Wert der Bemessungsspannung des Transformators orientiert. Demnach würde sich laut 3.1 die Ausgangsspannung eines Verteiltransformators mit einer Stufenspannung von 2,5% jeweils um etwa 5,8 Volt pro Phase verändern.

$$U_{\text{Stufe}} = \frac{400V}{\sqrt{3}} \cdot 0,025 = 5,7735V \quad (3.1)$$

Betrachtet man jedoch die Messdaten des realen rONT (siehe Kapitel 4.1), fällt auf, dass die Spannungsänderung keinesfalls konstant ist. Tabelle 3.2 zeigt beispielhaft die Spannungsdifferenzen der Stufenschaltungen eines Teils der Messdaten. Ausgehend von einer erhöhten Spannung auf der Oberspannungsseite des regelbaren Ortsnetztransformators mit einer Stufenspannung von 2,5%, schaltete der rONT hier, von seiner Nullposition in Stufe 5 aus, hoch bis auf Stufe 9, um die Ausgangsspannung auf einen Wert innerhalb der Schaltgrenzen einzustellen. Die Differenz ist jeweils auf die vorhergehende Stufe bezogen.

Stufe	6	7	8	9
Spannungsdifferenz	-6.2V	-5.85V	-5.6V	-5.3V

Tabelle 3.2. – Spannungssprünge des realen rONT

Bei näherer Betrachtung der Differenzen aus Tabelle 3.2 scheint es so, als würde der regelbare Transformator um jeweils in etwa 2,5% der aktuellen Spannung auf der Niederspannungsseite stufen. Die Werte dieser Überlegung stimmen jedoch nicht exakt überein. Erklären lässt sich dieses Verhalten über eine Veränderung des Übersetzungsverhältnisses, welches pro Stufe um 2,5% des Nenn-Übersetzungsverhältnisses variiert wird. Der Ortsnetztransformator stuft also um 2,5% der Windungszahl seiner Wicklungen und damit in etwa um den zunächst angenommenen Wert von 2,5% der aktuell anliegenden Spannung. Die Stufung erfolgt dabei nach dem, in Abbildung 2.1 gezeigten, Prinzip des Widerstandsschnellschalters. Über Formel 3.2 lässt sich der exakte Wert der Ausgangsspannung eines rONT mit einer Stufenzahl von insgesamt 9 symmetrisch aufgeteilten Stufen und einer Stufenspannung von 2,5%, ausgehend vom Wert der oberspannungsseitigen Spannung, der eingelegten Stufe s und dem Nenn-Übersetzungsverhältnis \bar{u}_N berechnen. Die nach der Formel berechneten Ergebnisse zeigt Tabelle 3.3.

$$U_{US} = \frac{U_{OS}}{\ddot{u}_N \cdot [1 - 4 \cdot 0,025 + (s - 1) \cdot 0,025]} \quad (3.2)$$

Stufe	6	7	8	9
Spannungsdifferenz	-6.155V	-5.862V	-5.589V	-5.335V

Tabelle 3.3. – Spannungssprünge nach Formel 3.2

In der entwickelten MATLAB[®]-Applikation wird jede Stufenschaltung über die Funktion „SetTapPos“ eingeleitet. Den Programmablauf zeigt Abbildung 3.19. Sofern nicht bereits die niedrigste oder höchste Stufe des simulierten regelbaren Ortsnetztransformators erreicht ist, werden zunächst die aktuellen Spannungswerte jeder Phase von der Quelle MX-45 abgefragt. Falls als Regelalgorithmus die manuelle Stufung ausgewählt ist, werden je nach neuer Position des Stufenschalters die Buttons zum Schalten deaktiviert beziehungsweise wieder aktiviert. Ausgehend von den abgefragten Spannungswerten, wird zunächst die Spannung auf der imaginären Oberspannungsseite des Transformators berechnet. Ausgehend von diesen Werten und mit Formel 3.2 werden die neuen Ausgangsspannungen nach erfolgter Umschaltung und die Spannungen während des Schaltvorgangs berechnet. Durch den kurzzeitigen Kontakt sowohl mit der alten, als auch mit der neuen Anzapfung bei der Stufung nach dem Prinzip des Jansen-Schalters (siehe Abbildung 2.1) entsteht eine Spannung, die zwischen den Werten vor und nach der Stufenschaltung liegt. Anhand der Messdaten des realen rONT (siehe Kapitel 4) und Versuchen, bei denen mit dem DEWETRON-Messgerät der zeitliche Verlauf der Spannung analysiert wurde, konnte für die Nachbildung eine Zeit von 190 Millisekunden zwischen der Übertragung der Spannungswerte an die MX-45 verifiziert werden. Nach erfolgter Spannungsänderung und damit der erfolgten Umschaltung wird die neue Position des Laststufenschalters schließlich in der Benutzeroberfläche angezeigt.

Üblicherweise wird beim regelbaren Ortsnetztransformator die Nummerierung der Anzapfungen des Laststufenschalters von der kleinsten bis zur größten Windungszahl durchgeführt. Je nach Hersteller des Transformators können die Anzapfungen jedoch auch umgekehrt nummeriert sein. Die maximale Windungszahl und damit das größte Übersetzungsverhältnis ist erreicht, wenn Anzapfung 1 aufgeschaltet ist. Die Spannung liegt dort also auf ihrem niedrigsten Wert. Soll die Ausgangsspannung des rONT angehoben werden, muss eine Anzapfung mit höherer Nummer gewählt werden, wodurch sich die überspannungsseitige Windungszahl und damit wiederum das Übersetzungsverhältnis verringert. Es besteht also ein konformer Zusammenhang zwischen der Nummerierung der Anzapfungen und der Veränderung der Unterspannung. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Applikation zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators orientiert sich an der Nummerierung der Maschinenfabrik Reinhausen und damit entgegengesetzt zu dieser Konvention. Eine Erhöhung der Stufenposition bewirkt also ein höheres Übersetzungsverhältnis und dadurch eine Absenkung der

Spannung auf der Sekundärseite des Transformators. Demnach äußert sich eine niedrigere Stufe in Form einer höheren Ausgangsspannung. Die höchste Sekundärspannung ist also erreicht, wenn sich der Laststufenschalter auf Position 1 befindet.

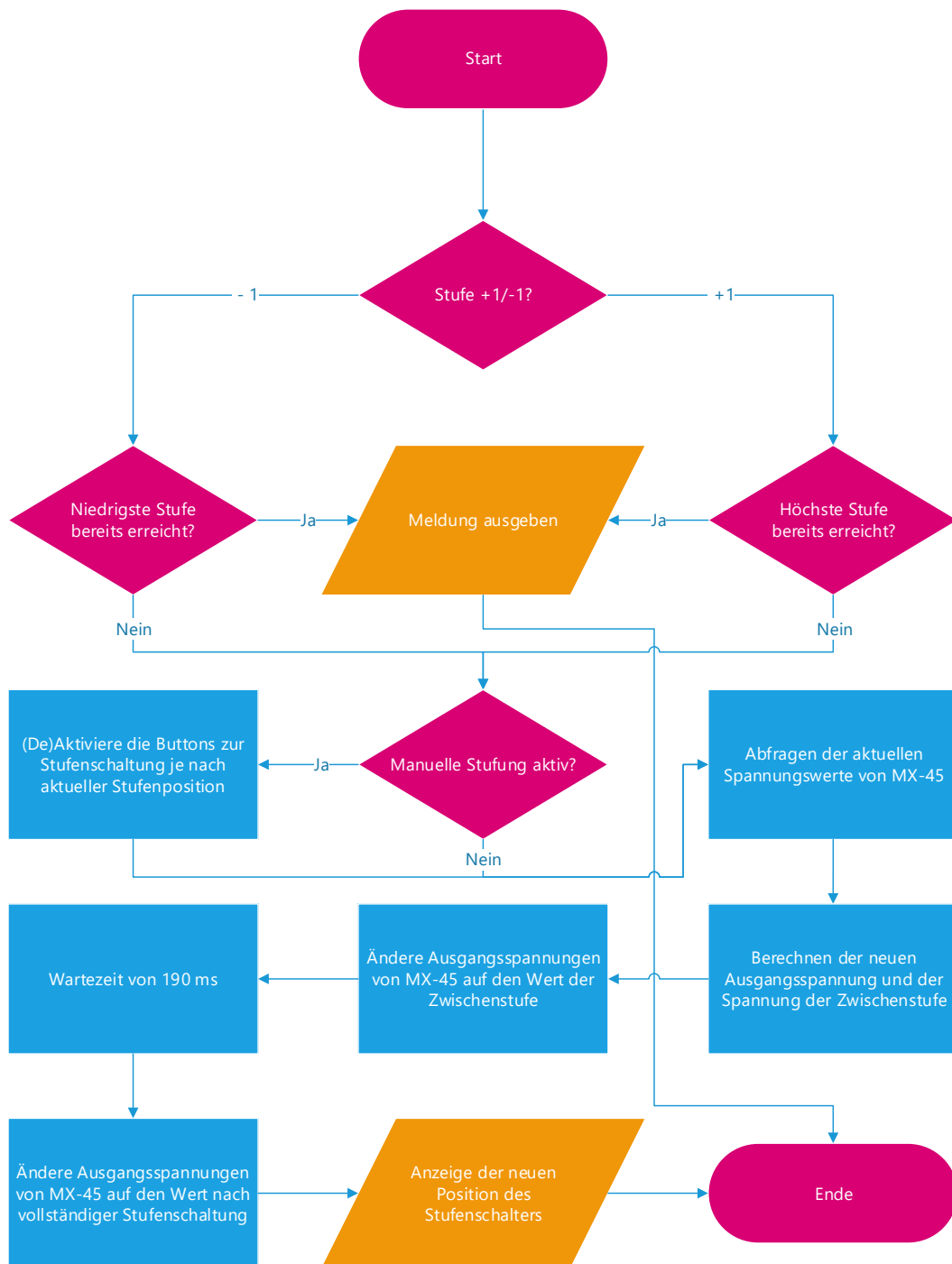


Abbildung 3.19. – Programmablaufplan der Stufenschaltung

3.2.4. Implementierte Regelalgorithmen

Alle implementierten Regelalgorithmen sind auf Basis einer while-Schleife aufgebaut und besitzen ein identisches Grundgerüst. Mit dem Beginn der Simulation wird das Ausgangsrelais der Spannungsquelle MX-45 geschlossen und nach einer Wartezeit von einer Sekunde tritt das Programm mit dem Start des Zählers für die Gesamtlaufzeit der Nachbildung in die Regelschleife ein. Dort wird zunächst die Zeitmessung für die Schleifendauer neu gestartet und nach einer programmiertechnisch notwendigen Pause von 100 Millisekunden werden aktuelle Messwerte der Spannungen, Ströme und $\cos(\varphi)$ der einzelnen Phasen vom PAC4200 und von der Quelle abgefragt. Daraus werden anschließend direkt die Werte der Wirk-, Blind- und Scheinleistung berechnet und zusammen mit den zuvor abgefragten Werten in der grafischen Benutzeroberfläche angezeigt. Auf den Messaufruf folgt ein für jeden Algorithmus spezifischer Teil, der in dem jeweils entsprechenden Segment der folgenden Abschnitten näher erläutert wird. Abschließend werden die aktuellen Messergebnisse im Spannungsprofil und in der Kennlinie der lastabhängigen Sollwertanpassung sowie die Lauf- und Schleifenzeit des Programms in der Bedienoberfläche dargestellt. Sollte aufgrund einer Grenzverletzung der Timer für eine der Verzögerungszeiten gestartet worden sein, so wird dessen abgelaufene Dauer mit rotem Hintergrund angezeigt. Solange die Simulation nicht gestoppt wird, wiederholt sich der beschriebene Ablauf wieder und wieder. Die durchschnittliche Schleifenzeit beläuft sich auf etwa 1,1 bis 1,2 Sekunden und liegt damit nah an dem Wert realer regelbarer Ortsnetztransformatoren, die den aktuellen Messwert einmal pro Sekunde mit den eingestellten Grenzwerten vergleichen. Dies gewährleistet eine realitätsnahe Nachbildung. Lediglich im Moment des Schaltvorganges liegt die Schleifendauer durch die erneute Abfrage der Spannungswerte und die anschließende zweigeteilte Stufung der Spannung mit durchschnittlich 1,6 und maximal 1,8 Sekunden höher. Den größten Teil der Schleifenzeit nimmt die Abfrage der Strom- und $\cos(\varphi)$ -Werte von der Quelle MX-45 mit 700 bis 800 Millisekunden ein. Die Spannungswerte werden vom PAC4200 innerhalb von durchschnittlich höchstens 20 Millisekunden übertragen. Die vergleichsweise hohe Antwortzeit der Spannungsquelle hängt damit zusammen, dass selbige, bei Anfrage aktueller Messwerte, zuerst nochmals alle von ihr erfassten Werte misst beziehungsweise berechnet und abschließend auf Plausibilität prüft. Die Aufteilung der Schleifenzeit verdeutlicht Abbildung 3.20.

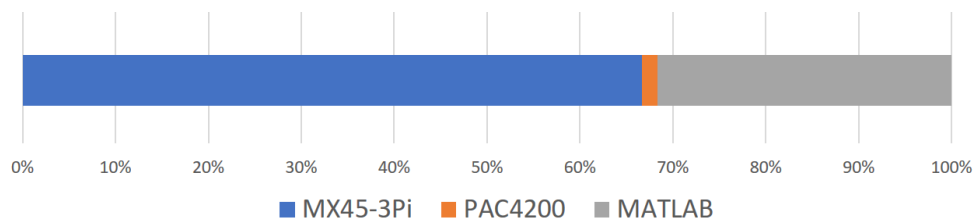


Abbildung 3.20. – Anteile der Schleifenzeit

Schnellschaltung

Der Algorithmus Schnellschaltung berücksichtigt nur die Schnellschaltgrenzen und ändert beim Erreichen des Grenzwerts nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit und des Schaltverzugs die Ausgangsspannung der Quelle MX-45 der Stufenschaltung entsprechend ab. Fällt die Spannung während dieser Zeit wieder in den erlaubten Bereich, findet keine Schaltheandlung statt. Den Programmablaufplan zeigt Abbildung 3.21.

Totzeit

Die Auswahl des Totzeit-Algorithmus ist das Pendant zur Schnellschaltung. Hierbei werden nur die eingestellten Grenzwerte für die Regeltotzeit beachtet. Bei Überschreitung der im Programm hinterlegten Schnellschaltgrenzen findet also keine nahezu unverzügliche Schaltung statt. Liegt die Spannung nach einer Grenzüberschreitung und somit während des Ablaufs der Regeltotzeit erneut innerhalb der Grenzwerte, wird auch hier nicht geschaltet. Der Programmablauf entspricht also ebenfalls Abbildung 3.21.

Totzeit und Schnellschaltung

Die Regelung mit Totzeit und Schnellschaltung ist eine Kombination der beiden bereits genannten Algorithmen. Dieser Algorithmus ist in regelbaren Ortsnetztransformatoren standardmäßig implementiert und startet je nach Art der Grenzüberschreitung und im Anschluss an den Ablauf der entsprechenden Verzögerungszeit den Schaltvorgang des Laststufenschalters. Fällt die Spannung während der Zeitzählung wieder auf einen Wert innerhalb der Grenzen, wird der Zähler zurückgesetzt. Abbildung 3.21 zeigt auch hier den Programmablauf und veranschaulicht die Regelschleife. Der Unterschied zu den beiden vorhergehenden Algorithmen liegt darin, dass nun alle vier Grenzwerte aus der Benutzeroberfläche berücksichtigt werden.

Lastabhängige Sollwertanpassung

Die lastabhängige Sollwertanpassung stellt eine spezielle Form der Regelung dar. Hier ist der Sollwert der Spannung und damit auch die Grenzen für die normale und die Schnellschaltung nicht konstant. Der Sollwert wird mit jedem Schleifendurchgang anhand der gemessenen Leistung und der im Reiter 'LASA' eingetragenen Kennlinie neu festgelegt. Der Anwender hat dabei die Wahl, welcher Leistungswert hierfür berücksichtigt werden soll. Dafür kann im selben Reiter zwischen der Wirk-, der Blind- und der Scheinleistung entschieden werden. Die Grenzwerte für die Spannungen ändern sich genauso wie der Sollwert mit jedem

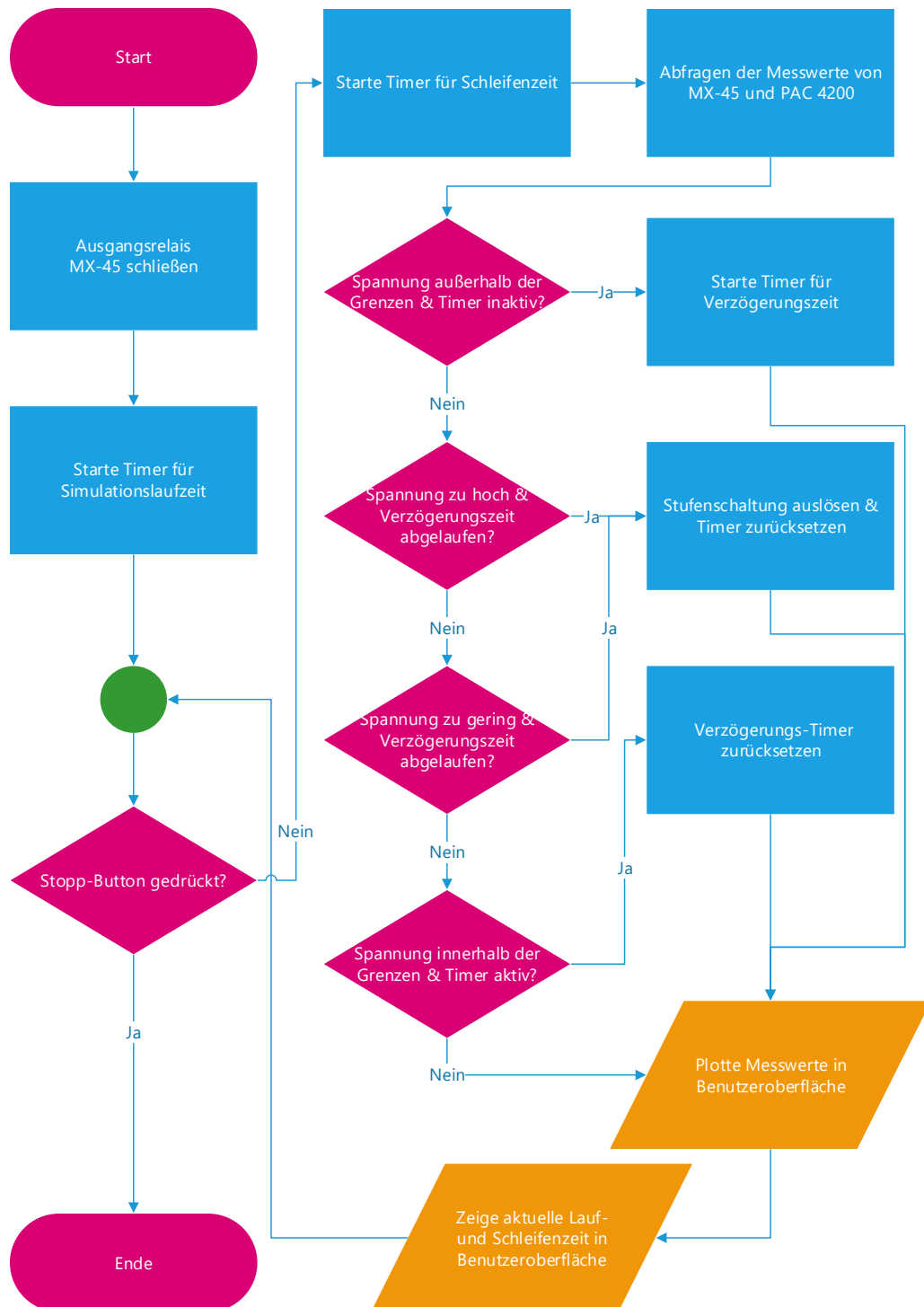


Abbildung 3.21. – Programmablaufplan bei Totzeit und Schnellschaltung

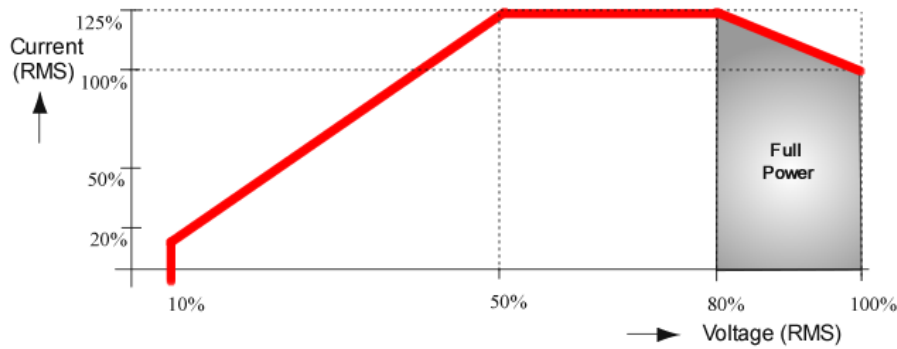


Abbildung 3.22. – Leistungskennlinie der Quelle MX-45 [6]

Durchgang der Regelschleife und folgen dabei den zu Beginn der Simulation eingestellten p.u.-Werten der jeweiligen Grenze. Während der Nachahmung des Verhaltens des regelbaren Ortsnetztransformators lässt sich der aktuelle Arbeitspunkt in der Kennlinie über einen schwarzen Punkt nachverfolgen. Die Skala geht dabei, ausgehend von einem Skalierungsfaktor von 1, von -50kVA bis +50kVA. Die absolut maximale theoretische Leistung der Quelle liegt laut Abbildung 3.22 bei 56,25kVA. Werte, die oberhalb der in der Kennlinie definierten Endpunkte von 50kVA liegen, werden auf den Wert der Sollspannung am Grenzpunkt geregelt. Durch den Skalierungsfaktor lassen sich Transformatoren höherer Leistungsklassen abbilden. Dazu werden zunächst die fließenden Ströme mit dem Skalierungsfaktor multipliziert, wodurch sich der Spannungsfall über der Transformator-Reaktanz nach 3.3 beziehungsweise 3.4 ebenfalls linear vervielfacht. Selbstverständlich ist die Nutzung der Skalierung bei allen implementierten Regelalgorithmen möglich. Die angepassten Werte werden wie gewohnt in der Benutzeroberfläche im Messdaten-Bereich angezeigt.

$$\Delta U = U_{\text{PAC4200}} - U_{\text{MX-45}} \quad (3.3)$$

$$\Delta U = I_{\text{Trafo}} \cdot Z_{\text{Trafo}} = (I_{\text{MX-45}} \cdot \text{scale}) \cdot Z_{\text{Trafo}} \quad (3.4)$$

Zeitlich gesehen entspricht der Algorithmus im Wesentlichen dem der Kombination aus Totzeit und Schnellschaltung. Der Unterschied besteht darin, dass bei der lastabhängigen Sollwertanpassung die Grenzwerte nicht verbindlich festgelegt sind, sondern sich mit der Laufzeit der Simulation stets dynamisch verändern. Es werden also vor der Entscheidung, ob ein Grenzwert verletzt wurde, stets alle Begrenzungen neu definiert. Abbildung 3.23 veranschaulicht den Programmablauf, der sich nur im genannten Punkt von dem der Totzeit und Schnellschaltung (Abbildung 3.21) unterscheidet.

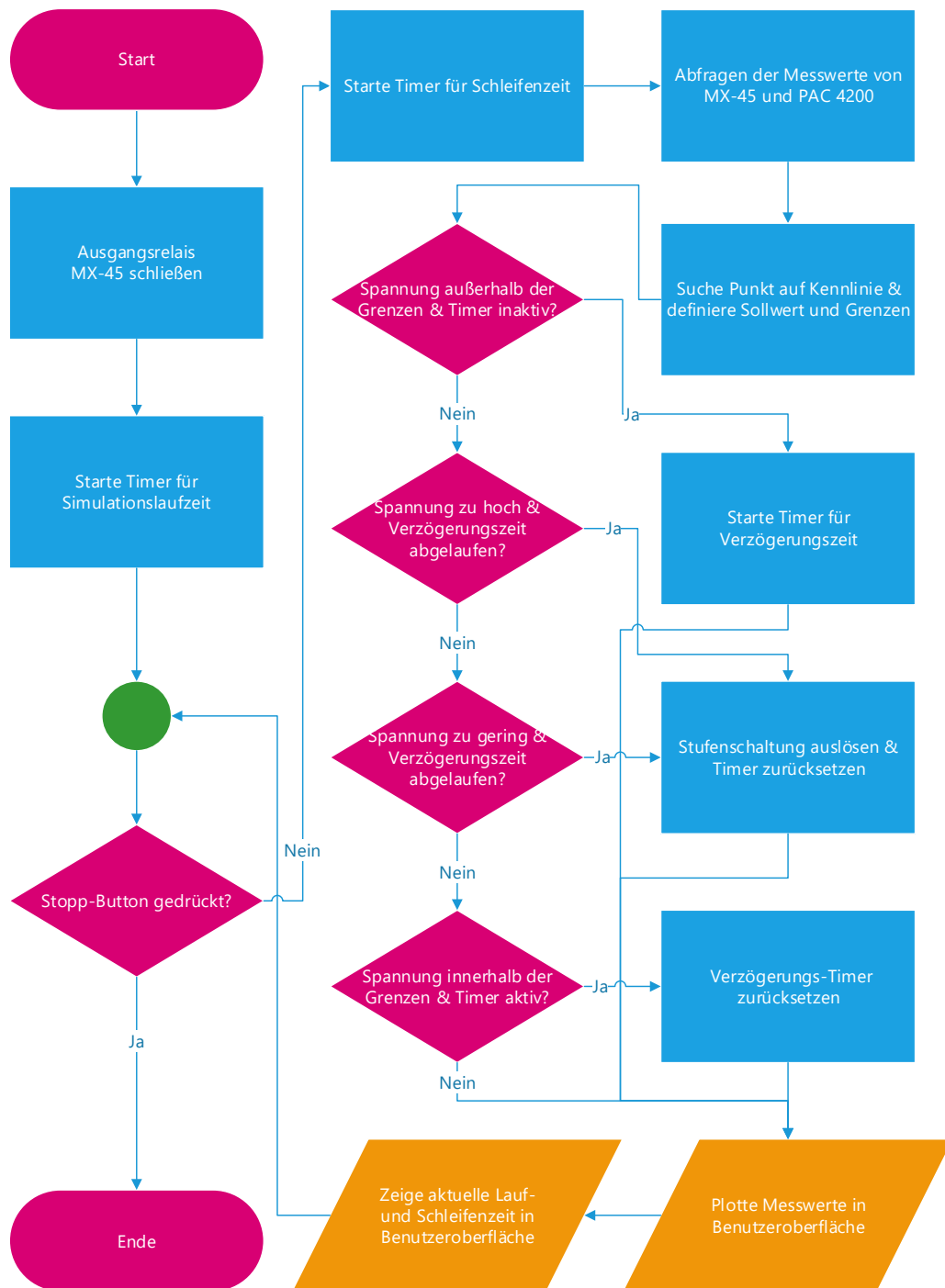


Abbildung 3.23. – Programmablaufplan bei Lastabhängiger Sollwertanpassung

Manuelle Stufung

Die manuelle Stufung beinhaltet keine selbstständige Regelung. Hier kann über zwei Buttons auf der Benutzeroberfläche eine Stufenschaltung in die jeweilige Richtung eingeleitet werden. Dabei wird lediglich der eingestellte Schaltverzug berücksichtigt. Abbildung 3.24 zeigt den Programmablaufplan des Algorithmus.

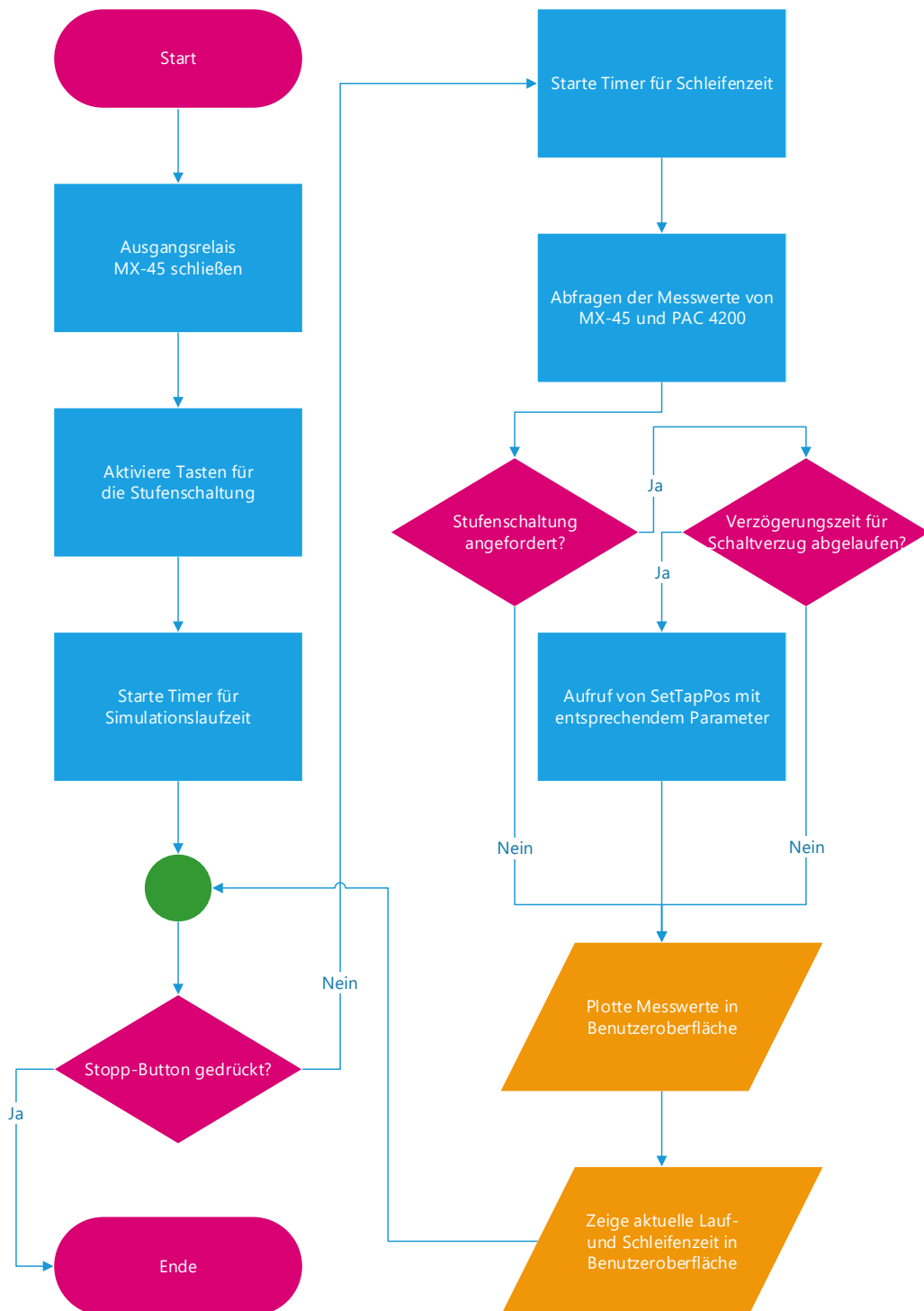


Abbildung 3.24. – Programmablaufplan bei manueller Stufung

4. Validierung der Hardwarenachbildung anhand realer Messdaten

Um die Qualität der in dieser Arbeit entwickelten Applikation zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators abschätzen zu können, wurde ein Vergleich mit Messdaten eines realen rONT durchgeführt. Dieses Kapitel beschäftigt sich nun mit dem Nachweis einer korrekten Nachbildung durch die erstellte Applikation.

4.1. Messdaten

Zur Validierung der mit dieser Arbeit erstellten MATLAB[®]-Applikation wurden hoch aufgelöste Messdaten eines realen regelbaren Ortsnetztransformators genutzt, die im Rahmen des gemeinschaftlichen Forschungsprojekts U-Control an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen gemessen wurden. Im Transformator kam dabei ein GRIDCON iTAP Stufensteller der Maschinenfabrik Reinhausen zum Einsatz, welcher den Vorgänger des, bereits auf Seite 8 erwähnten, ECOTAP VPD darstellt. Abgesehen von der Mechanik unterscheiden sich die beiden Generationen nur minimal in ihren Eigenschaften. Für die Messung wurde eine 90 kVA Spannungsquelle als Netzsimulator an einen gewöhnlichen DY5N-Transformator mit 0.4/10 kV angeschlossen. Ausgehend von diesem wurde der gemessene Ortsnetztransformator über ein 30 Meter langes Mittelspannungskabel versorgt und schließlich wurden die RMS-Werte der Sekundärseite des geregelten Spannungswandlers über ein DEWETRON-Messgerät mit einer Abtastrate von 10kHz gemessen und aufgezeichnet. Den genauen Messaufbau und die Parametrierung des regelbaren Ortsnetztransformators verdeutlicht Abbildung 4.1.

Zur Validierung der Nachbildung des Verhaltens eines realen regelbaren Ortsnetztransformators diente ein 350 Sekunden langer charakteristischer Ausschnitt aus den gesamte Messdaten der RWTH Aachen. Abbildung 4.2 zeigt die vorgegebene Spannung durch den Netzsimulator und die Ergebnisse der Messung an der Unterspannungsseite des Ortsnetztransformators. Die Stufenschaltungen sind dabei deutlich und eindeutig erkennbar. Ebenso geht daraus sofort das große Potential hervor, welches ein zusätzlicher Laststufenschalter im Bereich des Verteilnetzes mit sich bringt. So ist der Ortsnetztransformator, bedingt durch seine aktive

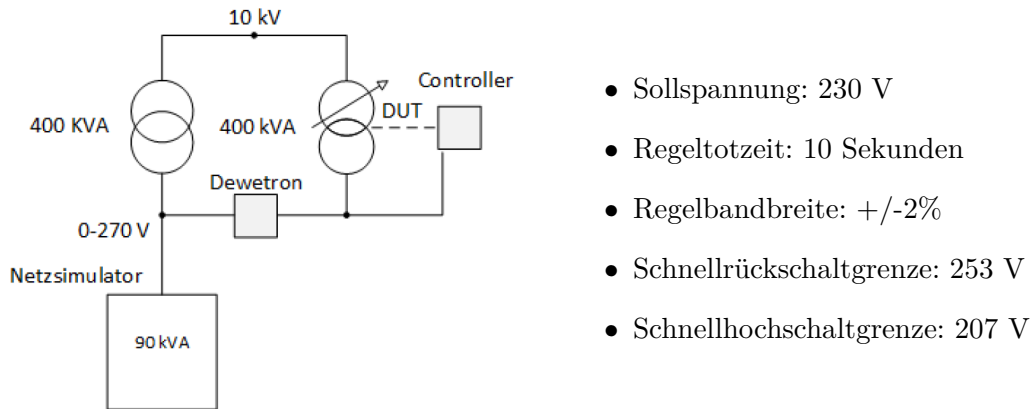


Abbildung 4.1. – Messaufbau und rONT-Parametrierung an der RWTH Aachen

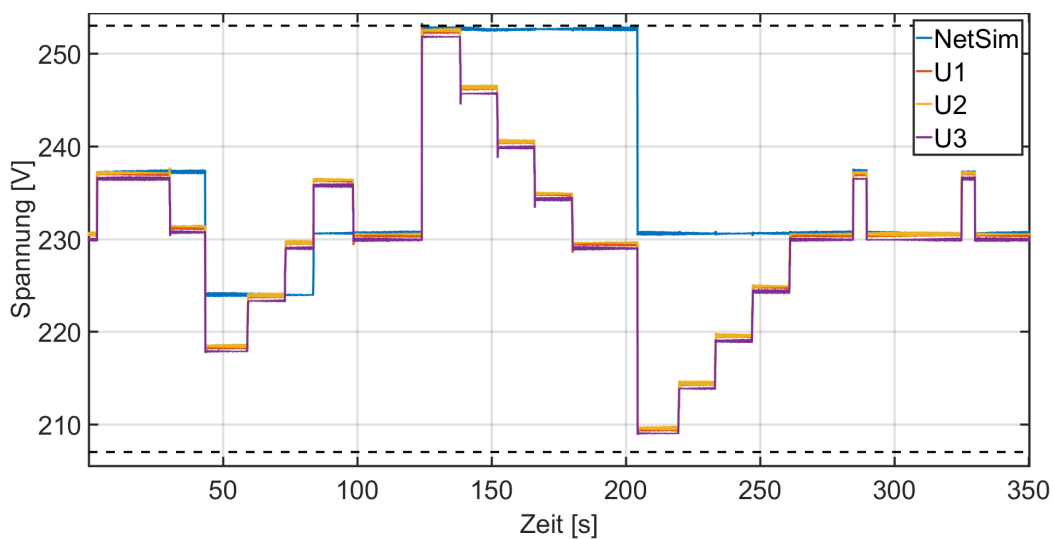


Abbildung 4.2. – Ausschnitt aus der Messung des realen rONT

Regelung, in der Lage, selbst bei deutlichen Spannungsschwankungen im Mittelspannungsnetz das Spannungsniveau auf Seite der Niederspannung im validen Bereich zu halten.

4.2. Verifizierung der Nachbildung

Zur Verifizierung der erstellten MATLAB[®]-App wurde nun die, bei der Messung des realen rONT verwendete, Spannung des Netzsimulators mit in das Programm eingebunden. Da hierzu nur die Spannungsquelle MX-45, die gleichzeitig den regelbaren Ortsnetztransformator darstellt, vorhanden war, mussten die jeweiligen Spannungswerte unter Berücksichtigung der momentan eingestellten Stufe in das Programm integriert werden. Durch den Schleifenbau der Regelung des simulierten Transformators würde eine stetige Nachführung

der Ausgangsspannung der Quelle die Regelung des rONT blockieren beziehungsweise zeitlich deutlich verzögern. Zur Validierung wurden deshalb nur die Spannungssprünge der Netzsimulator-Spannung inklusive der zugehörigen Sprungzeiten integriert. Dadurch und bedingt durch den Schleifenaufbau ergeben sich zwangsläufig zeitliche Abweichungen an den Sprungstellen der Spannung, die einen exakten Vergleich verfälschen würden. Abbildung 4.3 zeigt die gesamte Vergleichsmessung inklusive den zeitlichen Differenzen an den Sprungstellen. Abbildung 4.4 stellt zwei Detailansichten der Vergleichsmessung dar und verdeutlicht den zeitlichen Unterschied an den Sprungstellen. Trotz der Integration der Spannungssprünge in die Regelschleife fällt diese Differenz jedoch relativ gering aus. Zur besseren Darstellbarkeit wird in den folgenden Abbildungen jeweils nur die Spannung der ersten Phase betrachtet.

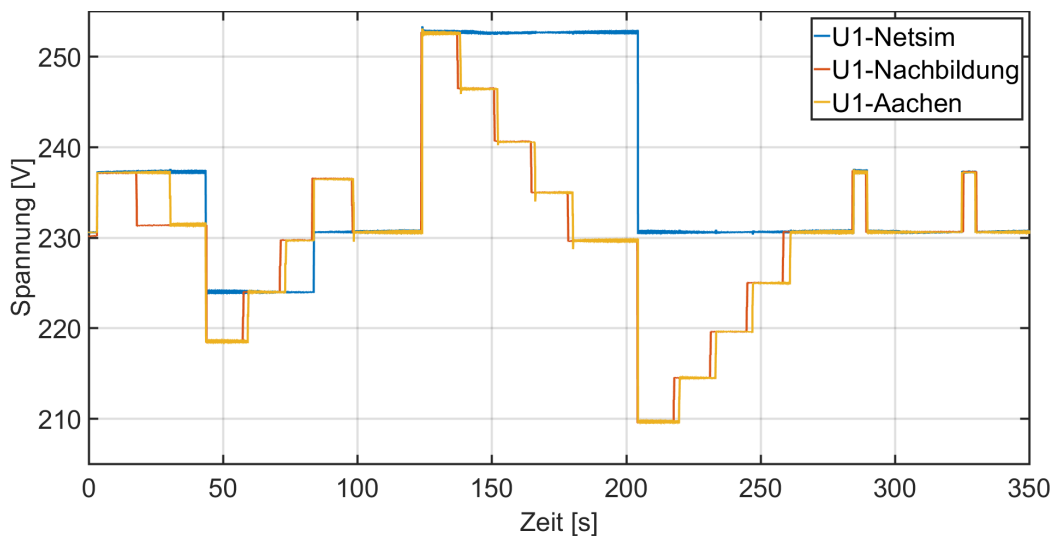


Abbildung 4.3. – Vergleich der Nachbildung mit den Messdaten aus Aachen

In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass der reale rONT bei den ersten beiden Stufenschaltungen merklich verzögert agiert. Als Erklärung dieses Verhaltens wird angenommen, dass die Steuerung des regelbaren Ortsnetztransformators nach dem Zuschalten an Netzspannung zunächst einige Vorgänge ausführt, bevor die Regelung überhaupt aktiv wird. Dazu könnten das Hochfahren der Steuerung, Selbsttests, RMS-Bildung sowie weitere Abläufe zählen. Die erste Schalthandlung des realen rONT erfolgt laut den Messdaten der RWTH Aachen erst volle 27 Sekunden nach Spannungsanhebung. Da als Totzeit zehn Sekunden eingestellt waren und der rONT steuerungsbedingt ungefähr 3 Sekunden zusätzlich benötigt, bis die Schalthandlung vollzogen wird, weicht der Wert des realen rONT hier deutlich von den Ergebnissen späterer Schaltvorgänge ab. Die Annahme ist also durchaus plausibel. Die zweite Schalthandlung erfolgt ebenso verzögert. Diesmal etwa 15,7 Sekunden nach dem Spannungssprung. Erst bei der dritten Stufenschaltung gleicht sich der regelbare Ortsnetztransformator der Nachbildung an und die Dauer bis zur Stufe beläuft sich in etwa auf den selben Wert von rund 13,7 Sekunden. Die Regelung des rONT folgt also erst nach dieser Anfangsphase

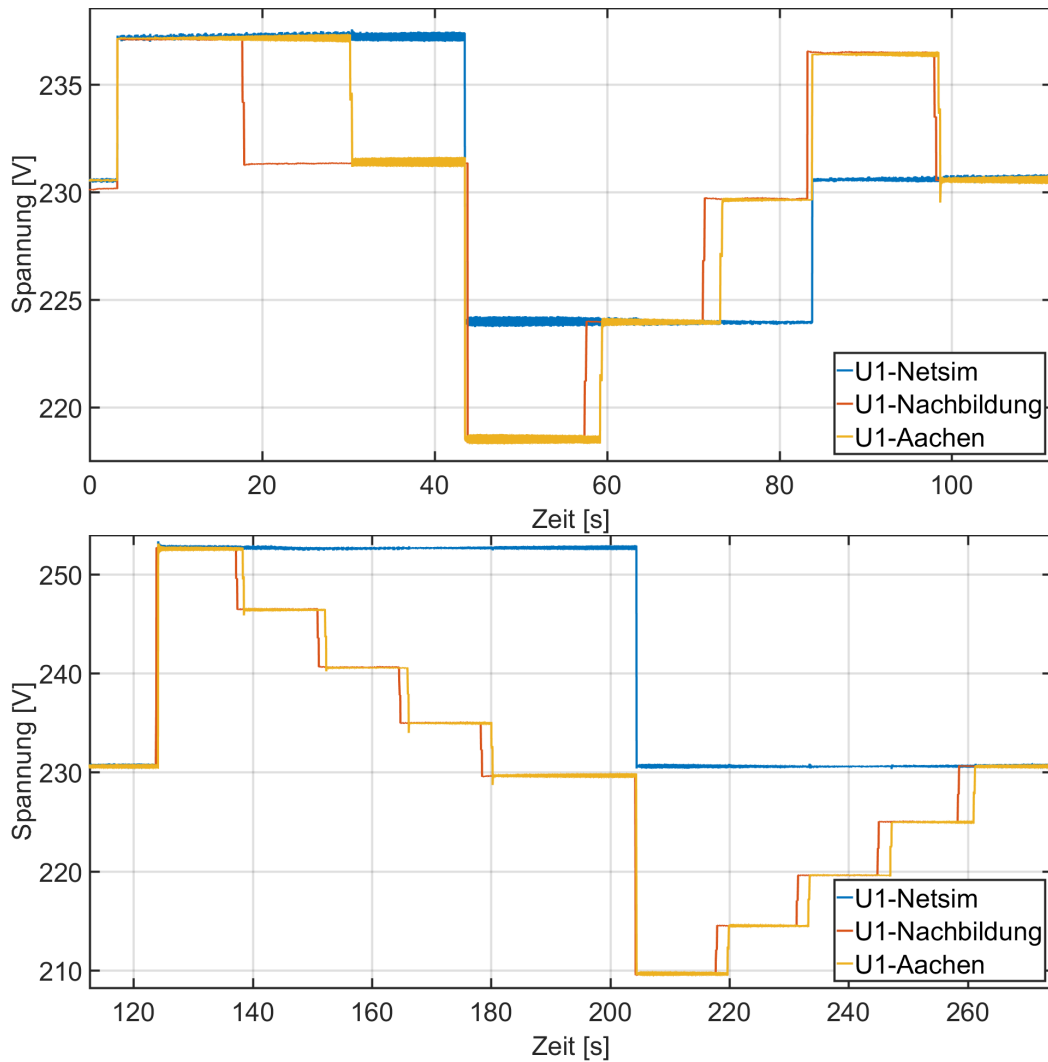


Abbildung 4.4. – Detailansichten des Vergleichs mit den Messdaten aus Aachen

korrekt den eingestellten Grenzwerten und Verzögerungszeiten. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Nachbildung simuliert folglich einen regelbaren Ortsnetztransformator im stationären Zustand.

Exakte Vergleichswerte zur Validierung der Nachbildung sind in den Abbildungen 4.5 und 4.6 dargestellt. Abbildung 4.5 zeigt die exakten Werte der statischen Spannungsabweichung nach den Stufenschaltungen. Abbildung 4.6 visualisiert die zeitliche Abweichung der jeweiligen Schaltvorgänge. Dafür wurden die Zeitpunkte der Spannungssprünge exakt aufeinander abgestimmt, um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zur erhalten. Der Vergleich zwischen realem rONT und der Nachbildung zeigt, dass der, in Abbildung 4.5 in blau abgebildete, Mittelwert der statischen Spannungsabweichung lediglich 0,0448 Volt beträgt. Die betragsmaximale Abweichung beläuft sich auf nur 0,1597 Volt.

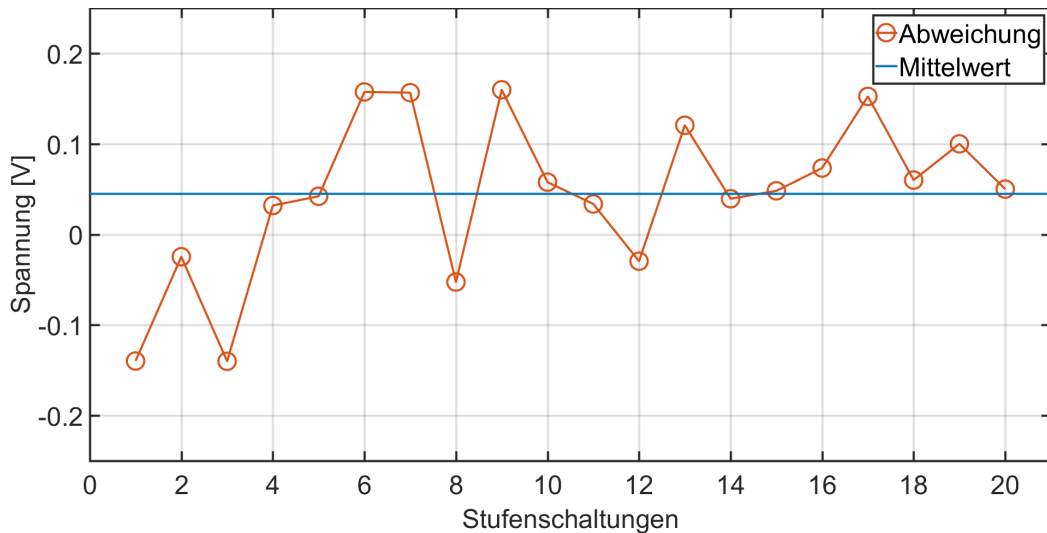


Abbildung 4.5. – Statische Spannungsabweichung zwischen Nachbildung und realem rONT

Laut der oberen Grafik in Abbildung 4.6 beträgt die, in blau dargestellte, zeitliche Deviation der Stufenschaltungen im Mittel etwa 2,43 Sekunden. Vernachlässigt man die ersten drei Stufen aufgrund der Einschwingphase der realen Regelung, so ergibt sich ein mittlerer Wert von 1,35 Sekunden, der in rot dargestellt ist. Die Abweichungen erscheinen zunächst relativ hoch. Betrachtet man jedoch die untere Grafik in Abbildung 4.6 fällt auf, dass die Zeiten bis zur jeweiligen Stufenschaltung beim realen rONT wesentlich stärker schwanken, als in der angefertigten Nachbildung. Laut Einstellungen und Bedienungsanleitung [7] sollte der regelbare Ortsnetztransformator 13,3 Sekunden nach dem Spannungssprung schalten. Die untere Darstellung zeigt die zeitliche Abweichung der einzelnen Stufenschaltungen bezogen auf den Referenzwert von 13,3 Sekunden. Die vergleichsweise deutlich stärker schwankenden Zeitwerte bis zur Stufenschaltung des realen regelbaren Ortsnetztransformators lassen sich nicht dynamisch nachbilden. Die Abweichungen sind bei der Nachbildung nur von der jeweiligen Position innerhalb der Regelschleife bei Spannungsänderung abhängig. Ähnlich verhält es sich natürlich beim realen regelbaren Ortsnetztransformator, nur scheint hier die Divergenz größer zu sein. Das verdeutlicht auch der Mittelwert der bezogenen Abweichung. Liegt dieser bei der Nachbildung bei lediglich 325 Millisekunden, beträgt selbiger Wert im Falle des in Aachen gemessenen rONT ganze 1,884 Sekunden. Vernachlässigt man auch hier die ersten drei Stufen, so ergibt sich mit 681 Millisekunden immer noch ein mehr als doppelt so hoher Wert als bei der Nachbildung, welcher in diesem Fall eine mittlere Abweichung von 248 Millisekunden besitzt. Die zeitlichen Abweichungen beruhen also hauptsächlich auf dem Einschaltvorgang der rONT-Regelung und auf den zeitlich verhältnismäßig inkonsistenten Verzögerungszeiten bis zur Stufenschaltung.

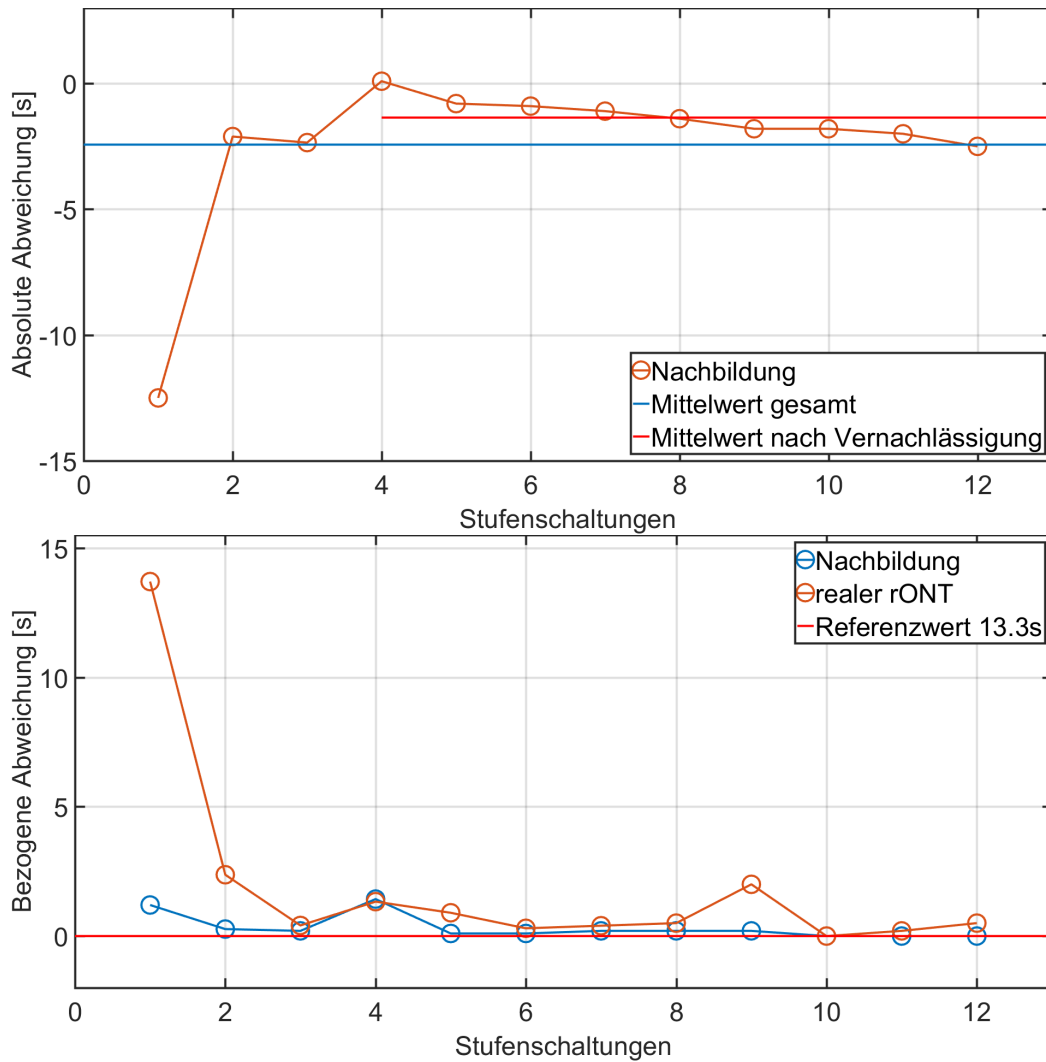


Abbildung 4.6. – Zeitliche Abweichungen der Stufenschaltungen

Zur exakten Nachbildung des realen regelbaren Ortsnetztransformators wurde auch die, während des Schaltvorgangs, durch die kurzzeitige Verbindung mit beiden Kontakten, auftretende, Zwischenstufe implementiert und soll dementsprechend ebenfalls validiert werden. Abbildung 4.7 zeigt eine zufällig ausgewählte Stufenschaltung der Vergleichsmessung zwischen der Nachbildung und den Messdaten der RWTH Aachen. Der reine Schaltvorgang inklusive Zwischenstufe nimmt in etwa 210 Millisekunden in Anspruch. Wie in der Abbildung ersichtlich, folgt die Spannung des simulierten rONT annähernd exakt der des realen Ortsnetztransformators. Die Zwischenstufe wurde folglich nahezu perfekt nachgebildet.

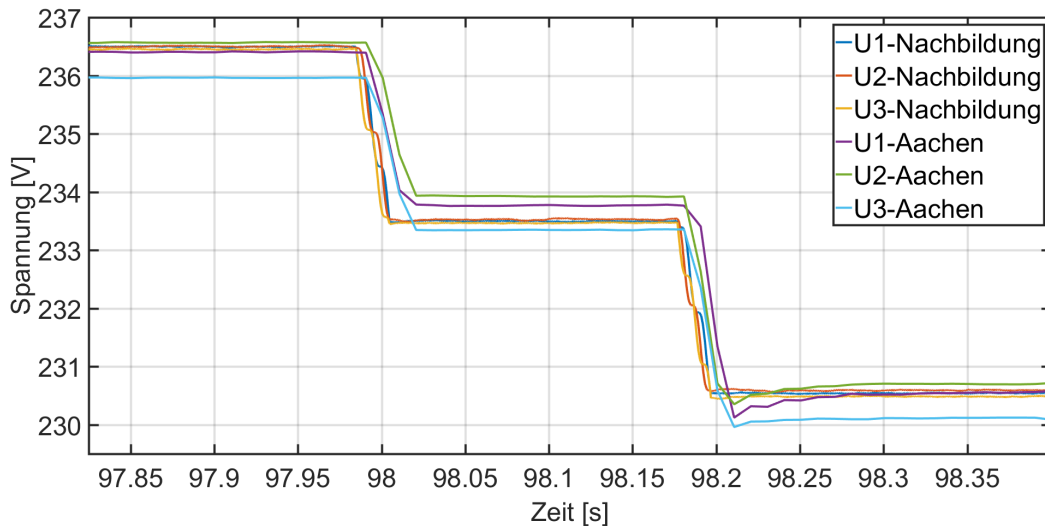


Abbildung 4.7. – Detailvergleich der Stufenschaltung hinsichtlich der Zwischenstufe

Für den implementierten Algorithmus der lastabhängigen Sollwertanpassung standen keine Referenzwerte zur Verfügung. Ein Grund dafür liegt in der noch geringen Verbreitung dieser Regelungsart im Niederspannungsnetz. Grundlage einer an den jeweiligen Lastfluss angepassten, geregelten Ausgangsspannung ist stets eine auf das spätere Einsatzgebiet spezialisierte Kennlinie der Regelung des regelbaren Ortsnetztransformators. Die aufwendige Berechnung und Anpassung dieser Kennlinie, die für jeden rONT individuell erfolgen muss, verursacht zusätzliche Kosten für den Netzbetreiber. Die Standard-Regelung mit Totzeit und Schnellschaltung ist deshalb nach wie vor das beliebteste Regelkonzept. Zur Validierung des implementierten Algorithmus wurde im Netzlabor über einen Wechselrichter Leistung in das Netz eingespeist. Hierfür wurde die in der Applikation standardmäßig hinterlegte Kennlinie aus Abbildung 3.15 genutzt. Da nur ein Umrichter benutzt wurde, wurde die Ausgangsspannung des simulierten rONT, mithilfe der Anpassungsmöglichkeiten über die imaginäre Mittelspannungs-Ebene, künstlich erhöht und mit 235 Volt sehr nah an den hinterlegten Grenzwert von 235,56 Volt herangeführt. Abbildung 4.8 zeigt den Verlauf der Spannung und die jeweiligen Arbeitspunkte auf der eingestellten Kennlinie der lastabhängigen Sollwertanpassung. Um die Auswirkung der Einspeisung durch den Wechselrichter zusätzlich zu erhöhen, wurde ein Skalierungsfaktor von 8 verwendet. Es wurde also ein Transformator der 400kVA-Klasse imitiert. Eine Einspeisung von 10kW im Netzlabor entspricht folglich 80kW im nachgebildeten Netz. Die Transformator-Induktivitäten waren während der Messung auf 0,3 mH eingestellt. Das untere Diagramm erklärt den Ablauf der Validierungs-Messung anschaulich. Nach Starten der Simulation wurde die Ausgangsspannung, wie bereits erwähnt, von 230,94 Volt auf 235 Volt erhöht. Anschließend wurde über den Wechselrichter eine Leistung von 6,5 kW in die Netznachbildung eingespeist. Dadurch stieg die Spannung über den laut Kennlinie zulässigen Grenzwert an und der simulierte regelbare Ortsnetztransformator

schaltete nach Ablauf der Totzeit eine Stufe nach oben, um die Spannung wieder auf einen Wert innerhalb der Grenzen einzustellen. Danach wurde die Einspeisung des Wechselrichters bis auf 500 W zurückgenommen, wodurch sich der Arbeitspunkt wieder nah an den Ausgangspunkt verschob. Ein Test hinsichtlich höherer Last am simulierten regelbaren Ortsnetztransformator war leider nicht möglich, da sich die elektronische Last im Rahmen anderer Arbeiten in Verwendung befand. Die Messung zeigt jedoch eindeutig, dass der Algorithmus korrekt implementiert wurde und einwandfrei funktioniert.

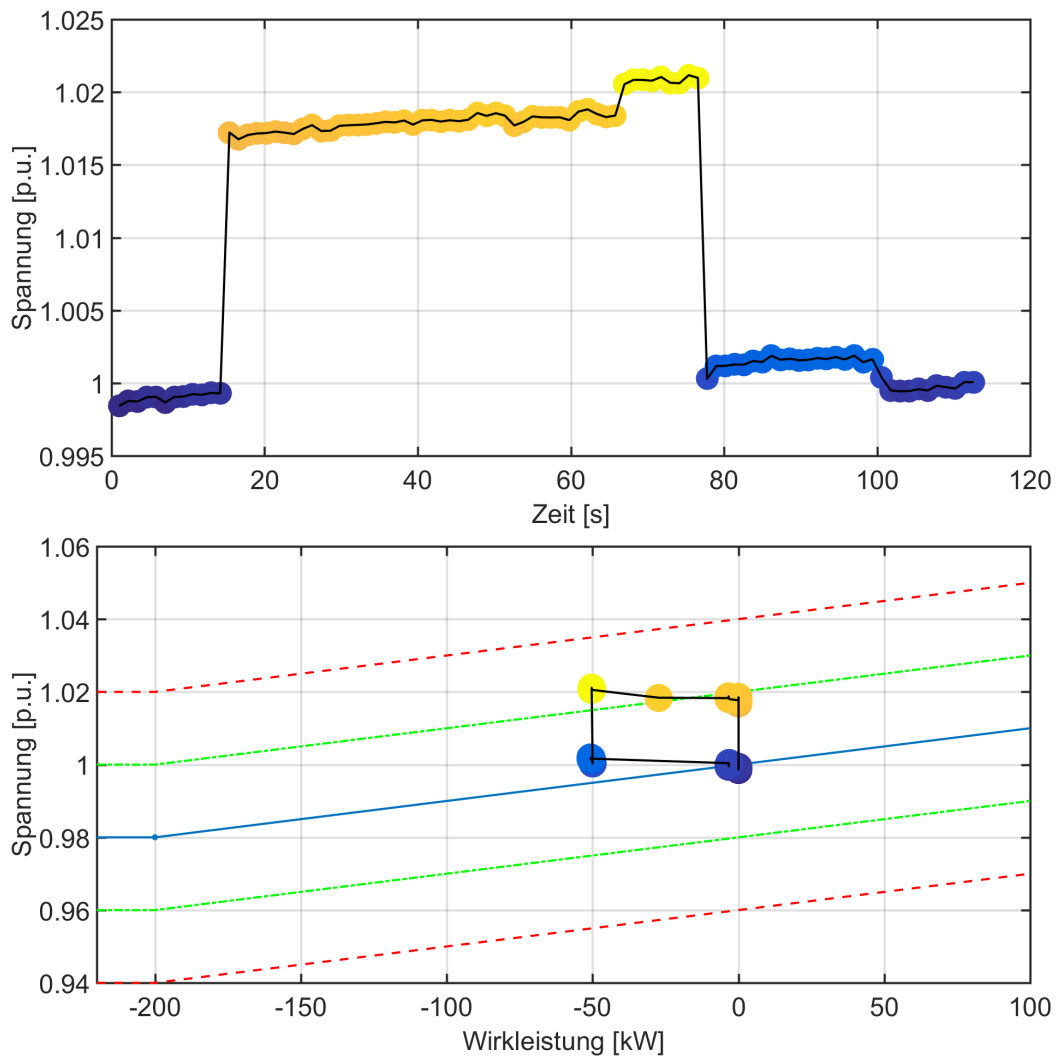


Abbildung 4.8. – Messung zur Validierung der lastabhängigen Sollwertanpassung

5. Validierung und Anpassung des vorhandenen Simulink[®]-Modells

Zusätzlich zur im Rahmen dieser Arbeit erstellten MATLAB[®]-Applikation zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators stand auch noch ein in Simulink[®] erstelltes EMT-Modell eines rONT zur Verfügung, welches ebenfalls validiert und mit den Messdaten der Nachbildung und der RWTH Aachen verglichen werden sollte. Das Modell wurde bereits im Vorfeld von einem anderen Studenten erstellt und berücksichtigt zusätzlich zu den in der Nachbildung angesprochenen Einstellungen auch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Phasen und deren Kopplung über den gemeinsamen Eisenkern innerhalb des Transformatorgehäuses. Das Simulink[®]-Modell besitzt jedoch keine Einstellmöglichkeit für die Verzögerungszeit im Falle einer Schnellschaltung. Das Modell schaltet hier sofort und berücksichtigt lediglich den hinterlegten Schaltverzug. Ebenso verfügt das Modell nur über den Algorithmus der Totzeit und Schnellschaltung und berücksichtigt keine Zwischenstufen während der Schaltvorgänge.

Zur Validierung wurde der Simulink[®]-Nachbildung direkt die Netzspannung vorgegeben, die auch zur Messung in Aachen verwendet wurde. Dazu wurde das vorhandene Modell leicht angepasst. Aus den RMS-Werten der RWTH wurden sinusförmige Spannungen auf Mittelspannungsniveau von 10 kV gebildet und der Imitation zugeführt. Die Schaltgrenzen wurden, genauso wie alle anderen Einstellungen, entsprechend den Vorgaben aus Aachen parametrisiert. Erste Testläufe zeigten, dass das Modell noch fehlerbehaftet sein musste. Nachdem der Fehler ausfindig gemacht und korrigiert worden war, folgte schließlich ein erfolgreicher Simulationsdurchlauf. Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis dieser Simulation im Vergleich mit den Messdaten aus Aachen und der angefertigten Nachbildung. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Spannungen wieder nur einphasig betrachtet.

Es lässt sich eindeutig erkennen, dass das Simulink[®]-Modell sehr gut mit den übrigen beiden Messungen übereinstimmt. Auffallend ist nur die Zeit zwischen den einzelnen Stufenschaltungen beziehungsweise zwischen Spannungssprung und Stufung. Diese beträgt erwartungsgemäß genau die vorab eingestellten 13,3 Sekunden. Die Detail-Ansichten in Abbildung 5.2 zeigen eindeutig, dass die Simulink-Daten bis auf die fehlende zeitliche Inkongruenz mit den Ergebnissen der Messung an der RWTH Aachen und des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Programms

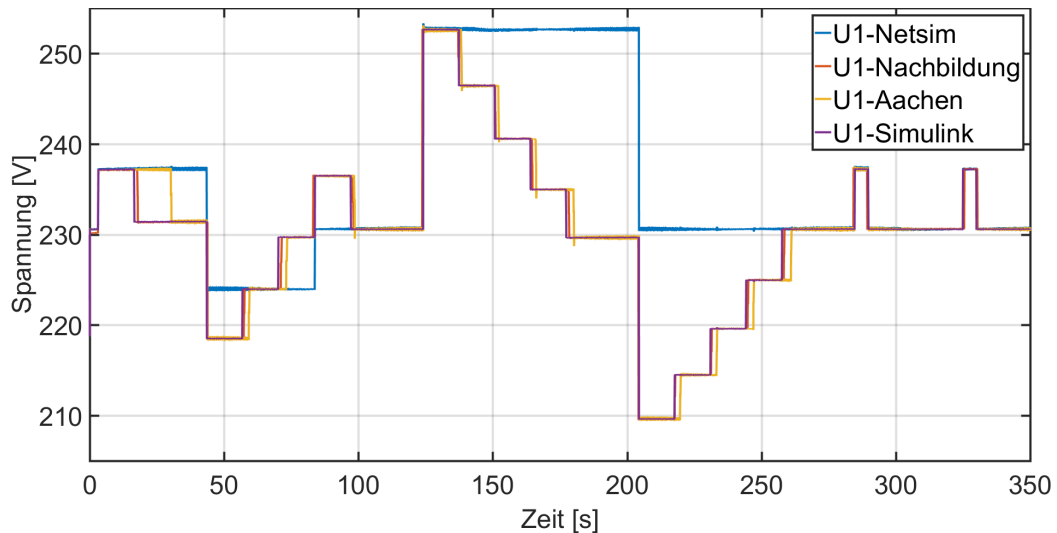


Abbildung 5.1. – Vergleich der Simulink-Daten mit der Nachbildung und den Messdaten aus Aachen

zur Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators übereinstimmen. Dies belegt zum Einen die Korrektheit des Simulink®-Modells, zum Anderen validiert es auch die erstellte Nachbildung durch das Vorhandensein von nun drei Messergebnissen mit nahezu den selben Resultaten. Der Schaltzeitpunkt der in MATLAB® erstellten Nachbildungs-Anwendung liegt stets zwischen oder genau auf dem des Simulationsmodells und dem des regelbaren Ortsnetztransformators, der an der RWTH Aachen vermessen wurde. Die Ergebnisse der Nachbildung liegen also genau zwischen Theorie und Praxis und damit im gewünschten Bereich.

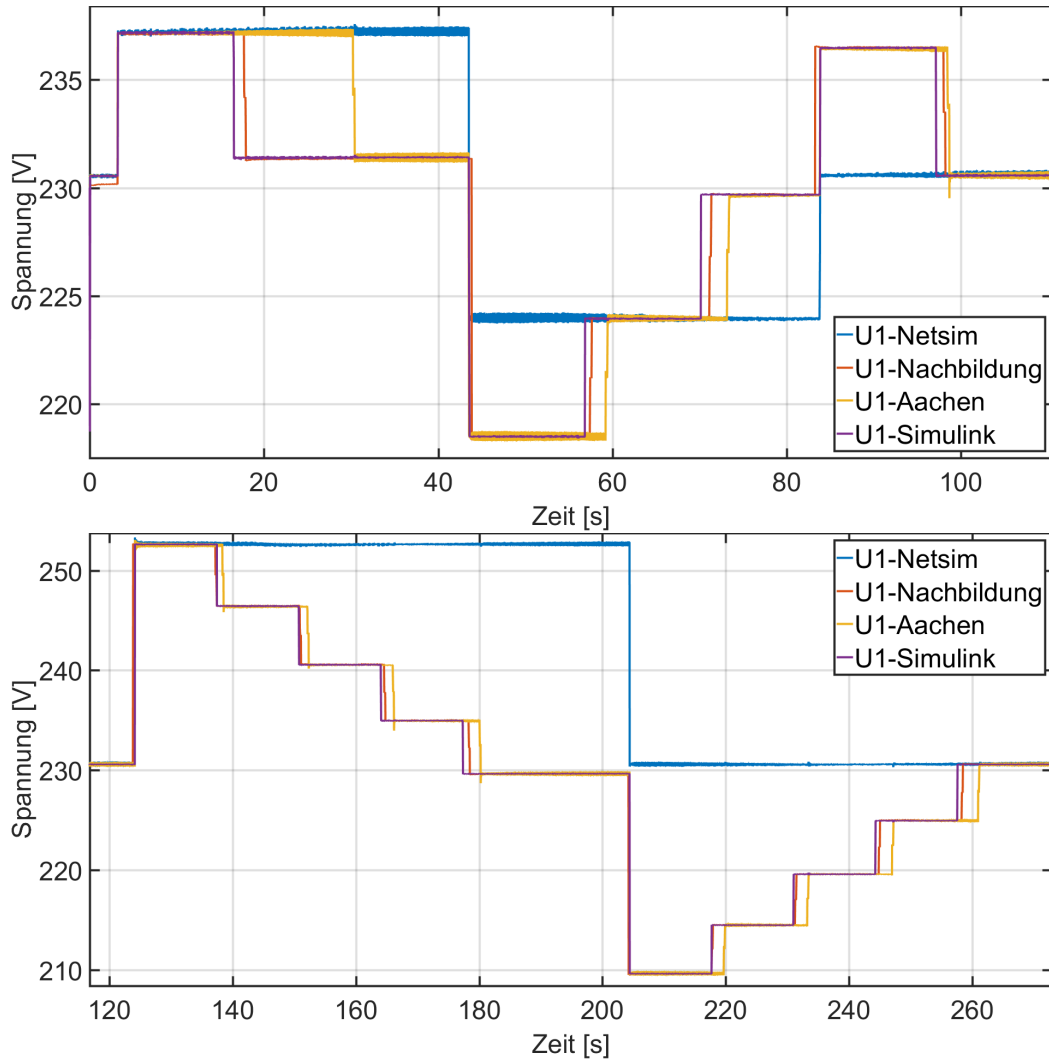


Abbildung 5.2. – Detailvergleich aller Ergebnisse

6. Fazit und Ausblick

Der regelbare Ortsnetztransformator stellt eine solide und kostenmäßig durchaus vertretbare Alternative zum konventionelle Netzausbau dar. Die aktive Regelung ermöglicht eine weiter steigende Einbindung von dezentralen Erzeugungsanlagen und damit verbunden eine höhere Auslastung der im Netz genutzten Betriebsmittel und erhöht dadurch deren Wirtschaftlichkeit.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Erstellung und Validierung einer MATLAB[®]-App mit grafischer Benutzeroberfläche, die, mit Hilfe des Netzlabors an der Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze der Technischen Universität München, das niederspannungsseitige Verhalten eines realen regelbaren Ortsnetztransformators nachbilden soll. Die Hardwarenachbildung umfasst viele Einstellmöglichkeiten, verschiedene Regelstrategien, zahlreiche Anzeigeelemente sowie Einflussmöglichkeiten auf Seite der simulierten Mittelspannung des Ortsnetztransformators. Die Algorithmen sind als while-Schleifen implementiert. Die Durchlaufzeit der Regelschleife wird von der Einlesedauer der Messwerte dominiert und beträgt insgesamt zwischen 1,1 und 1,2 Sekunden. Mit jedem Durchlauf werden die aktuellen Spannungen mit den hinterlegten Messwerten verglichen und gegebenenfalls wird ein Verzögerungstimer aktiviert und schließlich eine Stufenschaltung ausgelöst. Die Stufung selbst weist eine mittlere Differenz von weniger als 0,05 Volt und eine geringfügige zeitliche Varianz auf. Je nachdem, wann die Spannungsänderung eintritt, muss der neue Wert erst von der Regelung erfasst werden, bevor selbige darauf reagieren kann. Insgesamt liegen sämtliche Resultate, sowohl die der Nachbildung, als auch die des Simulink[®]-Modells sehr nah an den Messergebnissen des realen rONT an der RWTH Aachen. Die Nachbildung eines regelbaren Ortsnetztransformators anhand einer MATLAB[®]-Steuerung ist folglich gelungen.

Zukünftige Arbeiten könnten sich mit der Verbesserung der erstellten Anwendung beschäftigen. So könnte beispielsweise das SIEMENS[®] Sentron[®] PAC4200 mit Hilfe von Stromwandlern auch die Messung der Ströme und des $\cos(\varphi)$ der einzelnen Phasen übernehmen. Dadurch würde sich die Schleifenzeit drastisch verkürzen. Schließlich benötigt das SIEMENS[®] Sentron[®] PAC4200 nur etwa 5% der Zeit, die die Spannungsquelle MX-45 zum Übertragen der Messwerte bedarf. Jedoch muss die Frage gestellt werden, ob eine solche Ausarbeitung noch sinnvoll erscheint. Schließlich gleicht ein regelbarer Ortsnetztransformator die gemessene Spannung auch nur etwa sekundlich mit den eingestellten Grenzwerten ab.

Literaturverzeichnis

- [1] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. Newsletter IN-SIGHT 2014-2. Falkensteinstrasse 8, 93059 Regensburg, Germany, 2014.
- [2] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. ECOTAP VPD - Die Kompaktklasse für Verteiltransformatoren. Falkensteinstrasse 8, 93059 Regensburg, Germany, August 2016.
- [3] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE. FNN-Studie: Statische Spannungshaltung. Bismarckstr. 33, 10625 Berlin, Oktober 2015.
- [4] Technische Universität München Lehrstuhl für Hochspannungs-und Anlagentechnik. Grundlagen der Energieübertragungstechnik. Vorlesung, 2015/2016.
- [5] MathWorks. <https://de.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>.
- [6] AMETEK Programmable Power. <http://www.programmablepower.com/ac-power-source/mx/specifications.htm>.
- [7] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH Falkensteinstrasse 8 93059 Regensburg. *Betriebsanleitung Motorantrieb ECOTAP VPD MD&C*, Juni 2016.
- [8] VDE Verlag. VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. August 2011.

A. Anhang

A.1. MATLAB®-App auf CD



Vorraussetzungen zur Nutzung der rONT-Nachbildung:

- MATLAB®-Version R2016a oder neuer
- Installierte Toolboxen:
 - Instrument Control
 - Statistics and Machine Learning
 - Curve Fitting