

Schlussbericht zum Verbundvorhaben

## Flexibler Ortsnetz

# Spannungs- und Wirkleistungs-Regler

## (FLOW-R)

im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms zur

„Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.10.2014 bis 30.09.2017

**Schlussbericht vom:** 26.03.2018

**Projektbetreuung:** **Projektträger Jülich (PTJ)**  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Herr Dr. Eickhoff  
Wilhelm-Johnen-Straße  
D-52428 Jülich

**Projektpartner:**

Verbundpartner	Förderkennzeichen
<b>Pfalzwerke Netz AG (PWN)</b> (Projektkoordinator)	03ET7529A
<b>Pfalzwerke AG (PW)</b>	03ET7529B
<b>Technische Universität Kaiserslautern (TUK)</b> <b>Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement</b>	03ET7529C
<b>Power Plus Communications AG (PPC)</b>	03ET7529D
<b>Walcher GmbH &amp; Co. KG (WA)</b>	03ET7529E

- Autoren:**
- Dr. Ingolf Quint , Marco Werner (PWN)
  - Stefan Lang (PW)
  - Prof. Dr. Wolfram H. Wellßow, Haiyan Ma (TUK)
  - Stefan Sender (PPC)
  - Hartmut Walcher, Thomas Walcher, Philipp Wehner (WA)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

I	Übersicht Verbundpartner .....	4
1	Kurzdarstellung des Vorhabens.....	5
1.1	Motivation und Projektziele .....	5
1.2	Ziele des Gesamtvorhabens.....	6
1.3	Projektvoraussetzungen .....	7
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	11
1.5.1	Spannungs- und Wirkleistungs-Regler.....	11
1.5.2	Kommunikationstechnik .....	13
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	14
2	Zentrale Projektergebnisse .....	15
3	Eingehende Darstellung der Projektdurchführung .....	20
3.1	Analyse.....	20
3.1.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	20
3.1.2	Auswahl des Testnetzes.....	20
3.1.3	Installation und Betrieb des BPL-Kommunikationsnetzes im Testnetz .....	21
3.1.4	Messkampagne im Testnetz .....	24
3.2	Konzept .....	25
3.2.1	Analytische Herleitung der Steuerspannung .....	25
3.2.2	Maschenimpedanz.....	28
3.2.3	Design eines FLOW-Rs .....	29
3.2.4	Regelkonzept mittels Kennlinienverfahren .....	31
3.2.5	Rückfallebene bei Ausfall der Kommunikation.....	37
3.2.6	Strategien zur optimalen Platzierung der Regler im Netz .....	39
3.2.7	Definition der notwendigen Parameter zur Betriebsführung .....	41
3.2.8	Einbindung in übergeordnete Leitsysteme.....	41
3.3	Sicherheitskonzept Netzsteuerung.....	42
3.3.1	Analyse der Anforderungen und Rahmenbedingungen .....	42
3.3.2	Betrachtung der technischen Anforderungen (Schnittstellen, Regelalgorithmen, ...) .....	44
3.3.3	Aufbau und Implementierung der Sicherheitsarchitektur .....	44
3.4	Simulation .....	45
3.4.1	Synthetisches Netz.....	45
3.4.2	Verifikation der Kennlinien-Charakteristik .....	45
3.4.3	Verifikation der Kennlinien-Erzeugung.....	45
3.4.4	Reales Netz .....	46
3.4.5	Verifikation von Soll- und Grenzwertregelung .....	47
3.4.6	Bestimmung der Platzierung und Parametrierung der Regler im Testnetz.....	49

---

3.5	Design.....	49
3.5.1	Systemkonzept.....	49
3.5.2	Konzeption einer Lösung zum lokal-autarken Regelsignalaustausch .....	50
3.5.3	Prototypen-Auslegung, Projektierung .....	50
3.5.4	Umsetzung des Regelkonzepts .....	52
3.5.5	Systemsicherheit (Ausfallsicherheit) .....	54
3.5.6	Entwurf von Testszenarien und Testaufbauten.....	55
3.6	Implementierung .....	55
3.6.1	Entwicklung der BPL-Kommunikationsmodule.....	55
3.6.2	Aufbau, Produktion der Pilotanlage .....	56
3.7	Labortest .....	56
3.7.1	Aufbau der Testumgebung .....	56
3.7.2	Integration des Prototyps in die Laborumgebung.....	59
3.7.3	Validierung des Regelkonzepts verschiedener Regelziele .....	60
3.8	Feldtest .....	65
3.8.1	Montage und Inbetriebnahme der Pilotanlage im Testnetz .....	65
3.8.2	Durchführung der Messkampagne .....	65
3.8.3	Auswertung der relevanten Daten aus dem Netz .....	69
3.9	Vergleichende Bewertung.....	70
3.9.1	Technische Bewertung.....	70
3.9.2	Wirtschaftliche Bewertung .....	71
3.9.3	Sonstige Bewertungskriterien.....	73
3.9.4	Volkswirtschaftliche Auswirkungen.....	73
4	Verwertung.....	75
4.1	Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis .....	75
4.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	75
4.3	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	75
4.4	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	76
4.5	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	77
6	Abbildungsverzeichnis.....	80
7	Tabellenverzeichnis .....	82
8	Literatur .....	83

## I Übersicht Verbundpartner

	Verbundpartner und Ansprechpartner	Tätigkeitsfelder
Netzbetreiber	<p>Pfalzwerke Netz AG Kurfürstenstraße 29 67601 Ludwigshafen Tel.: 06237-935-200</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Herr Dr. Ingolf Quint</li> <li>Herr Marco Werner</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verteilnetzbetreiber</li> <li>Planung, Bau und Betrieb von Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetzen</li> </ul>
Energieversorger	<p>Pfalzwerke AG Kurfürstenstraße 29 67601 Ludwigshafen Tel.: 0621-585-2344</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Herr Stefan Lang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regionaler Energieversorger</li> <li>Vertrieb von Strom, Gas, Wärme</li> <li>Planung, Bau und Betrieb von EE-Anlagen</li> <li>Planung, Bau und Betrieb von Ladeinfrastruktur</li> </ul>
Kommunikation	<p>Power Plus Communications AG Dudenstraße 6 68167 Mannheim Tel.: 0621-40165-100</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Herr Stefan Sender</li> <li>Herr Christoph Raquet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Smart Meter Gateways mit Mobilfunk, Powerline und anderen Kommunikationsmodulen</li> <li>Breitband Powerline für Nieder- und Mittelspannungsnetze und andere IoT-Systeme</li> <li>Produkte, Beratung, Dienstleistungen für die Digitalisierung der Energiewende</li> </ul>
Hersteller	<p>Walcher GmbH &amp; Co. KG Zum Lingeshof 3 36124 Eichenzell Tel.: 06659-9 87 94-0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Herr Hartmut Walcher</li> <li>Herr Thomas Walcher</li> <li>Herr Philipp Wehner</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leittechnik für Wasserkraftwerke, Steuerungen für Wasserkraftwerke</li> <li>Energieübertragung <ul style="list-style-type: none"> <li>Netzregler</li> <li>Eigenbedarfsregler für Windkraftanlagen</li> </ul> </li> <li>Automatisierungstechnik</li> <li>Transformatoren</li> <li>Rückspeiseeinheiten</li> <li>Schutzrelais</li> </ul>
Universität	<p>Technische Universität Kaiserslautern Lehrstuhl ESEM Erwin-Schrödinger-Straße 67663 Kaiserslautern Tel.: 0631 / 205-2021</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Herr Prof. Dr. Wolfram H. Wellßow</li> <li>Herr Haiyan Ma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forschung und Lehre im Bereich Energiesysteme und Energiemanagement</li> </ul>

# 1 Kurzdarstellung des Vorhabens

## 1.1 Motivation und Projektziele

Die ansteigende, dezentrale Einspeisung von Strom in die Niederspannungsverteilnetze durch Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen), Klein-Windkraft-Anlagen, Blockheizkraftwerke, etc. erfordert eine Veränderung der Betriebsführung dieser Netzebene. Durch den starken Zubau der regenerativen Stromerzeuger vor allem im ländlichen Raum erreichen die Niederspannungsnetze (NS-Netze) die Grenzen ihrer Belastbarkeit. Dies führt ohne Maßnahmen zu Verletzungen der zulässigen Spannungsgrenzen oder Einschränkungen bei der Übertragung der erzeugten Leistung.

Mit Hilfe von intelligenten Verteilnetzen unter Einbindung von Informations- und Kommunikationstechnologien ist der kostenintensive Ausbau der Verteilnetze entweder vermeidbar, kann begrenzt oder zumindest zeitlich gestreckt werden. Dazu müssen neue, innovative Konzepte und Verfahren entwickelt werden, um nachhaltige Infrastrukturlösungen bereitstellen zu können.

Bisher wurde ein typisches Ortsnetz von einem zentralen Transformator aus der Mittelspannungsebene versorgt. Die im Ortsnetz angeschlossenen Netzkunden waren ausschließlich elektrische Verbraucher (im folgend auch als Lasten bezeichnet). Dadurch war die Richtung des Leistungsflusses bekannt und dessen Höhe leicht abschätzbar war. Durch die dargebotsabhängige Einspeisung von PV-Anlagen ist die Transportleistung stark schwankend, oft kehrt sich der Leistungsfluss sogar um.

Bekannte Gegenmaßnahmen sind Netzausbau, Regelung der Einspeiser (Wirk- und/oder Blindleistung), Lastmanagement, Stromspeicher, regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) und Strangregler. Der Netzausbau ist kostenintensiv und volkswirtschaftlich erst ab einer größeren Energielieferung vertretbar.

Zur Regelung der Einspeiser oder Lasten müssen Geräte unterschiedlicher Anbieter miteinander interagieren. Dazu bedarf es langwieriger normativer Festlegungen, die der schnellen Realisierung der Energiewende entgegenstehen. Ebenso sind Stromspeicher (auch die Elektromobilität) mit den notwendigen Merkmalen, z.B. schnelles Laden, hohe Zyklenanzahl, nicht in naher Zukunft wirtschaftlich verfügbar.

Ein rONT regelt an zentraler Stelle die Spannungshöhe für das gesamte Ortsnetz. Inhomogene Verteilungen der Einspeiser können nur begrenzt berücksichtigt werden. Ein Strangregler stabilisiert die Spannung in einem nachgelagerten Netzabschnitt. Er kann alternativ zu einem rONT an zentraler Stelle eingesetzt werden, unterliegt in dieser Anordnung jedoch den gleichen Einschränkungen. Wenn nur einzelne Stränge oder Ausläufer eines Ortsnetzes Spannungshaltungsprobleme aufweisen, ist der Einsatz eines Strangreglers im belasteten Strang vorteilhaft.

Bei einspeisebedingter Überschreitung der Übertragungsfähigkeit eines Stranges in Strahlennetzen müssten die Erzeugungsanlagen abgeregelt werden. Die maximale „Ernte“ an regenerativer Energie ist dann nicht möglich. Außerdem vermeiden Netzbetreiber diese Maßnahme, da der technische und verwaltungstechnische Aufwand zurzeit zu hoch ist.

## 1.2 Ziele des Gesamtvorhabens

Ziel des Projektes war es, die Verteilnetze zukunftsfähig zu gestalten und modulare, skalierbare, dezentrale Maßnahmen zu entwickeln, welche die Aufnahmefähigkeit der Netze von dezentralen Erzeugern gezielt steigert. Konkret sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Lokalselektive Spannungsregelung
- Ermöglichung des vermaschten Niederspannungsbetriebes
- Regelung der Leistungsaufteilung auf die vorhandenen Stränge

Damit werden die typischen Probleme, insbesondere in ländlichen Netzen, adressiert. Wesentlich ist, dass die Lösung skalierbar und ausbaufähig ist, um den Übergang von Ist- zu Zielnetzen wirtschaftlich zu ermöglichen. Die FLOW-R bieten die Möglichkeit, durch ihre Mobilität und der einfachen Wiederverwendung an anderer Stelle einen Ortswechsel durchzuführen, falls sich die Netzsituation verändert.

Das Projekt umfasst die wissenschaftliche Erarbeitung des neuen Konzeptes, die industrielle Umsetzung und Erprobung prototypischer FLOW-R sowie die betriebs- und volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse. Die Untersuchungsgegenstände waren:

- Mathematische Modellbildung für verschiedene Netztopologien
- Entwicklung der Algorithmen zur Netzregelung
- Entwicklung eines Kommunikationskonzeptes zur lokal-autarken Vernetzung der FLOW-R
- Optimierung der Bemessung der neuen Betriebsmittel mit Hilfe von Simulationen
- Konzeption und Aufbau einer Sicherheitsarchitektur zum Schutz vor Fremdzugriff
- Aufbau der Betriebsmittel und Implementierung der Regelalgorithmen
- Laborerprobung zur Verifizierung der Simulationen und Sicherstellung der Funktion
- Erprobung im Feldbetrieb
- Erstellung von Planungshilfsmitteln

### 1.3 Projektvoraussetzungen

Zu Beginn des Vorhabens lagen hinsichtlich des Zubaus von Erzeugungsanlagen im Verteilnetz sehr erfolgreiche Jahre zurück. Der durch ein gutes Subventions- zu Investitionsverhältnis ausgelöste Zubau von PV-Anlagen Anfang der 2010er stellte viele Verteilnetzbetreibergesellschaften vor große Herausforderungen. Durch die hohen installierten Erzeugungsleistungen, welche teilweise in ländlichen Netzen die anzunehmenden Lasten um ein vielfaches überstiegen, mussten viele dieser Verteilnetzbetreibergesellschaften kostenintensiven Netzausbau betreiben oder Netzanschlussbegehren ablehnen, um die anerkannten Verträglichkeitspegel nach der Norm EN 50160 einzuhalten.

Der Handlungsbedarf zum Ausbau bzw. zur Stärkung der deutschen Verteilnetze wurde auch durch die von mehreren Stellen angesetzten Verteilnetzstudien [1–3] aufgezeigt. Alle diese Studien kamen zu dem Ergebnis, dass der intelligente Einsatz von innovativen Technologien die Kosten für den Netzausbau senken können.

Während mit dem rONT bereits eine kosteneffiziente innovative Technologie zum Entgegenwirken von Spannungsproblemen existierte, fehlte zur Beeinflussung des Leistungsflusses für die Vermeidung der Überlastungen von Komponenten eine wirkliche Alternative zum klassischen Netzausbau. Nahezu alle alternativen Maßnahmen hatten einen Eingriff in die Kundenanlage (Last- oder Einspeisemanagement) zur Folge. Es fehlte eine netzbetreibereigene Lösung.

### 1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms zur „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durchgeführt. Die Projektrealisierung erfolgte durch die nachfolgenden fünf Projektpartner (Abkürzung jeweils in Klammer) jeweils gemäß der jeweiligen Kompetenzen.

- Pfalzwerke Netz AG, Ludwigshafen (PWN)
- Pfalzwerke AG, Ludwigshafen (PW)
- Power Plus Communications AG, Mannheim (PPC)
- Walcher GmbH & Co. KG, Eichenzell (WA)
- Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der TU Kaiserslautern (TUK)

Das Projekt gliedert sich gemäß dem Projektrahmenplan in zehn Arbeitspakete (AP), welche in Tabelle 1.1 aufgelistet sind:

**Tabelle 1.1: Übersicht der Arbeitspakete**

<b>AP.-Nr.:</b>	<b>Arbeitspaket-Bezeichnung:</b>	<b>AP-Leitung:</b>
<b>1</b>	<b>Analyse</b>	<b>TUK</b>
<b>2</b>	<b>Konzept</b>	<b>TUK</b>
<b>3</b>	<b>Sicherheitskonzept Netzsteuerung</b>	<b>PPC</b>
<b>4</b>	<b>Simulation</b>	<b>TUK</b>
<b>5</b>	<b>Design</b>	<b>WA</b>
<b>6</b>	<b>Implementierung</b>	<b>WA</b>
<b>7</b>	<b>Labortest</b>	<b>TUK</b>
<b>8</b>	<b>Feldtest</b>	<b>PWN</b>
<b>9</b>	<b>Vergleichende Bewertung</b>	<b>TUK</b>
<b>10</b>	<b>Abschlussbericht und Veröffentlichungen</b>	<b>PWN</b>

Im ersten Arbeitspaket wurde eine Analyse des aktuellen Standes der Wissenschaft und Technik vorgenommen. Des Weiteren wurden typische Netztopologien zusammengestellt und die benötigten mathematischen Modelle zur Simulation identifiziert. Auf der dadurch erarbeiteten Grundlage wurde ein Testnetz ausgewählt und eine Messkampagne durchgeführt.

Im zweiten Arbeitspaket wurden die mathematischen Grundlagen für das Regelkonzept erarbeitet. Weiterhin wurden eine Platzierungsstrategie sowie eine Rückfallebene im Falle möglicher Kommunikationsunterbrechungen erarbeitet.

Eine Analyse der rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie der Sicherheitsanforderungen des geplanten Regelsystems wurde in Arbeitspaket 3 durchgeführt. Dabei wurde eine Sicherheitsstruktur für lokal-autarke Übertragungen konzeptioniert und implementiert.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurden die Simulationen zu den Regelkonzepten und deren Grenzen durchgeführt. Hierzu fand die Übernahme des Testnetzes in die Simulationsumgebung statt. Darin wurde die Platzierung eines FLOW-Rs sowie dessen Parameter überprüft.

In Arbeitspaket 5 wurde das Systemkonzept sowie die Prototypen-Auslegung und -Projektierung erarbeitet. Hierzu waren u.a. die Definition der Schnittstellen und der reglerinternen Kommunikation notwendig. Des Weiteren wurde das Regelkonzept in die Steuerung des Prototypen implementiert.



Arbeitspaket 6 umfasste die Implementierung, Aufbau und Produktion der Pilotanlage. Weiterhin wurden die BPL-Kommunikationsmodule entwickelt und in das Gesamtsystem integriert. Parallel dazu wurde eine Testumgebung (Labornetz) für den nachfolgenden Labortest aufgebaut.

Der Labortest fand im Rahmen des Arbeitspaketes 7 statt. Hierzu gehörten die Montage und Inbetriebnahme der Pilotanlage im Labornetz sowie der Test des FLOW-Rs im Labornetz in normalen und fehlerbehafteten Betriebszuständen. Aufgrund der Analyse der Regelung erfolgte die Rückführung der Ergebnisse in die Simulation und das Design.

Im Anschluss an den Labortest wurde in Arbeitspaket 8 der Feldtest durchgeführt. Dazu musste die Pilotanlage in das Netz implementiert und unter normalen und fehlerbehafteten Betriebszuständen getestet werden. Auch hierzu erfolgte eine Analyse der Regelung und eine anschließende Rückführung der Ergebnisse in die Simulation und das Design.

Arbeitspaket 9 umfasste die Erarbeitung einer technischen- und wirtschaftlichen Bewertung.

Die Verbreitung der Ergebnisse und des Wissens erfolgte im Rahmen des Arbeitspaketes 10.

Insgesamt waren vier Meilensteinereignisse vorgesehen, die jeweils am Ende eines inhaltlich wichtigen Abschnitts der Projektdurchführung positioniert und auch in Abbildung 1.1 enthalten sind. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Meilensteinereignisse:

- **Meilenstein 1:** Bewertung der theoretischen und planerischen Vorarbeiten. Beurteilung, ob die Implementierung gemäß den Vorgaben durchführbar ist.
- **Meilenstein 2:** Begutachtung der erstellten Geräte, Verfahren und Testumgebung. Freigabe zum Start des Labortests.
- **Meilenstein 3:** Betrachtung der Ergebnisse aus den Labortests. Festlegung von evtl. notwendigen Maßnahmen zur Durchführung des Feldtests.
- **Meilenstein 4:** Betrachtung der Erkenntnisse aus dem Feldtest. Aufstellung von Empfehlungen für die vergleichende Bewertung, den Abschlussbericht und die Verbreitung der Ergebnisse.

Arbeitspaket	Partner	2014				2015				2016				2017													
		OkT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep	OkT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep		
0 Projektmanagement	PWN																										
0.1 Kommunikation und Koordination der Projektpartner	PWN, PW																										
1 Analyse	TUK																										
1.1 Sicherung des aktuellen Standes der Wissenschaft, Technik und industriellen Praxis	TUK																										
1.2 Zusammenstellung der typischen Netztopologien	TUK																										
1.3 Identifikation der mathematischen Modelle zur Simulation	TUK																										
1.4 Auswahl des Testnetzes	TUK, WA, PW, PWN																										
1.5 Messkampagne im Testnetz	TUK, WA, PW, PWN																										
2 Konzept	TUK																										
2.1 Definition der zu betrachtenden Netztopologien	TUK																										
2.2 Erarbeitung der Regelkonzepte, mathematische Grundlagen	TUK																										
2.3 Rückfallpläne bei Ausfall der Kommunikation	TUK, WA, PW, PWN																										
2.4 Strategien zur optimalen Platzierung der Regler im Netz	TUK, WA, PW, PWN																										
2.5 Definition der notwendigen Parameter zur Betriebsführung	TUK, WA, PW, PWN																										
2.6 Einbindung in übergeordnete Leitsysteme	TUK, WA, PW, PWN																										
3 Sicherheitskonzept Netzsteuerung	PPC																										
3.1 Analyse der rechtlich regulatorischen Rahmenbedingungen	PPC, PW, PWN																										
3.2 Analyse der Sicherheitsanforderungen des geplanten Regelsystems	PPC, PW, PWN, TUK																										
3.3 Betrachtung der technischen Anforderungen (Schrittstellen, Regelalgorithmen...)	PPC, WA, TUK																										
3.4 Konzeption einer Sicherheitsarchitektur für lokal-autarke Übertragung	PPC, PW, PWN																										
3.5 Aufbau und Implementierung der Sicherheitsarchitektur	PPC, PW, WA																										
4 Simulation	TUK																										
4.1 Installation der Simulatumgebung	TUK																										
4.2 Übernahme der zu betrachtenden Topologien	TUK																										
4.3 Übernahme der Regelkonzepte	TUK																										
4.4 Analyse der Stabilität und Grenzen der Regelkonzepte	TUK, WA																										
4.5 Überprüfung der Platzierungsstrategie	TUK, WA																										
4.6 Übernahme des Testnetzes	TUK																										
4.7 Bestimmung der Anzahl und Platzierung der Regler im Testnetz	TUK, WA, PWN																										
4.8 Bestimmung der Parameter der einzelnen Regler	TUK, WA, PWN																										
5 Design	WA, PW, PWN																										
5.1 Systemkonzept	WA, PPC, TUK																										
5.2 Definition der Schnittstelle	WA, PW, PWN, PPC																										
5.3 Auslegung der FLOW-R-internen Kommunikation	WA, PPC, TUK																										
5.4 Konzeption einer Lösung zum lokal-autarken Regelsignalaustausch	PPC																										
5.5 Prototypen-Auslegung, Projektierung	WA, PPC, TUK																										
5.6 Umsetzung des Regelkonzeptes	WA, TUK																										
5.7 Systemsicherheit (falls Sicherheit)	WA, PPC																										
5.8 Entwurf von Testscenarien und Testaufbauten	WA, TUK, PWN																										
6 Implementierung	WA																										
6.1 Aufbau, Produktion der Pilotanlage	WA																										
6.2 Entwicklung der BPL-Kommunikationsmodule	PPC																										
6.3 Integration der Komponenten zum System	WA, PPC																										
6.4 Aufbau der Testumgebung	WA, TUK, PWN																										
7 Laborrest	TUK																										
7.1 Montage der Pilotanlage im Testlabor	TUK, WA																										
7.2 Inbetriebnahme der Pilotanlage im Testlabor	WA																										
7.3 Installation der Kommunikationsinfrastruktur im Testlabor	PPC																										
7.4 Tests in normalen und fehlerbehafteten Betriebszuständen	TUK, WA, PPC																										
7.5 Analyse der Regelung	TUK, WA																										
7.6 Rückführung der Ergebnisse des Labortests in Simulation und Design	TUK, WA, PW, PWN																										
8 Feldtest	PWN																										
8.1 Montage der Pilotanlage im Testnetz	PW, PWN, WA																										
8.2 Inbetriebnahme der Pilotanlage im Testnetz	PWN, WA																										
8.3 Installation der Kommunikationsinfrastruktur im Testnetz	PW, PWN, PPC																										
8.4 Durchführung der Messkampagne	PW, PWN, WA																										
8.5 Auswertung der relevanten Daten aus dem Netz	WA, PWN																										
8.6 Rückführung der Ergebnisse des Feldtests in Simulation und Design	TUK, WA, PW, PWN																										
9 Vergleichende Bewertung	TUK																										
9.1 Technische Bewertung	TUK, WA, PW, PWN, PPC																										
9.2 Wirtschaftliche Bewertung / volkswirtschaftliche Auswirkungen	TUK, WA, PW, PWN, PPC																										
10 Abschlussbericht und Veröffentlichungen	PW																										
10.1 Bericht erstellen	TUK, WA, PW, PWN, PPC																										
10.2 Veröffentlichungen, Tagungen, etc.	TUK, WA, PW, PWN, PPC																										

Abbildung 1.1: Projektplan

## 1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Mit dem Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung hat die deutsche Bundesregierung im Jahr 2010 die Stärkung der erneuerbaren Energien (EE) als Teil der zukünftigen Energieversorgung beschlossen. Als Ziel wurde eine Deckung des Bruttostromverbrauchs bis 2020 zu 35% und bis 2050 zu 80% aus EE formuliert. Bis heute sind rund 25% der installierten EE-Erzeugungsleistung in den Niederspannungs (NS)-Netzen angeschlossen. Diese haben mit etwa 65% den weitaus größten Anteil am 1,78 Mio. km langen deutschen Stromnetz. Die eingespeiste Leistung wird hierbei zu 96% von Photovoltaikanlagen bereitgestellt.

Insbesondere in ländlichen Netzen wird dadurch die Einhaltung des in der DIN EN 50160 festgelegten Spannungsbandes gefährdet. Neben dem oftmals kostenintensiven Netzausbau werden vermehrt innovative Betriebsmittel, wie regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) oder Spannungsregler, eingesetzt. Jedoch dienen diese Maßnahmen ausschließlich der Einhaltung des erforderlichen Spannungsbandes.

Im Hinblick auf die fortschreitende Integration von Erzeugungsanlagen und den Ausbau der NS-Netze mit Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge rückt zunehmend der Schutz vor thermischer Überlastung, insbesondere der Kabel und Leitungen, aufgrund hoher Leistungsflüsse in den Fokus. Da intensive Studien zum Fahrverhalten bereits vorhersagen, dass sich die Ladetätigkeiten hauptsächlich auf die Abendstunden konzentrieren, ist nicht davon auszugehen, dass die entstehenden Leistungsspitzen durch die in den Sonnenstunden eingespeiste PV-Leistung gedeckt werden können. Ein möglicher Einsatz von Speichern zur Nutzung der PV-Energie zum zeitversetzten Laden von Elektrofahrzeugen ist bisweilen unwirtschaftlich. Die zukünftig flächendeckende Herausforderung, sowohl in ländlichen als auch in städtischen Netzen, liegt in der Übertragung der entstehenden Leistungsflüsse und der damit verbundenen thermischen Belastung der Betriebsmittel. Die zuvor genannten innovativen Maßnahmen zur Spannungsregelung bieten hierauf aber keine Antwort. Ein erster zielführender Ansatz ist der vermaschte Betrieb eines NS-Netzes. Jedoch sind auch hierbei thermische Überlastungen möglich.

### 1.5.1 Spannungs- und Wirkleistungs-Regler

Die am Markt verfügbaren spannungsregelnden Betriebsmittel, wie rONT und Spannungsregler tragen dabei nicht zur Strombetragsregelung im Netz bei. Häufig diskutierte Flexibilitätsoptionen basieren zu meist auf Speicher-Lösungen oder Demand-Side-Management-Konzepten. Hierzu sind jedoch Speicher oder schaltbare Lasten erforderlich, um diese Konzepte umzusetzen. Ein Eingriff in die Kundenanlage wäre somit häufig erforderlich. Aufgrund der regulatorischen Rahmenbedingungen und der hierzu notwendigen kommunikativen Erschließung der Komponenten sind diese Konzepte in der Regel aus wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten nicht darstellbar.

Somit waren weder vor noch während der Projektlaufzeit innovative Betriebsmittel zur Begrenzung der thermischen Auslastung am Markt verfügbar, die weder Speicher noch einen Zugriff auf Kundenanlagen benötigen.

Zur reinen Spannungsregelung haben sich in der Vergangenheit bereits mehrere Design-Konzepte für Spannungsregler etabliert.

Traditionale Spannungsregler bestehen aus einem oder mehreren schaltbaren Spartransformatoren sowie einem Stufenschalter und dienen dazu, die Spannung zu erhöhen oder zu senken. Die Spannungsregelung wird durch die Einstellung der Laststufe der Reihenwicklung des Spartransformators erreicht. Derartige Spannungsregler werden seit vielen Jahren u.a. in Europa und den USA eingesetzt, um dem Spannungsabfall entlang sehr langer Verteilungsleitungen entgegenzuwirken [4]. Die mechanischen Schaltelemente mit diskreten Stufen begrenzen die Regelhäufigkeit.

Beim leistungselektronischen Spannungsregler erfolgt die Umschaltung stufenlos mit Thyristoren. Abbildung 1.2 zeigt das Funktionsschaltbild eines kommerziell verfügbaren Produktes [1]. Das Konzept kann sowohl im Mittelspannungs- als auch im NS-Netz eingesetzt werden. Beim leistungselektronischen Spannungsregler erfolgt die Umschaltung stufenlos mit Thyristoren. Vorteilhaft bei diesen Systemen ist, dass sich keine leistungselektronischen Elemente im Lastpfad befinden und dass Betriebsmittel nur für einen relativ geringen Teil der Nennscheinleistung des zu regelnden Ortsnetzes ausgelegt werden müssen [5]. Diese Produkte werden bisher vorrangig im industriellen Bereich eingesetzt, um große sensible Lasten vor Kurzzeitunterbrechungen und anderen Spannungsschwankungen zu schützen.

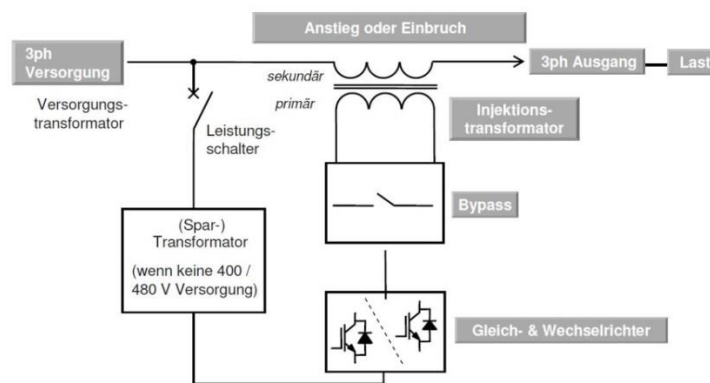


Abbildung 1.2: Elektronische Spannungsregler Funktionsschaltbild [6]

Daneben existieren auch leistungselektronische Spannungsregler, die ebenfalls, wie traditionelle Anlagen, mit schaltbaren Stufen arbeiten. Vorteile sind die nahezu unbegrenzte Schalthäufigkeit und das geräuschlose Schalten. Diese Regler werden überwiegend in langen Ausläuferleitungen von NS-Netzen

eingesetzt. Häufigste Anwendung ist das Ausregeln von Spannungserhöhungen, die durch ins Netz einspeisende Photovoltaikanlagen verursacht werden. Dadurch lässt sich in einigen Fällen der kostenintensive Bau einer Transformatorenstation vermeiden oder zumindest um einige Jahre verzögern.

Auf dem Markt sind Spannungsregler erhältlich, die gemeinsam alle drei Leiter regeln und solche, die mit drei einphasigen Regelsystemen ausgestattet sind. Die Regler mit drei einphasigen Regelsystemen bieten den Vorteil, dass auch einphasige Lasten und Sternpunktverschiebungen ausgeregelt werden können.

Abbildung 1.3 zeigt Beispiele für Spannungsregler verschiedener Hersteller.



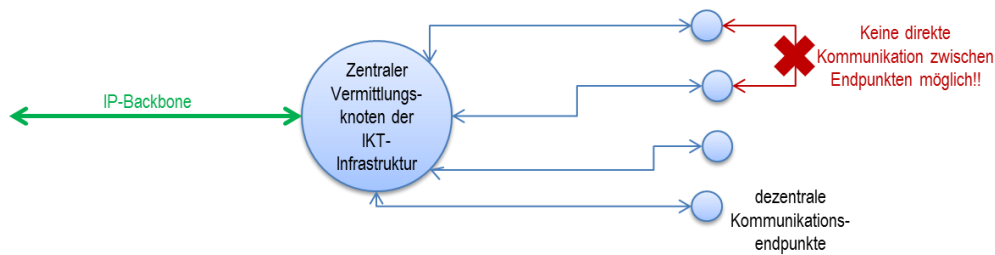
**Abbildung 1.3: Bauformen unterschiedlicher Spannungsregler:**  
Links: ABB [6], Mitte: AEG PS [7], Rechts: Walcher

Im Rahmen des Projektes Verteilnetz 2020 [8] wird ein neuartiger Multifunktionaler Längsregler (MFL) vorgestellt, der nicht nur einen Spannungsbetrag sondern auch eine komplexe Spannung auf die Netzspannung aufprägen kann. Dieser Ansatz wird dabei jedoch ausschließlich in Strahlennetzen zur Regelung des Bezugs bzw. Einspeisung von Blindleistung verwendet. Weiterhin dient dieser zur Symmetrierung der Netzspannungen und als aktiver Oberschwingungsfilter [9].

Zur Begrenzung der thermischen Belastbarkeit erbrachten die Recherchen im Rahmen des Projektes keine Ergebnisse zu am Markt erhältlichen Betriebsmitteln. Lediglich eine Veröffentlichung [10] verweist auf die Möglichkeiten der Lastflusssteuerung in NS-Netzen mittels Unified Power Flow Controllern (UPFC). Jedoch werden neben den mathematischen Grundlagen der Leistungsflussregelung nur einfache Testszenarien in reinen Ringstrukturen dargestellt. Der im Rahmen des FLOW-R-Projektes anvisierte Betrieb in mehrfach vermaschten Netzen sowie die dazu erforderlichen Regelkonzepte werden in anderen Projekten oder Publikationen weder bedacht noch dargestellt.

## 1.5.2 Kommunikationstechnik

Die auf dem Markt verfügbaren Kommunikationstechnologien sind systembedingt auf eine „zentralisierte“ Datenübertragung ausgerichtet. So erfolgt der Datenfluss immer zwischen dezentralem Kommunikationsendpunkt und zentralem Vermittlungsknoten, der wiederum an die IP-Backbone-Infrastruktur angeschlossen ist (siehe Abbildung 1.4).



**Abbildung 1.4: Schematische Topologie des Datenflusses bei aktuellem Stand der Technik**

Diese Datenflusstopologie ist für die wirtschaftlich bedeutendste Anwendung in flächigen IKT-Infrastrukturen ausgelegt, d.h. für die Bereitstellung eines Internetzugangs für Endkunden. Dementsprechend kann eine Datenübertragung von Kommunikationsendpunkt zu Kommunikationsendpunkt topologiebedingt lediglich über den nächst höheren zentralen Vermittlungsknoten erfolgen. In der nachfolgenden Tabelle 1.2 sind die unterschiedlichen Kommunikationstechnologien sowie die entsprechenden zentralen Vermittlungsknoten (auf niedrigster Ebene) aufgeführt:

**Tabelle 1.2: Typische IKT für den flächigen Einsatz mit ihren zentralen Vermittlungsknoten**

Kommunikationstechnologie	Zentraler Vermittlungsknoten
GPRS (General Packet Radio Service)	GGSN (Gateway GPRS Support Node)
UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)	GGSN (Gateway GPRS Support Node)
DSL (Digital Subscriber Line-Technologie)	DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer)
Breitband-Powerline (BPL)	Switch
Kabelnetz (Koaxial)	CMTS (Cable Modem Termination System)
Glasfaser	Switch

Auch bei den bisherigen Smart Grid-Piloten werden stets zentrale Elemente (Leitsystem, Kommunikationsknoten, etc.) bei der Übertragung von Regelsignalen eingebunden.

## 1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Vorbereitung von Messkampagne und Feldtest wurden durch die Pflanzwerke AG und Pflanzwerke Netz AG mehrere Partner zur Implementierung von Messeinrichtungen, FLOW-R und zur kommunikativen Anbindung der Ortsnetzstation des ausgewählten Testnetzes eingebunden. Hierbei wurde durch den Aufbau einer Richtfunkstrecke eine Anbindung an das Pflanzwerke-eigene Datennetz durch die Firma Pflanzkom geschaffen. Als vorbereitende Maßnahme für den Feldtest wurde der Regler durch die Mitarbeiter der Pflanzwerke Netz AG sowie eingebundener Auftragnehmer im Ortsnetz installiert.

## 2 Zentrale Projektergebnisse

Die zentralen Projektergebnisse der TU Kaiserslautern sind:

- **Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers**

Zur Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers wurden verschiedene Analysen zu typischen Netzkonfiguration durchgeführt. Weiterhin konnte ein Design für den Hardware-Aufbau eines FLOW-R, basierend auf existierenden Strangspannungsreglern, entworfen werden. Aufgrund der Realisierung mittels konventioneller Transformatortechnik und dem Verzicht auf leistungselektronische Komponenten wurde eine Diskretisierung der Steuerspannungsstufen erforderlich. Danach wurden die für ein Regelkonzept relevanten technischen Parameter festgelegt. Das Ziel zur Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers konnte somit umgesetzt werden.

- **Entwicklung von Regelalgorithmen**

Zur Durchführung einer Spannungs- und Wirkleistungsregelung basierend auf dem entwickelten Konzept, mussten Regelalgorithmen entwickelt werden. Hierzu war vorab eine analytische Betrachtung der mathematischen Zusammenhänge zwischen eingprägten Steuerspannungen und den Auswirkungen auf die Ströme erforderlich. Danach wurde ein spezielles Kennlinienverfahren entwickelt, mit dem Soll- und Grenzwertregelung an verschiedenen Messpunkten in unterschiedlichen Topologien vorgenommen werden können. Der Vorteil gegenüber einer analytischen Lösung liegt dabei in der autonomen Bestimmung der erforderlichen Kennlinien, wodurch keine aufwendigen planerischen Vorbetrachtungen erforderlich sind. Der Ansatz setzt somit gezielt auf einen praxistauglichen Einsatz. Die dazu erforderlichen Algorithmen wurden in verschiedenen Simulationsstudien erfolgreich getestet.

- **Durchführung eines Labortests**

Zum Test des entworfenen FLOW-R-Prototyps und insbesondere der implementierten Algorithmen wurde ein spezieller Prüfstand entworfen und aufgebaut. Dieser simuliert ein vermaschtes Niederspannungsnetz mit Lasten und Einspeisern und diente damit zum Test des Reglers. Hierbei wurden sämtliche Algorithmen überprüft und ggf. nachkonfiguriert. Die Messergebnisse stimmten mit den Simulationsstudien überein und stellten am Ende der Untersuchungen die Effektivität des FLOW-Rs unter Beweis.

**Die zentralen Projektergebnisse der Firma Walcher GmbH & Co. KG sind:**

- **Weiterentwicklung der Schaltung für die Spannungs-Längsregelung hin zu einer Regelung mit einer in 30°-Schritten variablen Spannung**

Aus den theoretischen Betrachtungen der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK) hat sich für die Regelung eines optimalen Strom- und Leistungsflusses (zunächst) die Notwendigkeit ergeben, die für die Regelung erforderliche und vom bekannten Prinzip der Netzregler einzuprägende (Zusatz-)Spannung in diskreten Phasenlagen von 30° variabel zu gestalten. Zur Realisierung hierfür ist das vorhandene dreiphasige Niederspannungsnetz sowie ein Drehstromtransformator in Dyn11-Schaltung genutzt worden. Die Beschaltung der einphasigen Transformatoren zur Spannungsänderung in den Außenleitern (Stufen-Transformatoren) ist mithilfe einer Schaltungslogik, die eine gewünschte Phasenlage zur Verfügung stellt und sicherheitstechnisch gegen Überspannungen durch primär offene Stufen-Transformatoren sowie gegen Kurzschluss zwischen zwei verschiedenen Phasenlagen schützt, umgesetzt und in die Software des FLOW-R implementiert worden. Im Rahmen von Labor- und Feldtest hat sich diese Schaltung mit entsprechender Ansteuerung erfolgreich verifizieren lassen.

- **Weiterentwicklung der Beschaltung der Stufentransformatoren zu einem allgemeinen Schema**

Für eine hinreichend große Bandbreite der Regelung mit möglichst exaktem Ergebnis ist man aufgrund der Simulationen der TUK davon ausgegangen, dass man mit einer maximalen Stellgröße des Reglers von bis zu 10% der Netzspannung bei einer Feinstufigkeit von 0,2% schalten muss. Hieraus ist für die Regler-Software ein allgemeines Schema in Form mathematischer Zusammenhänge zum Schalten möglichst vieler Stufen mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Stufen-Transformatoren ausgearbeitet und erfolgreich getestet worden.

- **Entwicklung eines Algorithmus zur zyklischen Messwert-Abfrage und -Bereitstellung über Modbus/TCP**

Aufgrund der Topologie eines Niederspannungsnetzes ist es für das Projektziel notwendig mit verteilt platzierter Peripherie zu kommunizieren, um hinsichtlich der Belastung von kritischen Netz-Abschnitten regelungstechnisch entgegenzuwirken. Ein verbreitetes Protokoll für eine solche Kommunikation ist Modbus/TCP. Da die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) sowie die eingesetzten dezentralen Universalmessgeräte (UMG) dies unterstützen, ist diese Technologie gewählt worden. Die SPS als zentrale Einheit hat hierbei einerseits die Aufgabe, die Messdaten von den UMGs abzufragen, und andererseits (falls gefordert) Messwerte zur Verfügung zu stellen. Die Programmierung stellt hierfür eine elementare Systemfunktion zur Verfügung. Für die Anforderungen an das Regelkonzept ist es jedoch entscheidend gewesen,



einen Algorithmus zu entwickeln, der eine möglichst hohe Performance der zyklischen Abfrage mehrerer Messstellen bereitstellt, gleichzeitig eine Fehlererkennung beinhaltet und im Fehlerfall ein gewisses Maß an Toleranz hierfür zulässt, sodass ein durchgängiger Betrieb garantiert ist. Die Software hierfür ist im Laufe der Testphasen, insbesondere während des Feldtests mit BPL-Infrastruktur stetig optimiert worden, sodass letztendlich eine quasi stabile Regelung gewährleistet worden ist.

- **Umsetzung eines Kennlinien-Verfahrens für die Regelung eines optimalen Strom- und Leistungsflusses**

Der Transfer der theoretischen Betrachtungen zum Kennlinienverfahren, hin zu einer funktionierenden Software zur Ansteuerung des Reglers, war ein Hauptbestandteil der durch Walcher realisierten Projektergebnisse. Besonders anspruchsvoll war hierbei die Entwicklung eines optimalen Verhaltens der Regelung bei gleichzeitig mehrfach auftretenden Grenzwert-Verletzungen sowie bei Fehlern in der Netz-Topologie. Durch die Möglichkeit des Tests in verschiedenen Netz-Topologien während des Labor-Tests, haben sich unterschiedliche Fehlerzustände simulieren lassen, um das hierfür entwickelte Regler-Verhalten nach mehrfacher Optimierung erfolgreich zu verifizieren.

#### **Die zentralen Projektergebnisse der Power Plus Communications AG sind:**

- **Weiterentwicklung der BPL-Kommunikationstechnologie, um einen lokalorientierten Datenfluss zu ermöglichen**

Zentraler Gedanke bei der Umsetzung des geplanten Regelkonzeptes war die lokal-autarke Koordination des Reglers mit den Messgeräten im Netz. Um diese Autarkie des Reglersystems im Verteilnetz zu gewährleisten, ist eine direkte Kommunikation zwischen dem FLOW-R und den im Netz verteilten Sensoren erforderlich, ohne dass zentrale Elemente (Steuerungsintelligenz, Kommunikationseinheit) eingebunden werden. Ziel war es dadurch die für die Netzregelung erforderliche, schnelle Reaktionszeit und hohe Ausfallsicherheit gewährleisten zu können.

Für diesen Austausch von Mess- und Regelsignalen wurde die BPL-Kommunikationstechnologie der PPC weiterentwickelt. In die vorhandene BPL-Firmware wurde eine neues Routingverfahren implementiert, mit dem der lokale Austausch von Mess- und Regelgrößen innerhalb eines Netzsegments im Energienetz möglich ist.

Die Firmware mit dem neuen Routingverfahren wurde zuerst in einem umfangreichen Labortest und anschließend im Feldtest in Heuchelheim-Klingen erfolgreich getestet.

Im Feldtest zeigte die Firmware anfangs ein nicht gewünschtes Verhalten, was zu einer geringeren Verfügbarkeit des Kommunikationsnetzes führte. Nach einer Analyse und erneuten

Überarbeitung der Firmware konnten auch im Feldtest die gewünschten Ergebnisse erreicht werden. Die Verfügbarkeit der Kommunikationsendpunkte lag abschließend an allen Messpunkten bei über 99,9%.

BPL wurde somit zur Kommunikationstechnik weiterentwickelt, welche die lokale Kommunikation zwischen Kommunikationsendpunkten direkt auf dem Stromnetz ermöglicht und somit explizit für die Anwendungen des Energienetzes vorbereitet ist.

- **Konzeption und Umsetzung einer Sicherheitsarchitektur zur lokalen Netzsteuerung**

Im Rahmen des Projektes wurden die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen zum Thema Datenschutz/Datensicherheit im Bereich lokal-autarker Netzsteuerung und die Sicherheitsanforderungen des im Projekt geplanten Regelsystems im Energienetz hinsichtlich Integrität, Vertraulichkeit, Verfügbarkeit, Authentifizierung und Verschlüsselung analysiert. Aufbauend auf dem Ergebnis der Analyse und der vorhandenen BSI-Smart-Meter-Gateway-Architektur mit den BSI-Schutzprofilen wurde eine Sicherheitsarchitektur, die die Anforderungen der lokal-autarken Übertragung von Mess- und Regelgrößen berücksichtigt, entwickelt. Hierbei wurden notwendige Erweiterungen bzw. Ergänzungen der SMGW-Sicherheitsarchitektur insbesondere im Bereich der CLS-Schnittstelle herausgearbeitet.

**Die zentralen Projektergebnisse der Pfalzwerke AG und Pfalzwerke Netz AG sind:**

- **Auswahl eines Testnetzes für Messkampagne und Feldtest**

Sowohl für die analytischen Betrachtungen, als auch für die erforderliche Messkampagne sowie dem Feldtest, war die Auswahl eines geeigneten Niederspannungsnetzes erforderlich. Hierzu wurden 22 Schwerpunktnetze aus ca. 500 Ortsnetzen auserwählt und für weitere Simulationen aufbereitet. In Zusammenarbeit mit der TUK wurden diese bewertet und im Rahmen von einzelnen Ortsnetzbegehungen begutachtet. Im Anschluss erfolgte die Festlegung auf ein Netz. Durch einzelne Umschaltungen der Topologie wurde dieses für den Einsatz des FLOW-Rs optimiert.

- **Evaluierung und Implementierung der Mess- und IKT-Technik**

Messkampagne und Feldtest machten den Einbau von Mess- und IKT-Technik erforderlich. Nach der Auswahl eines geeigneten Messsystems wurde dieses in ausgewählten Kabelverteilern und in der Ortsnetzstation eingebaut. Die Messgeräte kommunizieren über die von PPC bereitgestellte BPL-Verbindung zur Ortsnetzstation. Diese wurde wiederum durch PW mittels Richtfunkstrecke an das eigene Kommunikationsnetz angebunden.

Da die im Niederspannungsnetz gewonnenen Messdaten nur eine geringe Relevanz für die Netzleitung haben, wurde auf eine Einbindung in das Leitsystem aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen verzichtet.

- **Erfahrungsaufbau in der Integration von Smart Grids – Technologien**

Sowohl die Erfahrungen zum Einsatz des neuen Betriebsmittels, der eingesetzten BPL-Technologie sowie der Erfassung von Messdaten führten zu einer starken Erweiterung des eigenen Know-Hows. Dieses kann bei zukünftigen Problemstellungen eingesetzt werden. PW und PWN sind dadurch in der Lage eine weitere innovative Maßnahme zur Entlastung der Netze bei zunehmender Integration von Erzeugern und Lasten einzusetzen.

Die Erfahrungen werden innerhalb der Planungsgrundsätze festgeschrieben und bei internen Veranstaltungen mit den nicht am Projekt beteiligten Kollegen geteilt.

### 3 Eingehende Darstellung der Projektdurchführung

#### 3.1 Analyse

##### 3.1.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik wurde im Rahmen der ersten Analysen zu Beginn des Projektes erarbeitet. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in Abschnitt 1.5 dargestellt.

##### 3.1.2 Auswahl des Testnetzes

Die Auswahl eines Testnetzes, welches zu Simulationszwecken aber auch für die spätere Messkampagne sowie den Feldtest genutzt wurde, erfolgte insbesondere in Zusammenarbeit zwischen der TUK und der PWN. Aufgrund der unternehmenseitig bekannten Schwerpunktnetze, welche bereits einen hohen Anteil an PV-Anlagen aufwiesen, wurde eine Vorauswahl mit 22 möglichen ländlichen Ortsnetzen getroffen. Diese wurden im Rahmen intensiver Simulationsstudien durch die TUK untersucht. Aufgrund der nicht vorhandenen Messdaten zu Spannungen und Strömen konnten die Simulationen nur mittels synthetischer Lastflussdaten für Lastzeitreihen durchgeführt werden. Mit Hilfe der Lastzeitreihen mit 15-Minuten-Zeitwerten wurde für alle Netze der Zeitraum eines Jahres simuliert. Abbildung 3.1 stellt die Visualisierung der Ergebnisse einiger untersuchter Netze in einem speziell entwickelten Excel-Tool dar. Die Punkte symbolisieren die jeweiligen Netzknoten. Die Färbung ergibt sich aus den am Knoten anliegenden Netzspannungen unterschiedlicher Szenarien. Die sich daraus ergebenden umrissenen Flächen stellen zugleich die Ausdehnung der Netze in den jeweiligen Orten dar.

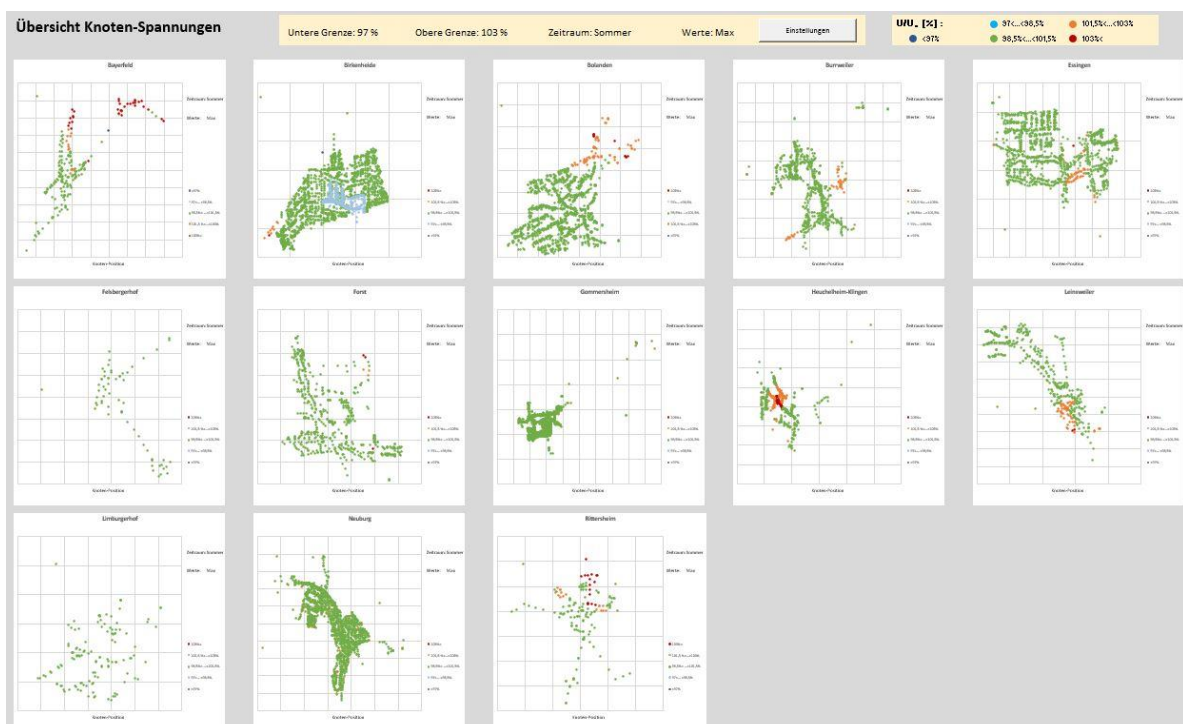


Abbildung 3.1 : Darstellung der Simulationsergebnisse im Excel-Tool

Nach der Selektion einzelner Ortsnetze mit einem hohen Anteil hoher Knotenspannungen wurde eine Ortsbegehung vor Ort durchgeführt. Aufgrund derer erfolgte die Nominierung von Heuchelheim-Klingen, Landkreis Südliche Weinstraße in Rheinland-Pfalz, zum Testnetz für Messkampagne und Feldtest.

Das Ortsnetz teilt sich in drei von unterschiedlichen Ortsnetzstationen versorgte Netze auf. Aufgrund der Topologie fand die Auswahl zugunsten des Netzes gespeist durch die Ortsnetzstation (Umspannungspunkt) „UP Bahnhofstraße“ statt. Dieser Teil des Netzes zeichnet sich durch die in Tabelle 3.1 gegebenen Strukturmerkmale aus:

**Tabelle 3.1 : Strukturmerkmale UP Bahnhofstraße**

Merkmal	
<b>Hausanschlüsse (HA)</b>	114
<b>PV-Anlagen</b>	38
<b>Installierte PV-Leistung</b>	384 kWp
<b>Mittlere PV-Anlagenleistung</b>	10,1 kWp
<b>PV/HA</b>	3,4 kWp

Die Hauptleitungen des Netzes sind mit dem Kabeltyp NAYY4x95 ausgeführt. Für diesen Kabeltyp liegt der zulässige thermische Grenzstrom im Falle einer Erdverlegung bei  $I_{th} = 215$  A.

### 3.1.3 Installation und Betrieb des BPL-Kommunikationsnetzes im Testnetz

Nachdem das Netz in Heuchelheim-Klingen als Testnetz für den Feldtest des FLOW-R ausgewählt wurde, erfolgte die Planung des Kommunikationsnetzes zur kommunikativen Anbindung der Systemkomponenten im Testnetz. Nach erfolgter Planung wurden die BPL-Komponenten installiert und in Betrieb genommen. Zur Überwachung der BPL-Komponenten, zur Auslesung der Messgeräte und zur Steuerung des FLOW-R in den Feldtest wurde eine sichere Kommunikationsverbindung von den Projektpartnern in das Testnetz benötigt. Um eine schnelle Auslesung der installierten Messgeräte zu ermöglichen, wurde von der PPC mit Hilfe eines UMTS-Routers ein sicherer VPN-Tunnel zur PPC und dem dort verfügbaren Netzwerküberwachungssystem für das BPL-Netz aufgebaut. Über diese Verbindung war es direkt nach der Installation der Messgeräte möglich, diese auszulesen, um Vergleichsdaten für den Feldtest des FLOW-R zu sammeln. Im späteren Verlauf des Projektes wurde die UMTS-Strecke durch eine Kombination aus Richtfunkverbindung und Glasfaseranbindung der Pfalzkom|Manet ersetzt. Im Zuge dieser Umstellung wurde auch der VPN-Router ausgetauscht und ein Zugang für alle beteiligten Projektpartner ins Testnetz ermöglicht.

Abbildung 3.2 zeigt das Schema zum Kommunikationsnetz. In Abbildung 3.3 wird eine Übersicht zu den installierten BPL-Geräten im Testnetz gegeben.

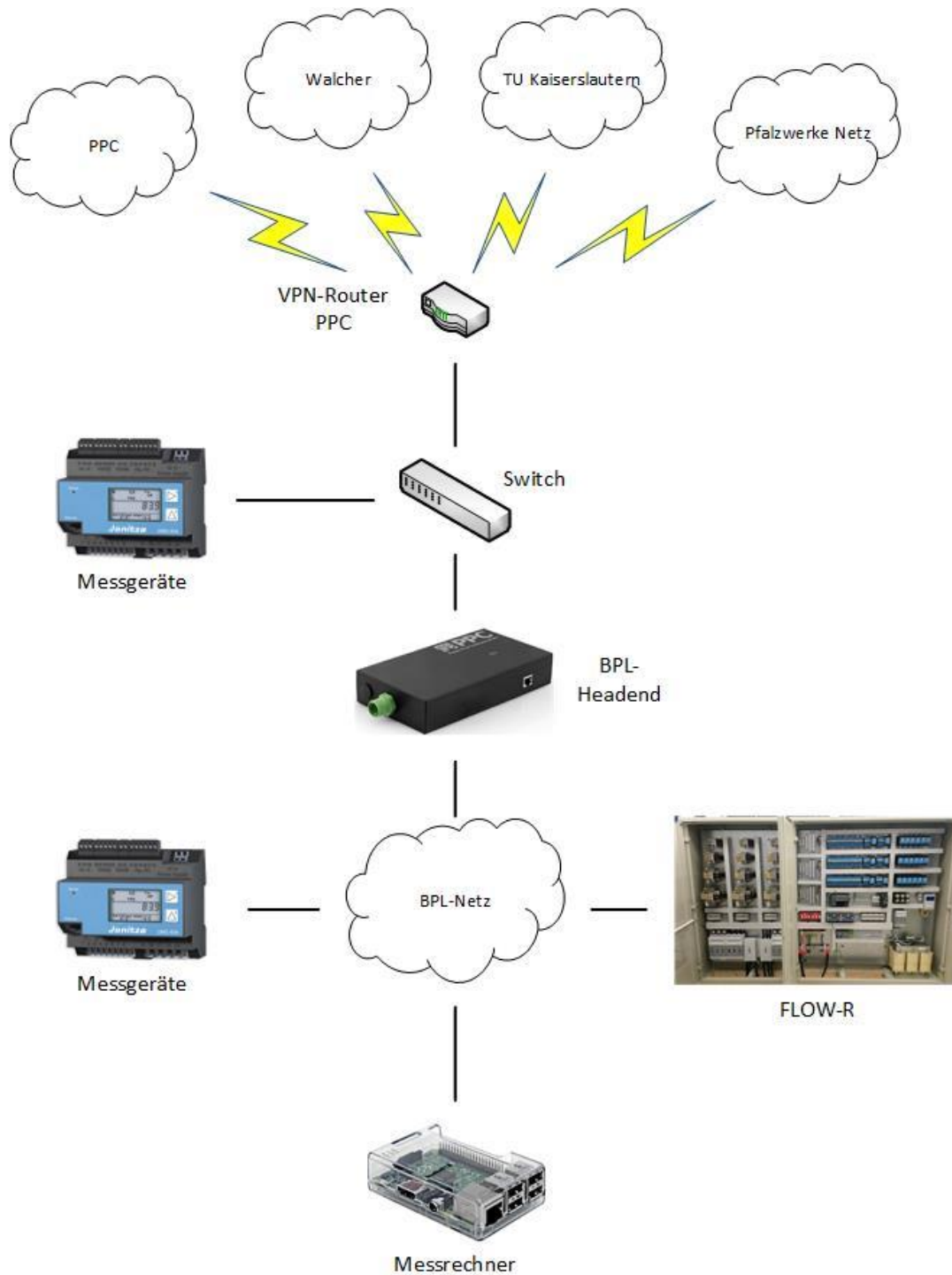


Abbildung 3.2: Kommunikationsnetz in Heuchelheim-Klingen

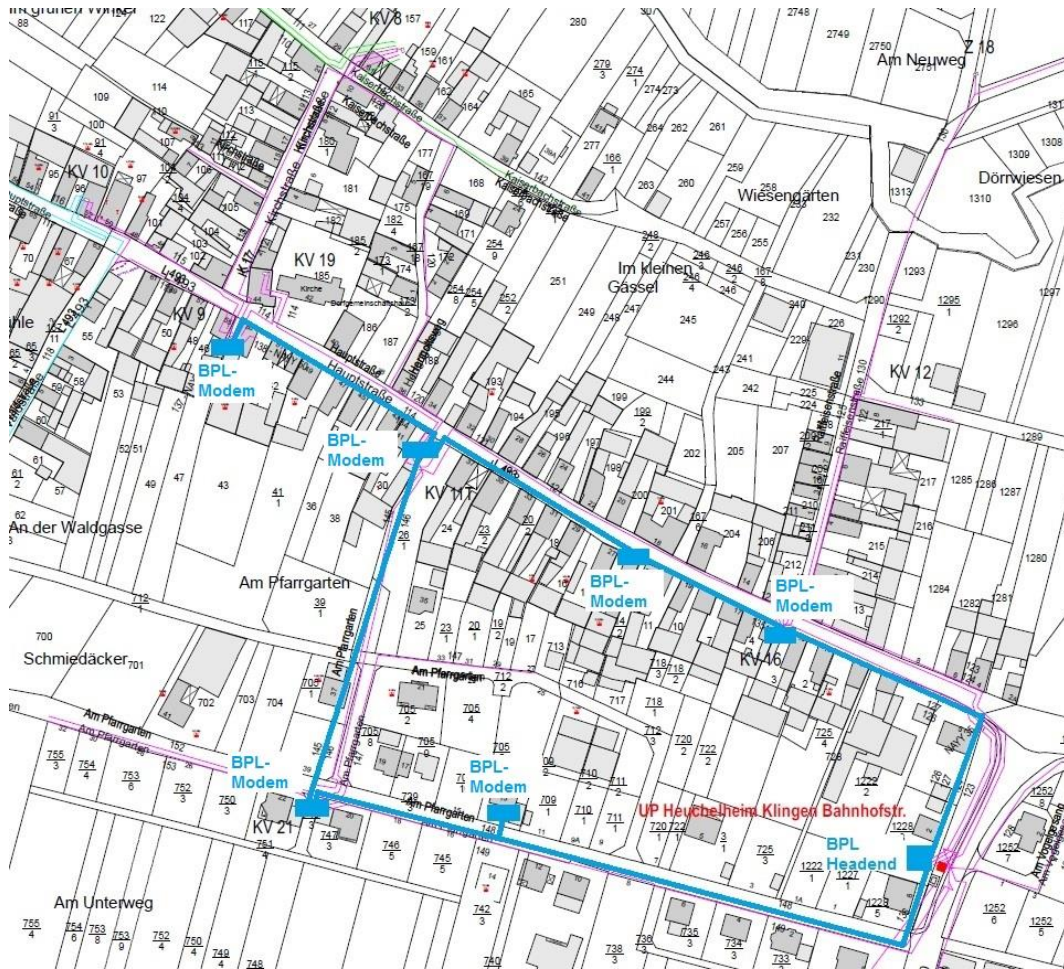


Abbildung 3.3: Übersicht der installierten BPL-Geräte im Netzplan

Durch die Installation zweier zusätzlicher BPL-Modems im Netz konnte eine hohe Ausfallsicherheit des Kommunikationsnetzes erreicht werden, so dass auch bei Störung einzelner Verbindungsabschnitte die Kommunikation zwischen dem FLOW-R und den Messgeräten im Netz aufrechterhalten werden konnte.

Nach der Implementierung der Lösung zum lokal-autarken Regelsignalaustausch wurde die entwickelte Software auf die BPL-Geräte im Testnetz aufgespielt und im Echtbetrieb getestet. Die Umsetzung der wesentlichen Anforderungen an die Software konnten im Feldtest bestätigt werden. Durch die obengenannten Maßnahmen und eine weitere Optimierung der Software während des Feldtests konnte eine Verfügbarkeit der Kommunikation von über 99,9% an allen Messpunkten im Netz erreicht werden.

Im Feldtest fanden sich zusätzlich weitere Verbesserungspotentiale, die vor der Marktreife der Software noch implementiert werden müssen.



### 3.1.4 Messkampagne im Testnetz

Aufgrund der Ergebnisse zur Auswahl des Testnetzes konnte eine erste Einschätzung bezüglich der für eine Messkampagne relevanten Knoten und Leitungen erfolgen. Hierzu fiel ein Schwerpunkt auf Knoten mit hohen Knotenspannungen sowie auf Leitungen mit einer potentiell hohen Auslastung. Infolge dessen fand die Auswahl der hierfür notwendigen Messtechnik unter Einbeziehung und Abstimmung aller Partner statt. Bei der anschließenden Anschaffung wurden Geräte der Hersteller Janitza, Typ UMG604 und UMG96 sowie A. Eberle, Typ PQi smart gewählt.

Abbildung 3.4 stellt den Netzplan des gewählten Ortsnetzes sowie die implementierten Messgeräte grafisch dar. In der Ortsnetzstation mit der Bezeichnung „UP Heuchelheim Klängen Bahnhofstraße“ wurden sechs Messgeräte zur Erfassung der unterspannungsseitigen Sammelschienenspannung sowie der Ströme mehrerer Stromkreisabgänge installiert. Weitere Messgeräte wurden in mehreren Kabelverteilerschränken (KV) innerhalb der Netzmasche (KV16, KV21 KV11T) sowie im Netzausläufer, ausgehend von KV11T, im KV9 installiert. Die kommunikative Erschließung der Janitza-Geräte wurde durch die von PPC bereitgestellte BPL-Technik ermöglicht. Hierzu wurden in den genannten KVs BPL-Modems sowie im UP ein BPL-Headend installiert. Mittels UMTS-Verbindung konnte durch PPC über die Auswerte- und Visualisierungssoftware GridVis auf die Messgeräte zugegriffen werden. Im Rahmen der seit November 2015 gestarteten Messkampagne und des späteren Feldtests erfolgte somit eine wöchentliche Auslesung der 1-Minuten-Messwerte. Die abgerufenen Daten konnten nachfolgend durch die TUK visualisiert und mit den Projektpartnern ausgewertet werden.

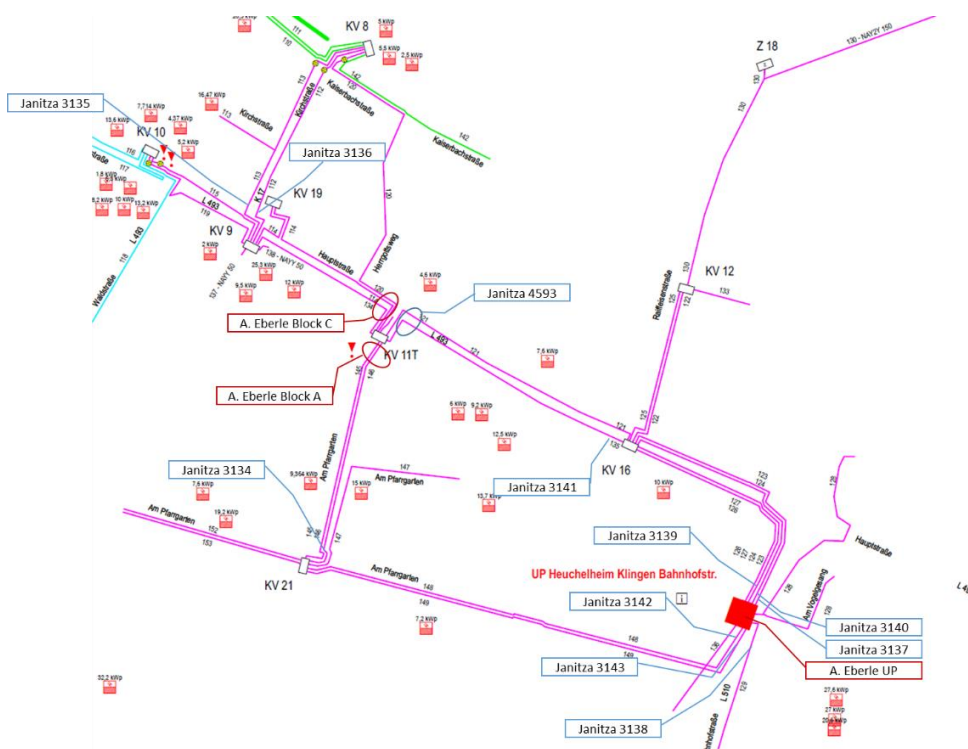


Abbildung 3.4: Netzplan des Testnetzes mit Darstellung der Messpunkte



Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht der im Jahresverlauf 2015 gemessenen Maximalwerte an den oben dargestellten Messpunkten. Hierbei weisen insbesondere MP 3135 die höchsten Spannungswerte und MP 3141 die höchsten Stromwerte auf. Liegen die Spannungen des Leiters L1 bereits über 8 %  $U_n$ , so geben die Ströme keine Hinweise auf eine hohe thermische Beanspruchung des Kabels. Die an diesem Messpunkt installierte Hauptleitung ist bezogen auf den zulässigen Grenzstrom  $I_{be} = 215 \text{ A}$  nur zu ~58 % ausgelastet.

Tabelle 3.2 : Übersicht der Messdaten

Messgerät	$I_{L1}$	$I_{L2}$	$I_{L3}$	$U_{L1}$	$U_{L2}$	$U_{L3}$
3134	38,9	32,2	36,3	246,8	244,6	241,5
3135	80,6	76,8	70,5	248,5	247,8	241,6
3136	48,9	30,4	45,0	248,4	247,8	241,6
3137	49,3	38,8	40,8	242,1	241,6	241,1
3138	60,7	51,5	53,8	241,9	241,3	241,1
3139	52,1	41,0	41,8	241,9	241,6	241,0
3140	54,7	46,9	53,8	242,2	241,5	241,2
3141	124,2	97,3	93,8	243,8	243,4	240,5
3142	48,3	42,7	46,6	241,9	241,6	241,1
3143	68,2	67,3	68,0	242,0	241,4	241,0
4593	73,5	59,7	55,2	246,7	245,7	241,3

Die Ergebnisse der Messkampagne zeigen, dass bei einer Integration von zusätzlichen Erzeugungsanlagen ein Handlungsbedarf bezüglich der Spannung am MP 3135 besteht. Die geringe Auslastung im MP 3141 macht hingegen keine Eingriffe erforderlich. Aufgrund der Simulationsergebnisse zur Vorausswahl möglicher Testnetze wurde hier eine höhere Auslastung vermutet.

Obgleich der Einsatz eines wirkleistungsflussregelnden Betriebsmittels nicht zwingend erforderlich ist, wurde aufgrund der ansonsten optimalen Gegebenheiten für den Feldtest am gezeigten Netz festgehalten. Sowohl aus topologischer, als auch netztechnischer Sicht, konnten hier gute Bedingungen vorgefunden werden. Dem Einsatz eines FLOW-Rs spricht die geringe Auslastung nicht entgegen. Zur Darstellung der Wirkungsweise ist lediglich eine Anpassung der Soll- und Grenzwerte erforderlich.

## 3.2 Konzept

### 3.2.1 Analytische Herleitung der Steuerspannung

In den Hoch- und Höchstspannungsnetzen (HS/HÖS) werden zur Steuerung der Wirk- und Blindleistungsflüsse Regeltransformatoren eingesetzt. Ziel ist die Spannungshaltung sowie eine optimierte Auslastung von Übertragungsleitungen. Die auf konventioneller Technik basierenden Transformatoren

werden als Längs-, Quer- oder Schräg regler ausgeführt. Durch die Addition einer komplexen Zusatzspannung  $\underline{U}_{ZU}$  zur Netzspannung wird eine Spannungs- und Leistungsflusssteuerung ermöglicht. Das Ziel ist eine effiziente Auslastung der Betriebsmittel und Erhöhung der Gesamtübertragungskapazität.

In Abhängigkeit des gewählten Winkels  $\alpha$  können Blind- und Wirkanteil des Leistungsflusses gesteuert werden. Mit einem Winkel  $\alpha = 0^\circ$  (Längsregler) kann der Blindleistungsfluss oder mit  $\alpha = 90^\circ$  (Querregler) der Wirkleistungsfluss durch  $\underline{U}_{ZU}$  geändert werden. Um einen gleichmäßigen Einfluss auf Wirk- und Blindleistung zu erhalten, wird in Übertragungsnetzen aufgrund des  $X/R$ -Verhältnisses zumeist  $\alpha = 60^\circ$  (Schräg regler) gewählt. Das zugrunde liegende Prinzip kann in gleicher Weise zur Lastflusssteuerung für vermascht betriebene NS-Verteilnetze eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den stark durch ihre Reaktanz geprägten Hoch- und Höchstspannungsnetzen, weisen die dort anzutreffenden Impedanzen hauptsächlich ohmsche Anteile auf. Infolge dessen unterscheiden sich die optimalen Winkel zur Wirk- und Blindleistungsregelung von den oben dargestellten Winkeln.

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die häufig in NS-Netzen verwendeten Kabeltypen und deren Parameter. Aus den Resistenzen  $R$  und Reaktanzen  $X$  kann der Impedanzwinkel  $\psi$  abgeleitet werden.

**Tabelle 3.3 : Auswahl häufige verwendeter Kabeltypen und deren Parameter**

	Typ	R in $\Omega/\text{km}$	X in $\Omega/\text{km}$	Z in $\Omega/\text{km}$	$\psi$ in $^\circ$	X/R
Erdkabel	NAYY 4x95	0,320	0,082	0,330	14,68	0,26
	NAYY 4x150	0,206	0,080	0,221	22,25	0,39
	NAYY 4x185	0,164	0,080	0,182	26,03	0,49
	NY Y 4x95	0,193	0,082	0,210	23,02	0,42
	NY Y 4x150	0,124	0,080	0,148	32,83	0,65
	NY Y 4x185	0,099	0,080	0,127	38,94	0,81
	NAKLEY 3x95	0,321	0,068	0,328	11,96	0,21
	NAKLEY 3x150	0,208	0,068	0,219	18,10	0,33
	NAKLEY 3x185	0,167	0,067	0,180	21,86	0,40
Freileitung	F-AL 4x50	0,615	0,376	0,721	31,44	0,61
	F-AL 4x70	0,463	0,367	0,591	38,40	0,79
	F-AL 4x95	0,326	0,356	0,483	47,52	1,09
	F-CU 4x50	0,377	0,376	0,532	44,92	1,00
	F-CU 4x70	0,284	0,367	0,464	52,27	1,29
	F-CU 4x95	0,200	0,356	0,408	60,67	1,78

Im Kontext des nachfolgend erläuterten Spannungs- und Wirkleistungsreglers für NS-Verteilnetze wird die Zusatzspannung als Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}$  bezeichnet, da diese einer ständigen Änderung von Betrag und Winkel zur Regelung eines Sollstromes unterliegt.

Zur Entwicklung des Regelungskonzeptes musste eine Analyse der mathematischen Grundlagen vorgenommen werden. Hierzu wurden vereinfachte Ringstrukturen mit nur einer Last bis hin zu einer beliebigen Anzahl an Lasten (Abbildung 3.5) betrachtet. Der innerhalb des Ringes befindliche Regler

prägt eine Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}$  auf die Netzspannung auf. Aufgrund der nicht vorhandenen Messtechnik in NS-Netzen werden lediglich die Ströme durch den Regler sowie in einzelnen Messpunkten gemessen.

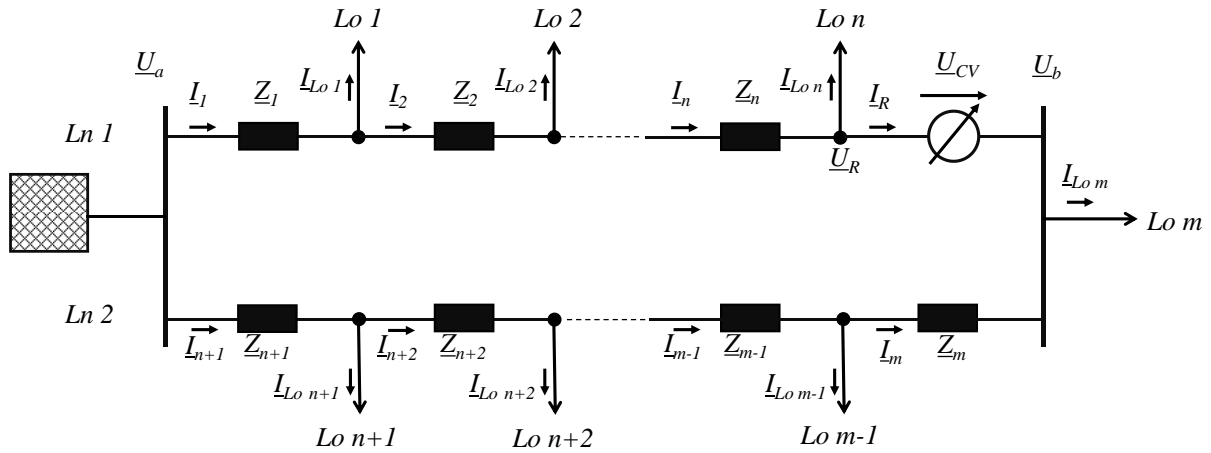


Abbildung 3.5: Vereinfachte Ringstruktur mit unbestimmter Anzahl an Lasten

Somit können anhand des gezeigten Netzes die Gleichung (1) und Gleichung (2) hergeleitet werden. Sie stellen den mathematischen Zusammenhang zwischen einer Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}$  und dem Stromfluss durch den Regler  $\underline{I}_R$  dar. Die Impedanzen der Leitungsabschnitte zwischen den Knoten werden dabei durch  $\underline{Z}_i$  und  $\underline{Z}_j$  eingebracht. Die unbekanntenen Ströme durch die Lasten  $Lo 1$  bis  $Lo m$  werden durch  $\underline{I}_{Li}$  repräsentiert. Diese können durch die Spannung  $\underline{U}_{LC}$  als Substitution der unbekanntenen Lastströme zusammengefasst werden.

$$\underline{U}_{CV} = -\underline{I}_R \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i - \sum_{i=1}^n \left( \underline{I}_{Li} \cdot \sum_{j=1}^i \underline{Z}_j \right) + \sum_{i=n+1}^m \left( \underline{I}_{Li} \cdot \sum_{j=n+i}^m \underline{Z}_j \right) \quad (1)$$

$$= -\underline{I}_R \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i + \underline{U}_{LC}$$

mit

$$\underline{U}_{LC} = - \sum_{i=1}^n \left( \underline{I}_{Li} \cdot \sum_{j=1}^i \underline{Z}_j \right) + \sum_{i=n+1}^m \left( \underline{I}_{Li} \cdot \sum_{j=n+i}^m \underline{Z}_j \right) \quad (2)$$

Aufgrund der Änderung einer zum Zeitpunkt  $t$  eingepprägten Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}^{(t)}$  zu einer Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}^{(t+1)}$  zum Zeitpunkt  $t+1$ , ergibt sich eine Änderung des Stromes  $\underline{I}_R^{(t)}$  zu  $\underline{I}_R^{(t+1)}$  (vgl. Gleichung (3)).

Steuerspannungs- und Stromänderung lassen sich nach Gleichung (4) zu  $\Delta \underline{U}_{CV}^{(t)}$  und  $\Delta \underline{I}_R$  zusammenfassen. Die Änderung des Stromes  $\Delta \underline{I}_R$  wird nachfolgend als Steuerstrom  $\underline{I}_{CV}$  bezeichnet.

$$\Delta \underline{U}_{CV} = \underline{U}_{CV}^{(t+1)} - \underline{U}_{CV}^{(t)} = \left( -\underline{I}_R^{(t+1)} + \underline{I}_R^{(t)} \right) \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i + \left( \underline{U}_{LC}^{(t+1)} - \underline{U}_{LC}^{(t)} \right) \quad (3)$$

$$\Delta \underline{U}_{CV} = \left( -\Delta \underline{I}_R \right) \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i \quad \text{mit} \quad \Delta \underline{I}_R = \underline{I}_{CV} \quad (4)$$

Der eingeprägte Steuerstrom  $\underline{I}_{CV}$  ruft aufgrund des geltenden Superpositionsprinzips eine Änderung in allen Strömen in der den Regler einschließenden Masche hervor (Abbildung 3.6).

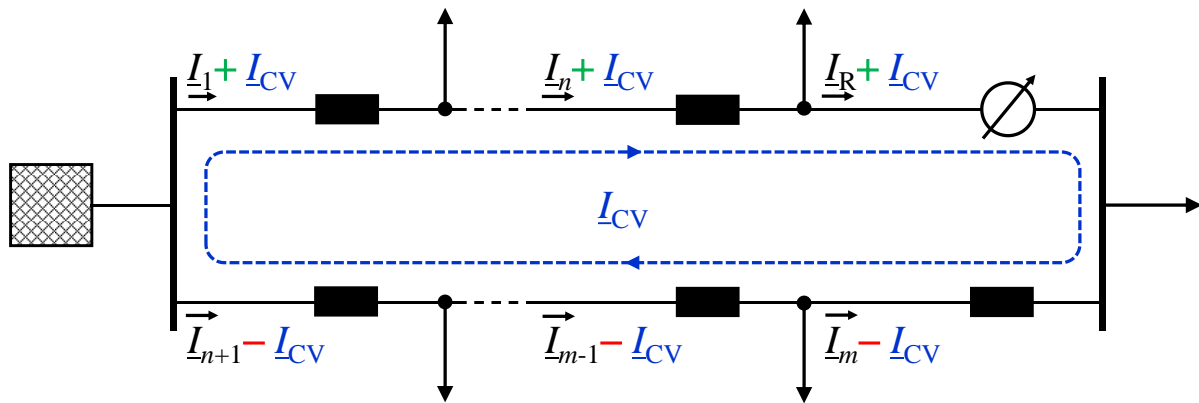


Abbildung 3.6 : Steuerstrom innerhalb eines Netzzings

Zur kontinuierlichen Anpassung des Stromes  $\underline{I}_R$  kann die Änderung der Steuerspannung  $\underline{U}_{CV}$  in einem iterativen Prozess durchgeführt werden. Für diesen gilt:

$$\underline{U}_{CV}^{(t+1)} = \Delta \underline{U}_{CV} + \underline{U}_{CV}^{(t)} \Rightarrow \underline{I}_R^{(t+1)} = \underline{I}_{CV} + \underline{I}_R^{(t)} \quad (5)$$

### 3.2.2 Maschenimpedanz

Der Aufwand zur Bestimmung der zuvor erläuterten Summe aus den Impedanzen der Leitungsabschnitte  $\sum_{j=1}^m \underline{Z}_i$  steigt mit der Anzahl an Leitungsimpedanzen und dem Grad der Vermaschung eines Netzes. Mittels der in Gleichung (6) gezeigten analytischen Herleitung kann diese Bestimmung automatisiert für sämtliche vermaschten Topologien durchgeführt werden: Basierend auf Gleichung (1) kann durch das Einstellen unterschiedlicher Steuerspannungen ( $\neq 0$ ) zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t+1$  und der Erfassung der jeweiligen Ströme  $\underline{I}_R$  die Maschenimpedanz  $\underline{Z}_{mesh}$  berechnet werden.

$$Z_{\text{mesh}} = \sum_{j=1}^m Z_i = \frac{U_{\text{CV}}^{(t+1)} - U_{\text{CV}}^{(t)}}{I_{\text{-R}}^{(t)} - I_{\text{-R}}^{(t+1)}} = \frac{\Delta U_{\text{CV}}^{(t)}}{\Delta I_{\text{-R}}^{(t)}} \quad (6)$$

Die dargestellte Bestimmung der Maschenimpedanz kann von einem realen FLOW-R in einem automatisierten Prozess durchgeführt werden. Dies ermöglicht dessen flexiblen Einsatz in unterschiedlichen Topologien.

### 3.2.3 Design eines FLOW-Rs

#### 3.2.3.1 Technische Realisierung der Steuerspannungserzeugung

Aus Kosten-, Wartungs- und Lebensdauergründen wurde ein auf konventioneller Transformator- und Schaltungstechnik basierendes Konzept zur Realisierung diskreter Spannungs- und Winkelstufen entwickelt. Mit diesem können die analytisch bestimmten Betrags- und Winkelwerte für  $U_{\text{CV}}$  durch sinnvolle Diskretisierung der Werte realisiert werden. Untersuchungen in [11] haben gezeigt, dass mit den nachfolgend genannten diskreten Stufen eine ausreichende Genauigkeit zur Erfüllung der Regelziele erreicht wird:

$$U_{\text{CV}} = -8\% \dots + 8\% \quad \text{von } U_{\text{AC}} \text{ in } 0,2\% \text{ - Stufen} \quad (7)$$

$$\delta = 0^\circ \dots 360^\circ \text{ in } 30^\circ \text{ - Stufen} \quad (8)$$

Der Schaltkreis in Abbildung 3.7 zeigt den schematischen Aufbau der Betragssteuerung (MC = Magnitude Control) für einen Leiter. Mit Hilfe der Wendeschütze können die Spannungen der Stufentransformatoren positiv oder negativ zur Leiter-Erd-Spannung addiert werden. Durch Kombination ergeben sich die vorab genannten Stufen für den Steuerspannungsbetrag  $U_{\text{CV}}$ .

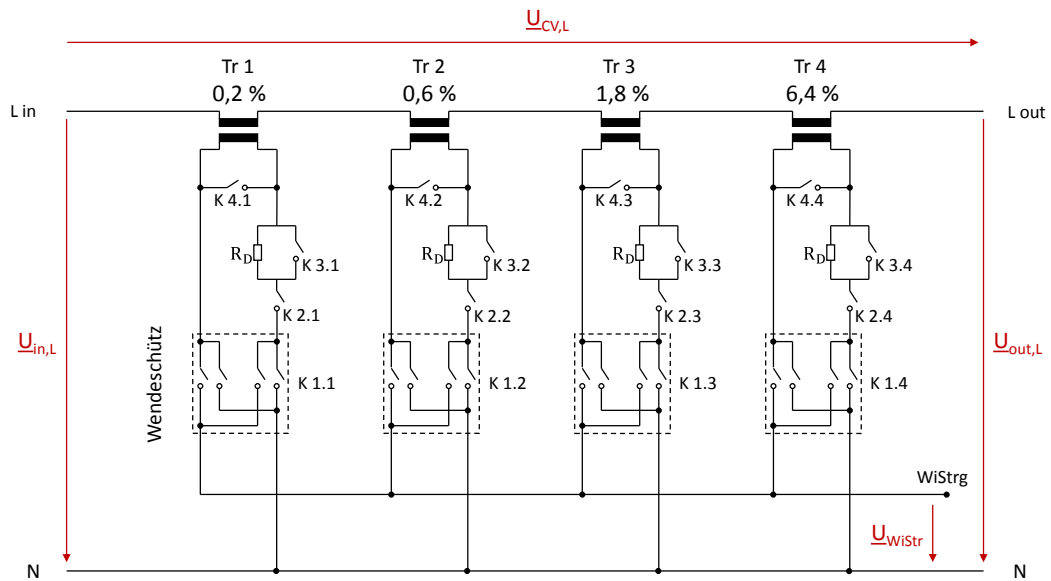


Abbildung 3.7 : Schaltkreis zur Steuerspannungsbetragssteuerung

Tabelle 3.4 stellt die Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Transformatoren (Tr 1 bis Tr 4) zur Erzeugung einer Steuerspannung dar:

Tabelle 3.4: Kombinatorik zur Steuerspannungserzeugung

Stufe		Tr 1	Tr 2	Tr 3	Tr 4
0	0%	0	0	0	0
1	0,2%	+	0	0	0
2	0,4%	-	+	0	0
3	0,6%	0	+	0	0
...					
39	7,8%	0	+	+	+
40	8,0%	+	+	+	+

±Vorzeichenwahl durch Wendeschütz

Die Schaltung zur Betragssteuerung wird für jeden Leiter L1 bis L3 implementiert. Die Versorgung der Transformatoren erfolgt über den Anschluss „WiStrg“ (Abbildung 3.8), welcher an die Winkelsteuerung angebunden ist.

Abbildung 3.8 stellt den übergeordneten Schaltkreis zur Winkelsteuerung dar. Dieser versorgt die drei Schaltkreise zur Betragssteuerung (MC) aus Abbildung 3.7 für jeden Außenleiter (MC L1...L3). Die MC-Schaltkreise werden dazu in Abhängigkeit der einzustellenden Winkel  $\delta$  mit einer der drei am Regler anliegenden Außenleiterspannungen versorgt. Weiterhin existiert ein Phasenschiebertransformator in Schaltgruppe „Dyn11“. Die Auswahl der Versorgungsspannungen erfolgt über die dargestellte Relais-Matrix und ermöglicht das Einstellen der zuvor genannten Winkelstufen in 30°-Schritten [9].

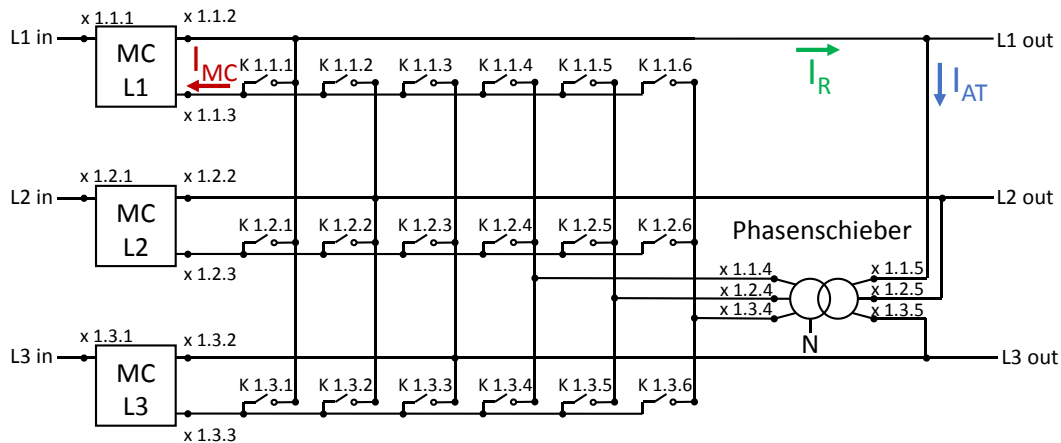


Abbildung 3.8 : Schaltkreis zur Winkelsteuerung

Tabelle 3.5 stellt die Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Schaltkreiskomponenten zur Wahl des Steuerspannungswinkels  $\alpha$  dar.

Tabelle 3.5: Kombinatorik zur Winkelansteuerung

		Steuerspannungswinkel $\alpha$													
		Relais	$\delta$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Netz	K L.1	0	X												
	K L.2	120						X						X	
	K L.3	240			X						X				
Phasen-schieber	K L.4	30		X						X					
	K L.5	150						X							X
	K L.6	270				X						X			
Wendeschutz		180			X	X			X	X			X	X	

### 3.2.4 Regelkonzept mittels Kennlinienverfahren

#### 3.2.4.1 Konzept

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere analytische Ansätze zur Strombetragsregelung [12] in unterschiedlichen Netzabschnitten der dargestellten Ringstruktur diskutiert. Insbesondere im Hinblick auf eine starke Vermaschung erfordern die analytischen Ansätze eine Anpassung an die jeweilige Topologie. Im Hinblick auf einen Einsatz des FLOW-R in einem realen Netz ist dies jedoch nicht praktikabel.

Zur Gewährleistung eines flexiblen, topologieunabhängigen Einsatzes mit möglichst geringem planerischem Aufwand, wurde das nachfolgend erläuterte Kennlinienverfahren entwickelt. Mit Hilfe der autonom ermittelbaren Kennlinien können der Algorithmus und das damit verbundene Regelkonzept in verschiedensten Topologien mit unterschiedlichem Vermaschungsgrad zum Einsatz kommen. Dadurch

werden eine einfache betriebliche Handhabung sowie die multiple Überwachung verschiedener Regelziele ermöglicht. Aufgrund des erklärten Zieles zur Konzeptionierung eines Verfahrens zur Einhaltung der thermischen Grenzen, ist das Kennlinien-Verfahren auf eine Anwendung im Falle eines stark ausgelasteten Netzes ausgelegt. Die dabei auftretenden Leistungsfaktoren liegen bei  $\cos \varphi \cong 1$  und bilden die Grundlage für das Verfahren.

### 3.2.4.2 Erzeugung der Kennlinien

Unter der Voraussetzung hoher Ströme gelten für  $I_{\underline{R}}$  und  $I_{\underline{CV}}$  die Winkel  $\varphi_{I_{\underline{R}}} = \varphi_{I_{\underline{CV}}} = 0^\circ \cup 180^\circ$ . Somit erfolgt eine optimale Beeinflussung des Stromes durch eine Steuerspannung nach Gleichung (9) mit einem Steuerwinkel  $\alpha \approx \psi \cup \psi + 180^\circ$ . Der Winkel  $\psi$  ergibt sich aus der Bestimmung der Maschenimpedanz  $Z_{mesh}$  und ist wesentlich vom verwendeten Kabeltyp abhängig:

$$I_{\underline{CV}} = \frac{\Delta U_{CV} \cdot e^{j\alpha}}{Z_{mesh} \cdot e^{j\psi}} = \frac{|\Delta U_{CV}|}{Z_{mesh}} \text{ für } \alpha \approx \psi \cup \psi + 180^\circ \quad (9)$$

Gleichung (9), welche eine Proportionalität zwischen Steuerstrom  $I_{\underline{CV}}$  und Steuerspannungsänderung  $\Delta U_{CV}$  aufzeigt, bildet die Grundlage für eine Geradengleichung in der Form  $f(x) = mx + b$  mit  $m = \frac{1}{Z_{mesh}}$ . Der Ordinatenabschnitt  $b$  ist gleich dem unregulierten Strom durch den Regler  $I_R^{(0)}$  im Fall von  $\Delta U_{CV} = 0$ :

$$f(\Delta U_{CV}) = \frac{1}{Z_{mesh}} \Delta U_{CV} + I_R^{(0)} \quad (10)$$

Da  $Z_{mesh}$  nur am Installationsort des FLOW-R bestimmt wird, ist dieser Wert nicht auf andere Messpunkte übertragbar. Gleichung (10) gilt somit lediglich für die Position des Reglers und der dort lokal gemessenen Ströme.

Eine allgemeine Form für alle Messpunkte geltend ist in Gleichung (11) gegeben. Der auf einer aktiven Steuerspannung in Messpunkt MP im Leiter L fließende Strom  $I_{MP,L}$  ist von der für den Messpunkt definierten Steigung  $m_{MP,L}$  und dem im unregulierten Betrieb fließenden Strom  $I_{MP,L}^{(0)}$  abhängig:

$$f_{MP,L}^{(I)}(\Delta U_{CV}) = m_{MP,L} \Delta U_{CV} + I_{MP,L}^{(0)} \quad (11)$$

In Analogie zu den Strömen ergeben sich ebenso für die Spannungen Geradengleichungen in den Messpunkten:



$$f_{MP,L}^{(U)}(\Delta U_{CV}) = m_{MP,L} \Delta U_{CV} + U_{MP,L}^{(0)} \quad (12)$$

Die Bestimmung der Steigungen  $m_{MP,L}$  sowie  $I_{MP,L}^{(0)}$  und  $U_{MP,L}^{(0)}$  erfolgt durch die Generierung von Stützpunkten SP. Hierzu werden durch den FLOW-R nacheinander zwei betragsmäßig gleiche Steuerspannungsstufen mit unterschiedlichem Vorzeichen  $U_{CV,SP}$  eingestellt. Die sich dadurch an jedem Messpunkt einstellenden Ströme  $I_{MP,L}$  und Spannungen  $U_{MP,L}$  werden gemessen und als Stützstellen für das Kennlinienverfahren verwendet. Der Vorgang kann in beliebigen Intervallen, z.B. zu jeder vollen Stunde, wiederholt werden. Abbildung 3.9 stellt das Prinzip grafisch dar. Anhand der Kennlinien können die sich in allen Messpunkten einstellenden Ströme und Spannungen in Abhängigkeit der gewählten Steuerspannung abgelesen werden.

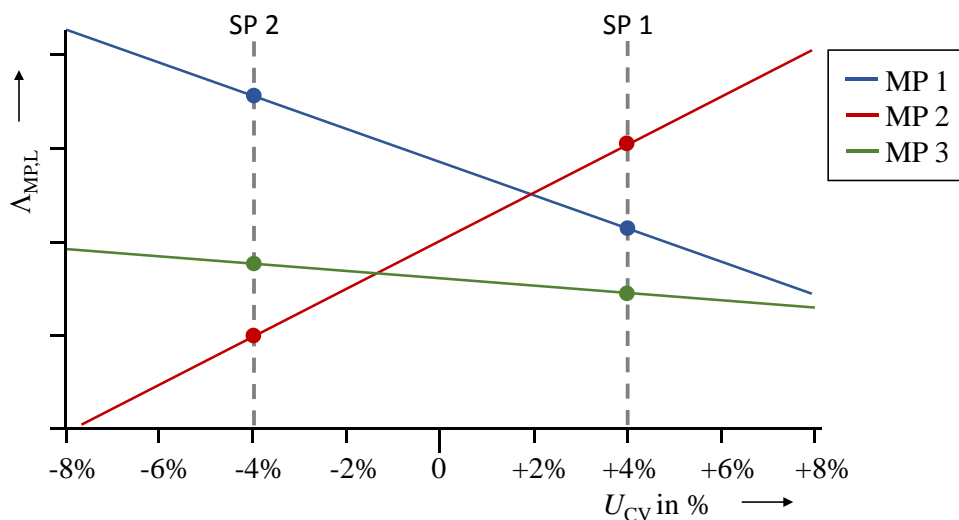


Abbildung 3.9: Erzeugung der Kennlinien mittels Stützpunkte (SP)

Im weiteren Verlauf wird bei der Erläuterung der Regelkonzepte, aufgrund der gleichen Vorgehensweise, keine Unterscheidung zwischen Spannungen und Strömen vorgenommen. Es wird daher die Variable  $\Lambda$  eingeführt, welche für einen Strom oder eine Spannung stehen kann.

### 3.2.4.3 Kontinuierliche Anpassung der Kennlinien

Aufgrund der volatilen Strom- und Spannungsbetragsänderungen in den Messpunkten erfolgt eine damit verbundene Anpassung von  $I_{MP,L}^{(0)}$  und  $U_{MP,L}^{(0)}$ , welche wiederum aus einem sich ändernden Ordinatenabschnitt resultiert. Die Steigungen bleiben aufgrund der unveränderten  $Z_{\text{mesh}}$  gleich. Durch eine zyklische Erfassung der Spannungs- und Stromwerte aller Messpunkte können eine Aktualisierung des Ordinatenabschnitts und eine darauf basierende Parallelverschiebung aller Kennlinien zu den gemessenen Strom- und Spannungswerten erfolgen. Am Beispiel in Abbildung 3.10 wird eine Parallelverschiebung der Kennlinie in MP 1 aufgrund des gemessenen Wertes zum Zeitpunkt  $t+1$ , abweichend von der Messung zum Zeitpunkt  $t$ , vollzogen. Aufgrund einer stetigen Aktualisierung ist eine ständige

Überwachung aller Messpunkte möglich. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für Soll- oder Grenzwert-Regelkonzepte sind nachfolgend erläutert.

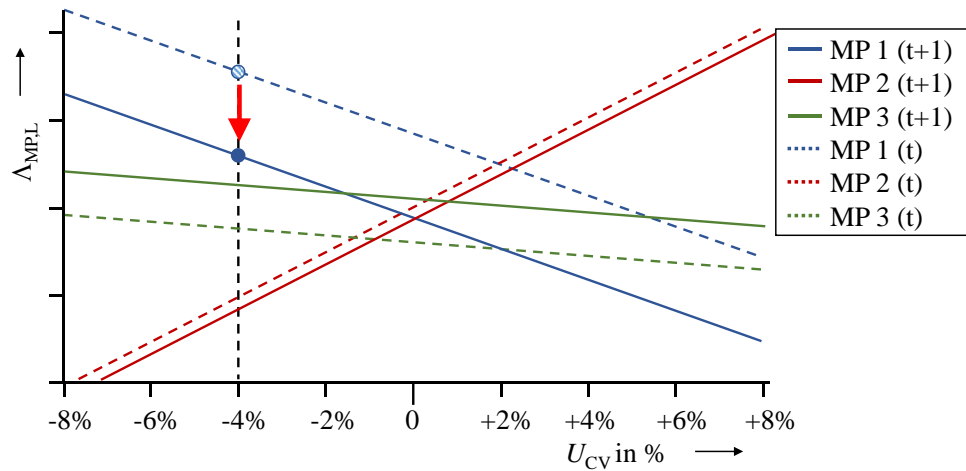


Abbildung 3.10: Anpassung der Kennlinien nach Erfassung aktualisierter Messwerte

#### 3.2.4.4 Regelkonzepte zur Sollwert-Regelung und Grenzwertüberwachung

Eine Sollwert-Regelung kann grundsätzlich nur für Spannung oder Strom an einem einzigen Messpunkt stattfinden. Die Spannungen und Ströme in allen weiteren Messpunkten ergeben sich aufgrund der zur Regelzielerreichung eingestellten Steuerspannung. Die schematische Darstellung in Abbildung 3.11 stellt den Zusammenhang grafisch dar. Der vorgegebene Sollwert gibt aufgrund der Kennlinie des gewählten Messpunktes die Steuerspannung  $U_{CV}$  vor. Aufgrund der sich ständig ändernden Lastflüsse erfolgt die vorab erläuterte zyklische Aktualisierung der Kennlinie. Diese resultiert bei sämtlichen Regelzielen in einem sich ebenso zyklisch ändernden  $U_{CV}$  zur Einhaltung des Sollwertes.

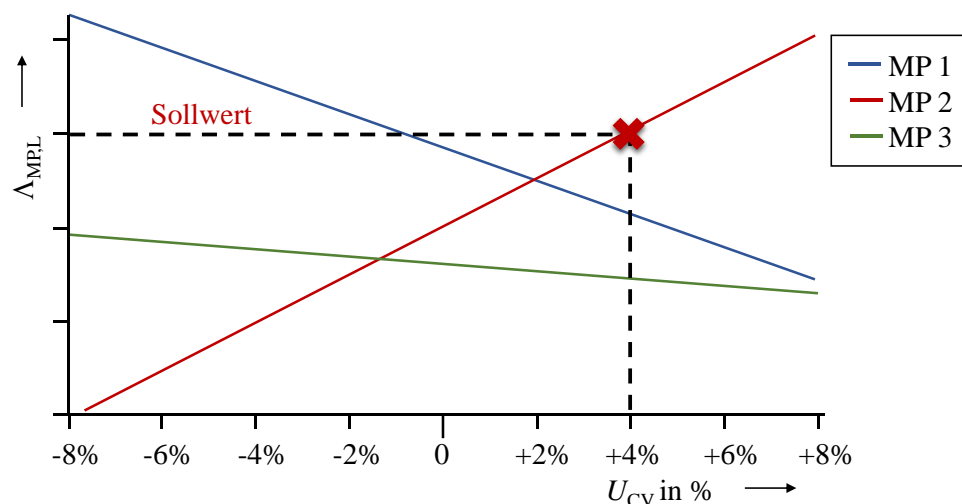


Abbildung 3.11 : Schematische Darstellung einer Sollwert-Regelung

Dieses Prinzip kann ebenso für eine Grenzwertüberwachung verwendet werden. Im Hinblick auf die Einhaltung von Strom- bzw. Spannungs-Restriktionen und der Vermeidung möglicher Überschreitungen, insbesondere zur Verhinderung einer thermischen Grenzwertverletzung, wird diesem Regelziel für einen realen Betrieb die höchste Relevanz beigemessen.

Im Gegensatz zur Sollwert-Regelung kann dabei eine Vergabe mehrerer Grenzwerte an unterschiedlichen Messpunkten erfolgen. Der Regler verbleibt so lange im Standby-Betrieb ( $U_{CV}=0$ ), bis an einem der Messpunkte eine Überschreitung eines für diesen Messpunkt individuell festgelegten Grenzwertes detektiert wird.

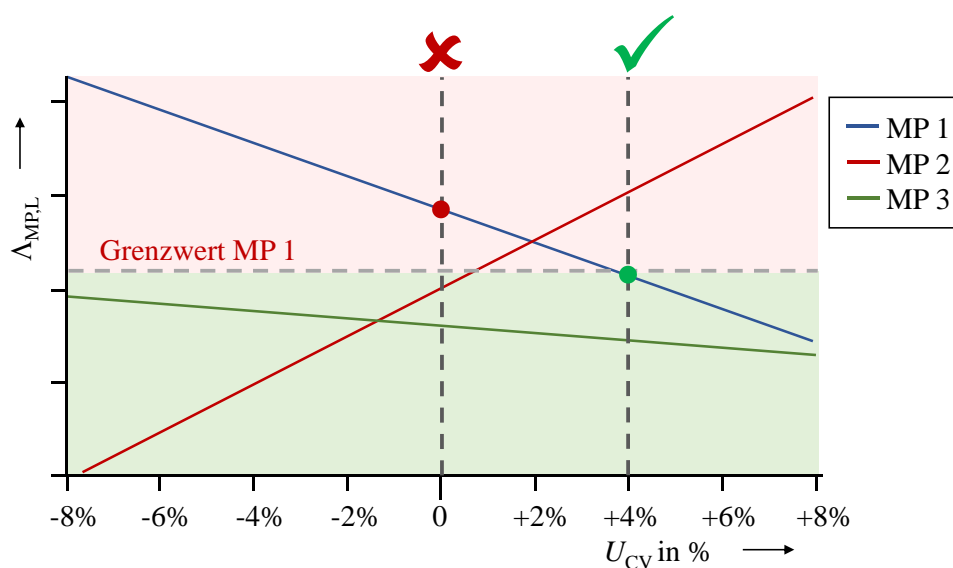


Abbildung 3.12 : Grenzwertüberwachung an einem Messpunkt

Abbildung 3.12 stellt hierzu den Zusammenhang grafisch dar. Erst bei einer Grenzwertverletzung an MP 1 für  $U_{CV} = 0$  wird der Regler aktiv. Danach ermittelt dieser anhand der Kennlinienparameter den optimalen Steuerspannungswert zur Einhaltung des Grenzwertes und stellt diesen ein. Dieser Prozess erfolgt in Analogie zur Sollwert-Regelung zyklisch.

Das dargestellte Konzept kann ebenso für mehrere gleichzeitig auftretende Grenzwertverletzungen angewendet werden. Kann in diesem Falle keine eindeutige Stufe zur Einhaltung aller Grenzwerte eingestellt werden, wird eine mittlere Steuerspannungsstufe mit möglichst geringer Grenzwertverletzung aller Grenzwerte eingestellt. Die Überschreitungen der Grenzwerte sind somit nicht vollständig vermieden, können aber auf ein Minimum reduziert werden (vgl. Abbildung 3.13).

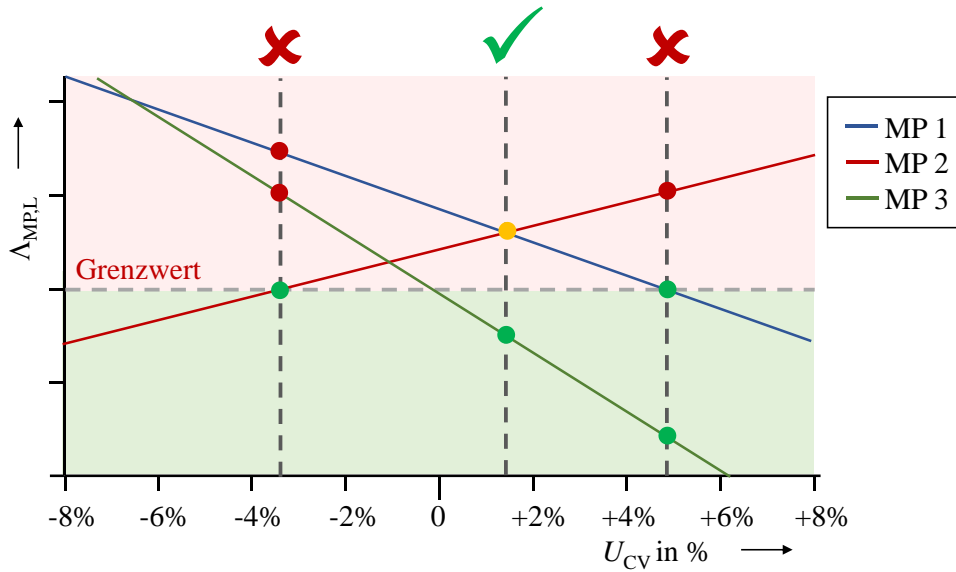


Abbildung 3.13: Mehrfache Grenzwertverletzung

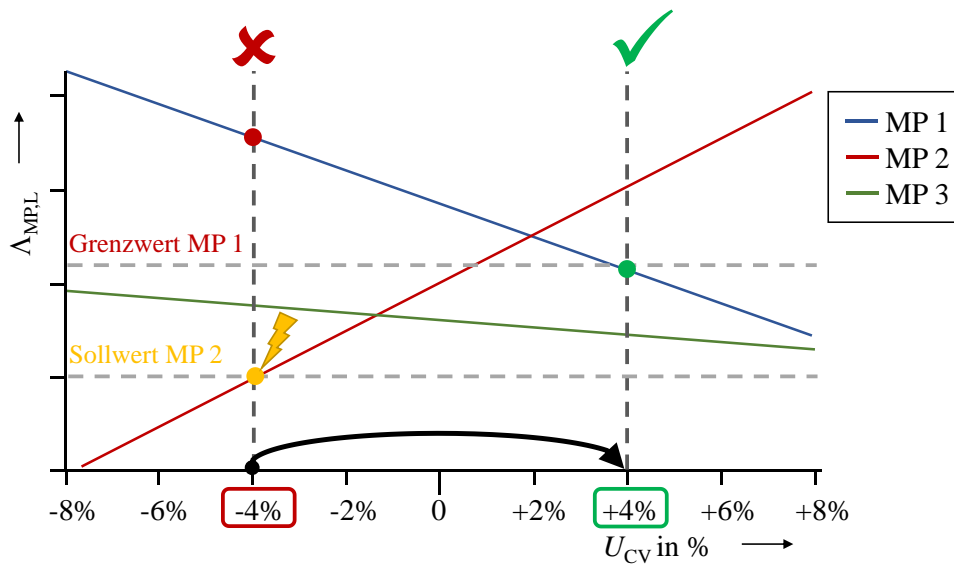


Abbildung 3.14 : Kombinierte Sollwert-Regelung mit Grenzwertüberwachung

Neben der reinen Sollwert-Regelung und Grenzwertüberwachung ist weiterhin die Kombination der beiden Regelziele möglich. Hierbei erfolgt eine Sollwert-Regelung bis zur Überschreitung eines beliebig festgelegten Grenzwertes. Wegen der höheren Priorität des Regelzieles zur Grenzwertüberwachung wechselt der Regelalgorithmus fortan in den Grenzwertüberwachungsmodus (Abbildung 3.14). Besteht keine Grenzwertverletzung mehr, wird die Sollwertregelung fortgeführt.

Die Priorisierung trägt insbesondere dem Schutz der Betriebsmittel bei hohen Strömen Rechnung. Weiterhin erhält die Strom-Grenzwertüberwachung eine höhere Priorität als die Spannungs-Grenzwertüberwachung. Da keine regelnden Mechanismen zur Einhaltung der thermischen Grenzströme in den

Netzen vorgesehen sind, erhalten diese die oberste Priorität. Spannungen würden im Falle einer Überschreitung des oberen Spannungsbandes durch eine Abschaltung der verursachenden Erzeugungsanlagen automatisch reduziert werden.

### **3.2.5 Rückfallebene bei Ausfall der Kommunikation**

#### **3.2.5.1 Implementierte Rückfallebene**

Um die verschiedenen Regelziele zu erfüllen, muss der FLOW-R die zugehörigen Stufenpositionen auf der Grundlage von Strom- und Spannungswerten von verschiedenen Messpunkten (MP) berechnen. Im Falle einer Kommunikationsunterbrechung empfängt der FLOW-R diese Messdaten jedoch nicht und die Regelung kann nicht weiter ausgeführt werden. Die Implementierung einer Rückfallebene ist somit erforderlich. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Rückfallebenen-Konzepte betrachtet. Dabei wird zwischen einer konventionellen Implementierung und einem auf neuronalen Netzen basierendem Ansatz unterschieden.

Im Rahmen des konventionellen Ansatzes arbeitet der FLOW-R im Falle einer Kommunikationsunterbrechung zu einem der Messpunkte zunächst für wenige Minuten wie gewohnt weiter, um kurzzeitige Verbindungsprobleme zu überbrücken, bevor er erst bei länger andauerndem Ausfall der Kommunikation in einen inaktiven, kurzgeschlossenen Zustand wechselt. Sämtliche Regelvorgänge werden somit bis zur Wiederherstellung der Datenverbindung unterbrochen. Aufgrund des trägen Zeitverhaltens bis zur Überschreitung der thermischen Grenzen eines Betriebsmittels oder dem Auslösen eines Schutzorgans, ergeben sich Zeiträume von mehreren Minuten bis zu wenigen Stunden. Mögliche, kurzzeitige Unterbrechungen der Kommunikationsverbindungen sind daher tolerierbar.

#### **3.2.5.2 Rückfallebene basierend auf Neuronalen Netzen**

Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde ein zusätzlicher Ansatz für ein innovatives Rückfallebenen-Konzept unter Verwendung eines künstlich neuronalen Netzes (KNN) verfolgt.

Ein KNN ist ein mathematisches Modell, das angelehnt an menschliche oder natürliche neuronale Netze ein lernendes Verhalten aufweist [13]. Anders als bei der vordefinierten Festlegung von Funktionen kann ein KNN die Beziehungen zwischen Daten lernen.

Das angewandte Verfahren der KNN-basierten Fallback-Lösung folgt einem dreistufigen Prozess. Im ersten Schritt werden Daten für alle Messungen und die Stufenpositionen des FLOW-R während des normalen Betriebs gesammelt. Im zweiten Schritt wird das KNN mit den gesammelten Daten trainiert. Zum Trainieren wird die sogenannte Backpropagation Methode verwendet. Diese zeichnet sich durch geringen Rechenaufwand aus. Im dritten Schritt werden die aus dem Training gewonnenen Gewichte des KNN getestet. Abbildung 3.15 zeigt die verwendete dreischichtige Struktur des KNN.

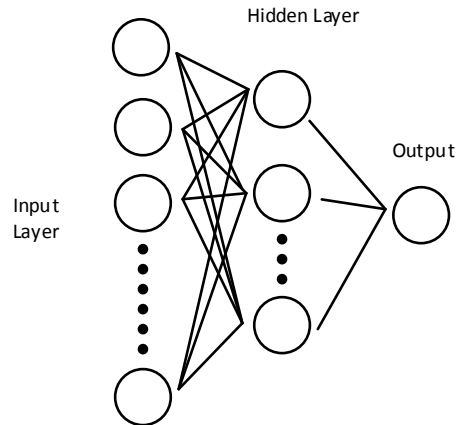


Abbildung 3.15: Struktur des KNN

Zum Testen werden Offline- und Online-Trainings verwendet. Für das Offline-Training wird das KNN offline trainiert und angewendet. Das Resultat sind Schätzwerte für die Stufenstellungen und die fehlenden Messungen. Beim Online-Training sendet das KNN die geschätzten fehlenden Messwerte an den FLOW-R, der mit der Kennlinienmethode gesteuert wird.

Im folgenden Beispiel ist das Regelziel eine Sollwertregelung von  $I_{\text{soll}} = 40$  A am Messpunkt 1. Das KNN wurde während des normalen Betriebs für drei Wochen trainiert, wobei die Ströme an anderen MPs als Eingang und die zugehörigen Stufenstellungen als Ausgang verwendet wurden. Abbildung 3.16 zeigt die Schätzung der Stufenstellung unter Verwendung des KNN im Vergleich zur tatsächlichen Stufenstellung. Der obere Teil zeigt die geschätzte Stufenstellung sowie die tatsächliche Stufenstellung. Im unteren Teil ist die Verteilung des Schätzfehlers abgebildet. Die geringen Unterschiede zwischen der geschätzten und der echten Stufenstellung zeigen die gute Performance des KNN.

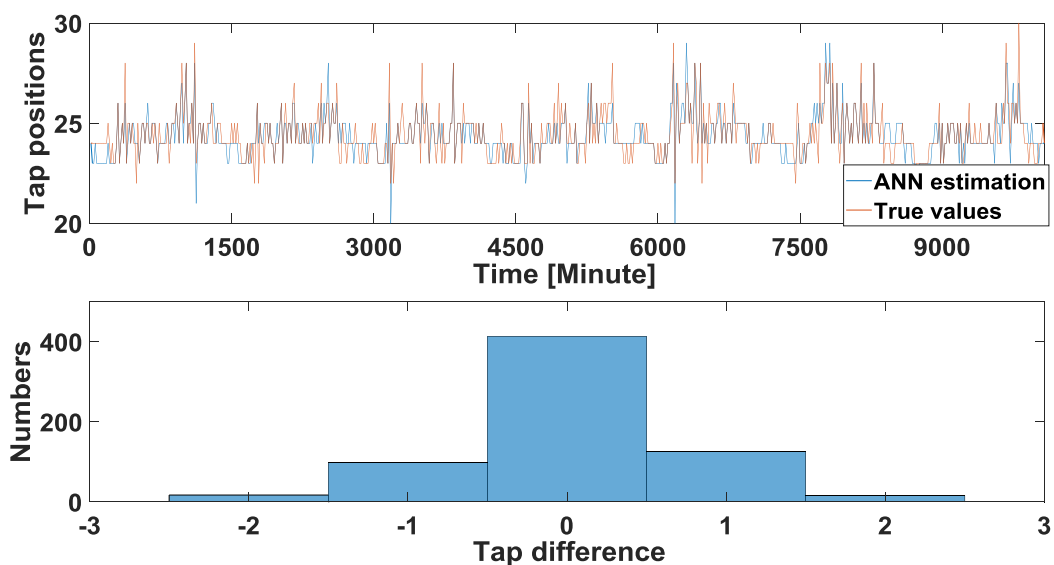


Abbildung 3.16: Schätzung der Stufenstellung durch das KNN

Abbildung 3.16 stellt die Online-Ergebnisse der Spannungsbegrenzungsregelung dar. Das KNN wurde mit 7-Tage-Werten trainiert und mit anderen 7-Tage-Werten getestet. Das KNN kann den Messwert

hinreichend genau schätzen sodass der FLOW-R die Spannung auf 105 %  $U_n$  begrenzen kann. Der Fehler der geschätzten Spannung liegt im Bereich von +/- 2 Volt.

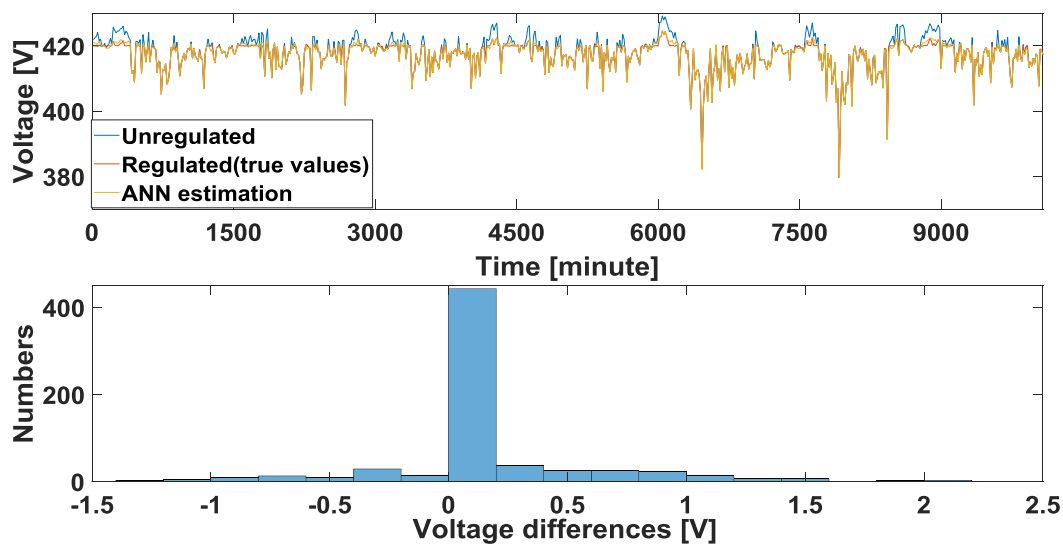


Abbildung 3.17: Test des KNN für die Spannungsbegrenzungsregelung

Auf der Grundlage der obigen Simulationen und Diskussionen konnte gezeigt werden, dass der FLOW-R unter Verwendung der KNN-basierten Fallback-Lösung auch dann noch ordnungsgemäß arbeitet, wenn ein (oder mehrere) MPs verloren gehen. Die vorgeschlagene Fallback-Lösung kann nicht nur für den FLOW-R, sondern auch für andere Anwendungen verwendet werden, da sie fehlende Messwerte schätzt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Verwendung des KNN eine vernünftige Lösung für Kommunikationsunterbrechungen darstellt.

### 3.2.6 Strategien zur optimalen Platzierung der Regler im Netz

Der FLOW-R kann an verschiedensten Stellen innerhalb einer Netztopologie platziert werden. Abbildung 3.18 stellt die vier grundlegenden Platzierungsvarianten schematisch dar. Eine Platzierung zur reinen Strombetragsregelung kann nach den schematischen Darstellungen a) bis c) vorgenommen werden. Eine Platzierung zur Spannungsregelung wird anhand d) erläutert. Alle Varianten müssen mittels Lastflussanalysen für ein gegebenes, reales Netz bewertet werden.

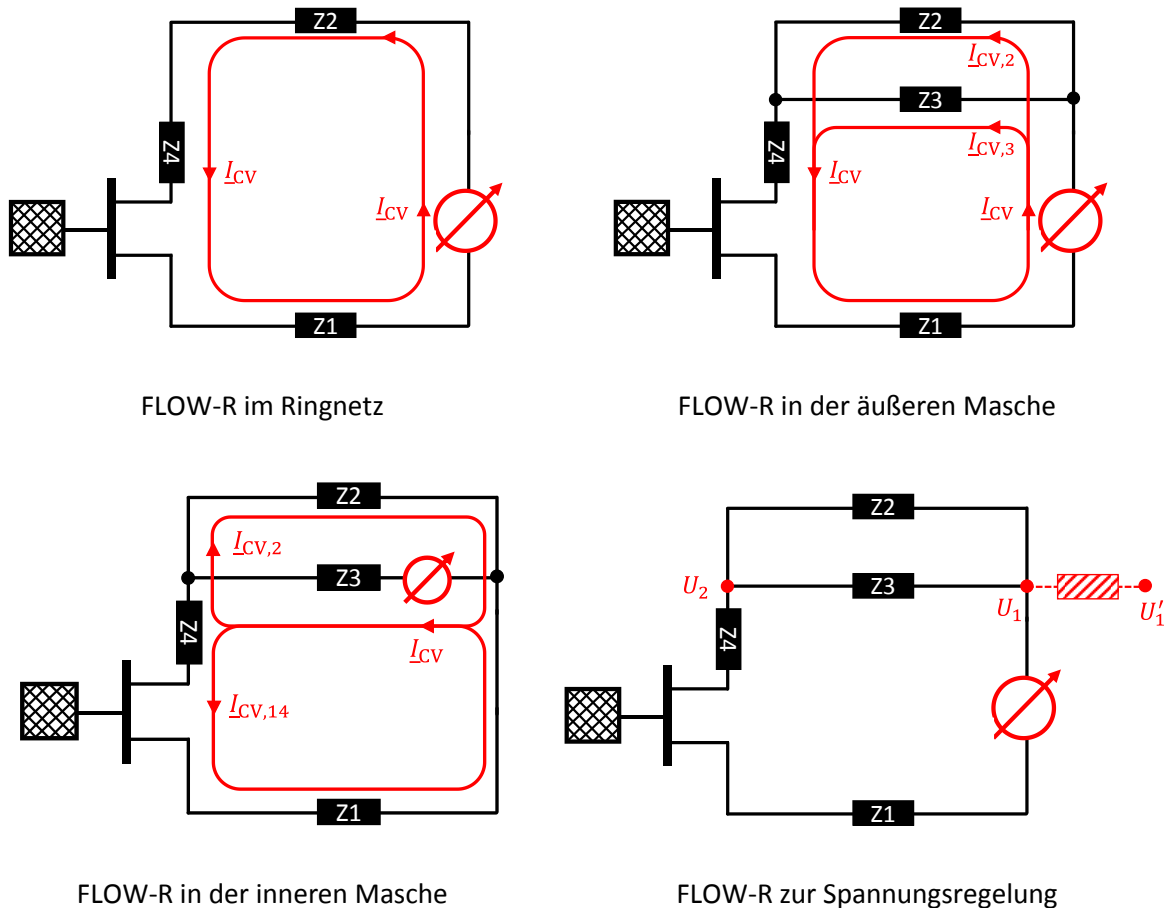


Abbildung 3.18: Platzierungsvarianten

#### a) Regler in einfacher Ringstruktur

Innerhalb einer einfachen Ringstruktur kann der Regler aufgrund des in Abschnitt 3.2.1 erläuterten Superpositionsprinzips an einer beliebigen Position innerhalb des Ringes eingesetzt werden.

#### b) Regler in äußerer Masche

In mehrfach vermaschten Strukturen teilt sich der Steuerstrom entsprechend der Impedanzen der Netzabschnitte auf. Somit ist die Platzierung stark von der Position des zu regelnden Stromes abhängig. Befindet sich dieser im Netzabschnitt Z2 oder Z3, teilt sich der Steuerstrom aufgrund des Verhältnisses der Impedanzen auf.

#### c) Regler in innerer Masche

Befindet sich der Regler in einer inneren Masche, muss auch hier die Aufteilung des Steuerstromes beachtet werden. Hätte dieser den vollen Einfluss auf den Streckenabschnitt Z3, teilt er sich auf zwei weitere Ströme  $I_{CV,2}$  und  $I_{CV,14}$  für die Abschnitte Z2 und Z1 + Z4 auf.



#### **d) Spannungsregelung**

Da der Regler für den Einsatz als reiner Spannungsregler keine Alternative zu einem rONT oder Strangregler darstellt, wird diese Option nur als Ergänzung zur priorisierten Strombetragsregelung betrachtet. Aufgrund des größtmöglichen Einflusses auf eine Knotenspannung an einem direkt benachbarten Netzknoten, sollte dies bei einer Platzierung entsprechend berücksichtigt werden. Im Falle einer Spannungsregelung empfiehlt sich somit eine topologisch möglichst nahe Platzierung des Reglers an dem zu regelnden Knoten.

Zusammenfassend aus den Fällen a) bis d) kann festgehalten werden, dass der Einsatz des Reglers in einem beliebigen Abschnitt einer vermaschten Topologie möglich, aber nicht immer optimal ist. Grundsätzlich gilt, dass sich eine bestmögliche Platzierung ergibt, wenn der Regler in den überlasteten Netzabschnitt integriert ist.

### **3.2.7 Definition der notwendigen Parameter zur Betriebsführung**

Die wesentlichen Parameter zur Betriebsführung eines FLOW-R ergeben sich aus den Eigenschaften des vermaschten NS-Netzes. Anhand des Bemessungsstromes am geplanten Standort ergibt sich die Bemessungsleistung. Durch die sich aus FLOW-R-Sicht ergebende Impedanz sowie die maximal notwendigen Strom-Beeinflussung im Netz erhält man die durch den FLOW-R zu verursachenden jeweils positiv und negativ notwendigen Spannungseinprägungen. Je nach Wunsch der Genauigkeit der Regelung lässt sich abschließend noch die Stufengröße und -anzahl festlegen.

### **3.2.8 Einbindung in übergeordnete Leitsysteme**

Das Regelkonzept beruht auf einer autark agierenden Regelung, die keines Eingriffs durch das Betriebspersonal bedarf. Da sich die Einflüsse des Reglers ausschließlich auf das Niederspannungsnetz auswirken, in welches er integriert ist, sind weder sein Zustand noch die erfassten Messdaten für den Leitstellenbetrieb von besonderer Bedeutung.

Im Rahmen des Projektes war jedoch aufgrund der BPL-Infrastruktur eine durch einen VPN-Tunnel gesicherte Anbindung an das öffentliche Netz geben, wodurch neben Messdaten, auch Parametrierungen vorgenommen oder Störmeldungen ausgelesen werden konnten.

Im Rahmen des Feldtests wurde durch die TUK mittels eines Mikro-Rechners, integriert in den FLOW-R-Schaltschrank, die Möglichkeit zur Übermittlung von Warn- und Störmeldungen per E-Mail an die Projektpartner geschaffen. In diesem Zusammenhang wäre ebenso eine Übermittlung von Nachrichten per SMS an das Betriebspersonal eine mögliche Variante zur Meldung von Störungen.

Grundsätzlich lässt die zur Steuerung eingesetzte SPS eine Vielzahl an möglichen Technologien zur Datenübertragung, sogar bis in Leitstellensysteme, zu.

### 3.3 Sicherheitskonzept Netzsteuerung

#### 3.3.1 Analyse der Anforderungen und Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Projektes wurde auf Basis der Sicherheitsvorgaben, die für den Rollout der intelligenten Messsysteme durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) festgelegt wurden, eine Sicherheitsarchitektur entwickelt, die eine sichere Kommunikation in einem lokal-autarken Regelsystem ermöglicht.

Durch die Evaluierung der rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen wurden die relevanten Gesetze, Verordnungen und Normen definiert, die den Rahmen für das zu entwickelnde Sicherheitskonzept bilden. Hierbei wurden insbesondere die teilweise unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen an intelligente Messsysteme für Letztverbraucher nach §3 Nr. 25 EnWG sowie an Energieversorgungsnetze nach §3 Nr. 16 EnWG differenziert betrachtet. Die Sicherheitsanforderungen für intelligente Messsysteme für Letztverbraucher wurden vom BSI in Form zweier Schutzprofile (BSI-CC-PP-0073 für die Kommunikationseinheit [14] und BSI-CC-PP-0077 für das Sicherheitsmodul [15]) und einer Technischen Richtlinie (TR-03109) festgelegt [16]. Im §11 Abs. 1a EnWG wird gefordert, dass Telekommunikations- und elektronischen Datenverarbeitungssysteme geschützt werden müssen, die für einen sicheren Netzbetrieb notwendig sind. Die detaillierten Sicherheitsanforderungen wurden gemäß EnWG von der Bundesnetzagentur (BNetzA) im IT-Sicherheitskatalog [17] definiert. Im IT-Sicherheitskatalog sind zwei zentrale Anforderungen an den Netzbetreiber formuliert:

- Implementierung eines Informationssicherheits-Managementsystem (ISMS) entsprechend den Anforderungen der DIN ISO/IEC 27001 [18]
- Auswahl geeigneter, angemessener und dem allgemein anerkannten Stand der Technik entsprechender Maßnahmen zur Realisierung der Schutzziele: Verfügbarkeit, Integrität und Vertraulichkeit.

Ausgehend von den Anforderungen des IT-Sicherheitskatalogs wurden die Schutzanforderungen des geplanten Regelsystems identifiziert und analysiert. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Sicherheitsanforderungen orientierte sich an der IT-Grundschutz-Vorgehensweise nach dem BSI-Standard 100-2 [19]. Anschließend wurde nach dem Vorgehensmodell zur Entwicklung einer IT-Architektur im Smart Grid nach [20] eine Bedrohungs- und Risikoanalyse durchgeführt, um den Schutzbedarf der Regelsysteme festzustellen.

Anhand einer Auswahl abstrakter Gefährdungen aus dem BSI-Gefährdungskatalog wurden Bedrohungen formuliert. Sie haben eine Verletzung der Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit zur Folge, wodurch der sichere Regelbetrieb gefährdet würde.

Die Schutzbedarfsfeststellung wurde mit einer Risikoanalyse abgeschlossen. Dabei wurde das Risiko einer Schutzzielverletzung durch Bedrohungen anhand der Einordnung in Schutzbedarfskategorien abgeschätzt und begründet. Hierbei wurde ein hoher Schutzbedarf des Regelsystems festgestellt.

Anschließend wurden Anforderungen zur Gewährleistung des Schutzbedarfs formuliert. Dazu wurde auf Richtlinien der Norm ISO/IEC 27002 [21] bzw. ISO/IEC TR 27019 [22] zurückgegriffen, die die informationssichere Kommunikation von IT-Systemen adressieren.

Da die vom BSI definierte Sicherheitsarchitektur für Smart Metering- und Smart Grid-Applikationen als Basis für das FLOW-R-Sicherheitskonzept dienen sollte, wurden im Rahmen des Arbeitspaketes nur von der BSI-Sicherheitsarchitektur abweichende Sicherheitsanforderungen betrachtet. Hierbei waren vor allem die lokale Kommunikation zwischen den Mess- und Regelpunkten relevant.

Im nächsten Schritt wurden die technischen Anforderungen an das Regelsystem definiert. Hierbei wurde basierend auf der BSI-Sicherheitsarchitektur hauptsächlich die Anforderungen an die Schnittstellen und die Hardware des FLOW-R betrachtet, um diese in der Entwicklung berücksichtigen zu können.

Nachdem die Anforderungen aus den unterschiedlichen Sachebenen definiert und zusammengetragen waren, wurde auf Basis dieser Anforderungen eine Sicherheitsarchitektur entwickelt. Im ersten Schritt wurde untersucht, ob die als Basis ausgewählte BSI-Sicherheitsarchitektur für intelligente Messsysteme grundsätzlich Anwendung finden kann.

Dazu wurden die Sicherheitsziele des SMGW-Schutzprofils BSI-CC-PP-0073 den im Arbeitspaket 3.2 ermittelten Sicherheitsanforderungen an die lokal-autarke Regelung zugeordnet. Anschließend wurde die Sicherheitsfunktionalität des SMGW-Schutzprofils beschrieben und um Ergänzungen erweitert, um sie an die Bedürfnisse der lokal-autarken Regelung anzupassen. Darauf aufbauend wurden die Anwendungen im Regelnetz durch die Funktionalität der BSI-TR-03109-1 abgebildet.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Sicherheitsarchitektur des SMGW auf die Kommunikationseinheiten des lokal-autarken Netzes übertragen lässt. Es sind jedoch Ergänzungen erforderlich, um die Datenübertragung zwischen Regel- und Messtechnik zu realisieren. Die Sicherheitsmaßnahmen der Technischen Richtlinie BSI-TR-03109-1 zur Umsetzung der Sicherheitsfunktionalität sind teilweise geeignet, um die Kommunikation zwischen den Netzkomponenten zu ermöglichen. Um das gleiche hohe Sicherheits-Level wie bei der Zählerstandsabfrage durch einen externen Marktteilnehmer zu erreichen, ist der Aufbau von TLS-Kanälen zwischen den Regel- und Messsystemen erforderlich. Dieser direkte Aufbau von TLS-Kanälen wäre grundsätzlich denkbar, erfordert aber Erweiterungen der Technischen Richtlinie. Die Funktionalität der Sicherheitsmaßnahmen der Technischen Richtlinie BSI-TR-

03109-1 muss weiterentwickelt werden, damit Proxy-Kommunikationsprofile die Initiierung eines vertrauenswürdigen Kanals durch einen Wake-Up-Call eines Regelsystems an ein Messsystem unterstützen.

Die Letztverbraucher-Rolle der SMGW-Sicherheitsarchitektur wird für die lokal-autarke Regelung nicht benötigt. Insofern wäre eine Deaktivierung der Schnittstelle IF\_GW\_CON eine weitere Möglichkeit, um Angreifern den Zugriff auf das Regelsystem zu erschweren und damit die Sicherheit des Regelsystems zu erhöhen.

Die im AP 3.5 geplante Integration des BSI-konformen Smart-Meter-Gateways in das im Feldtest eingesetzte System entsprechend der in Arbeitspaket 3.4 erstellten Sicherheitsarchitektur war auf Grund der Nichtverfügbarkeit entsprechender Messgeräte und Regeleinheiten sowie noch offener Definitionen an der CLS-Schnittstelle des Gateways im Rahmen des Projektes nicht möglich.

### **3.3.2 Betrachtung der technischen Anforderungen (Schnittstellen, Regelalgorithmen, ...)**

Das Regelkonzept für den Einsatz eines FLOW-R ist auf eine autarke Arbeitsweise ausgelegt. Als Steuerung wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) verwendet, die die eingesetzten Messgeräte als dezentrale Peripherie betrachtet und dementsprechend nutzen kann. Die Regelalgorithmen laufen CPU-intern in der SPS ab. Da die Messgeräte alle Messdaten über Modbus/TCP zur Verfügung stellen und auch die SPS dieses Protokoll unterstützt, wird diese Schnittstelle zur Kommunikation verwendet. Die physikalische Verbindung über Broadband Powerline (BPL) im NS-Netz ist für diese Kommunikation nicht sichtbar; SPS und Messgeräte sehen eine direkte Ethernet-Verbindung. Die gewählte Schnittstelle dient zur Kommunikation zwischen SPS und den abgesetzten Messpunkten zur zyklischen Aufnahme von deren Messwerten. Da ein vermaschtes NS-Netz in dieser regelungstechnischen Hinsicht ein verteiltes System ist, sind Schnittstelle und Kommunikation obligatorisch. Ohne diese wäre unmittelbar lediglich eine Regelung der im FLOW-R gemessenen Größen möglich.

### **3.3.3 Aufbau und Implementierung der Sicherheitsarchitektur**

Die Sicherheitsarchitektur mit Anbindung eines Sicherheitsgateways an die Kommunikationsschnittstelle betrifft die von einem FLOW-R genutzte Kommunikation nicht, da die BPL-Modems in FLOW-R und an den Messpunkten in Kabelverteilerschränken sitzen. Somit befindet sich die Ethernet-gebundene Verbindung innerhalb eines verschlossenen Systems.

### 3.4 Simulation

#### 3.4.1 Synthetisches Netz

Zur Verifikation des Kennlinienverfahrens und der Regelziele wurden grundlegende Simulationen in synthetischen Netzen (Abbildung 3.19) durchgeführt. Die Parameter des hierbei verwendeten Niederspannungsnetzes aus Abbildung 3.5 basierte auf Untersuchungen aus [23]. Die Versorgung erfolgte über eine Ortsnetzstation (ONS) mit  $U_n=400$  V. Jedem Hausanschluss wurden sowohl eine Last als auch eine PV-Anlage zugeordnet, die in Abhängigkeit des gewählten Lastprofils mit unterschiedlichen Leistungen parametrisiert waren.

Zur Simulation wurden synthetische Lastzeitreihen für Haushalte und Elektrofahrzeuge verwendet.

Die Messwerte wurden an den dargestellten Messpunkten MP 1, MP 2, MP UP und am FLOW-R gewonnen.

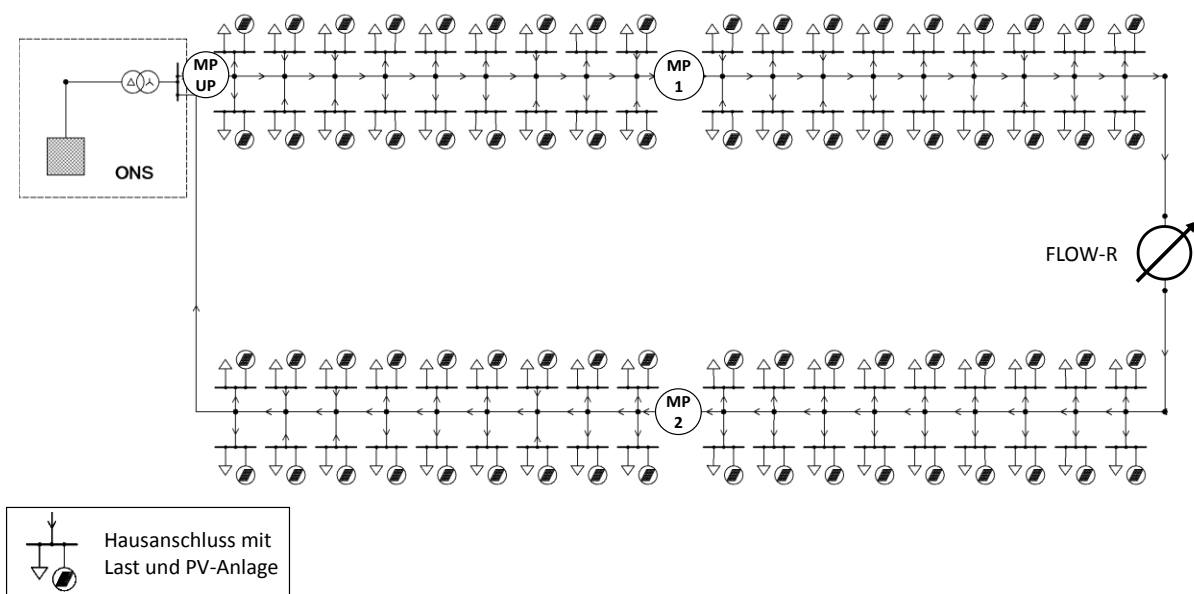


Abbildung 3.19: Synthetisches Testnetz

#### 3.4.2 Verifikation der Kennlinien-Charakteristik

#### 3.4.3 Verifikation der Kennlinien-Erzeugung

Die in Abschnitt 3.2.4.2 dargestellte Methode zur Erzeugung von Kennlinien wurde im Rahmen von Simulationsuntersuchungen nachgewiesen. Dazu wurden bei konstanter Belastung alle diskreten Stuerspannungsstufen simuliert und die Ströme an den Messpunkten (MP x sim.) aufgezeichnet (Abbildung 3.20). In einem weiteren Simulationsschritt erfolgte die Generierung der Kennlinien anhand der in Abschnitt 3.2.4.2 beschriebenen Methode. Die sich daraus ergebenden Kennlinien wurden für die gleichen Messpunkte (MP x kalk.) generiert.

Aus Abbildung 3.20 wird deutlich, dass die simulierten und kalkultierten Werte für die dargestellten Strom-Kennlinien, abgesehen von kleinsten Abweichungen, für alle Messpunkte in einer Ebene liegen. Eine Erzeugung von Kennlinien mit Hilfe des dargestellten Verfahrens erwies sich somit als möglich.

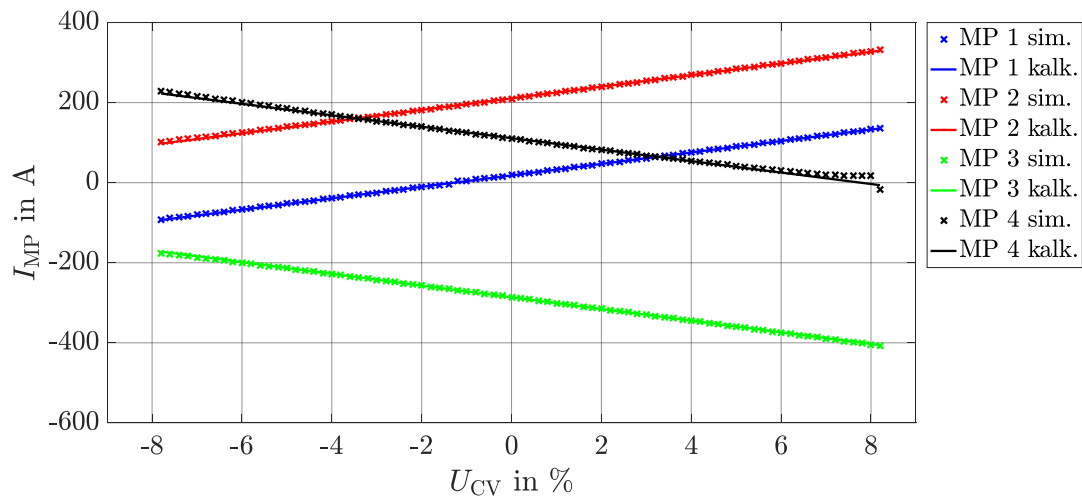


Abbildung 3.20: Kalkulierte und simulierte Kennlinien für Ströme

Abbildung 3.21 zeigt, dass dieser Ansatz ebenso für Spannungs-Kennlinien gilt. Diese weisen jedoch wesentlich geringere Steigungen auf, wodurch, wie z.B. in MP 3, lediglich eine geringe Beeinflussung der Knotenspannungen erreicht werden kann.

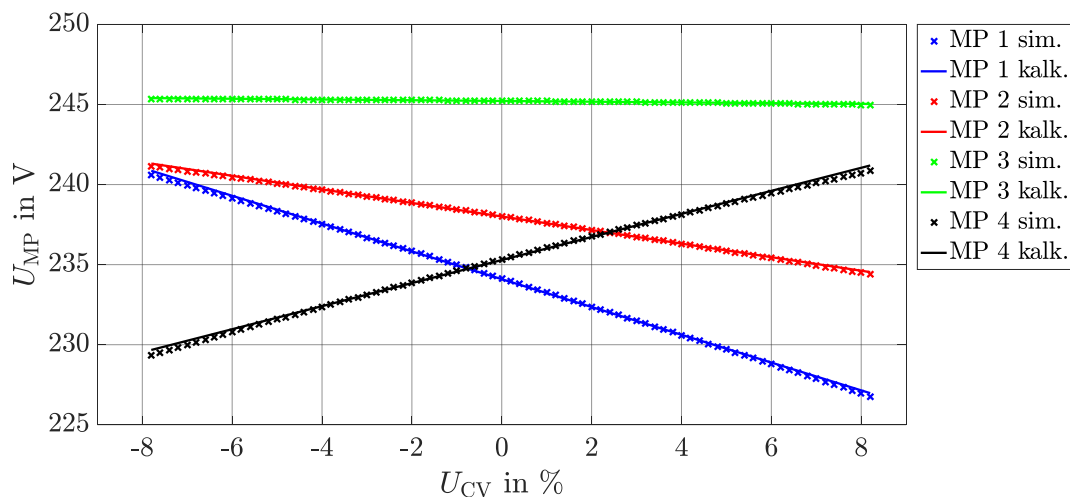


Abbildung 3.21: Kalkulierte und simulierte Kennlinien für Spannungen

### 3.4.4 Reales Netz

Die Darstellung exemplarischer Simulationsergebnisse für eine Sollwert- und Grenzwertregelung erfolgte mit Hilfe des realen Netzmodells in Abbildung 3.22. Dieses entspricht dem realen Testnetz aus Abschnitt 3.1.

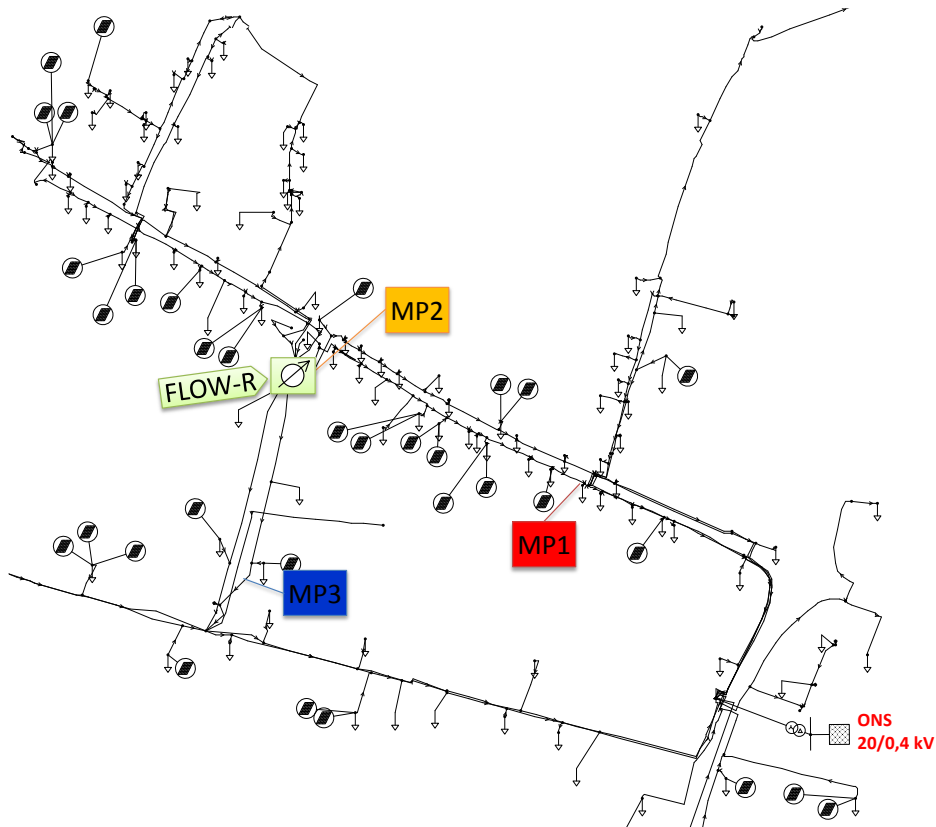


Abbildung 3.22: Reales NS-Testnetz mit relevanten Messpunkten

Der sowohl im realen Testnetz als auch dem Simulationsnetzmodell verwendete Kabeltyp ist NAYY4x95. Weiterhin verfügt es über drei Messpunkte MP 1 bis MP 3 und Messdaten des FLOW-R. Mittels synthetischer Lastzeitreihen wurden Lastflüsse erzeugt, die zur Verifikation der Regelziele dienen.

### 3.4.5 Verifikation von Soll- und Grenzwertregelung

In Abbildung 3.23 werden exemplarische Simulationsdaten für eine Soll- und Grenzwertregelung an den in Abbildung 3.22 aufgezeigten Messpunkten dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung sind die unregulierten Ströme dargestellt.

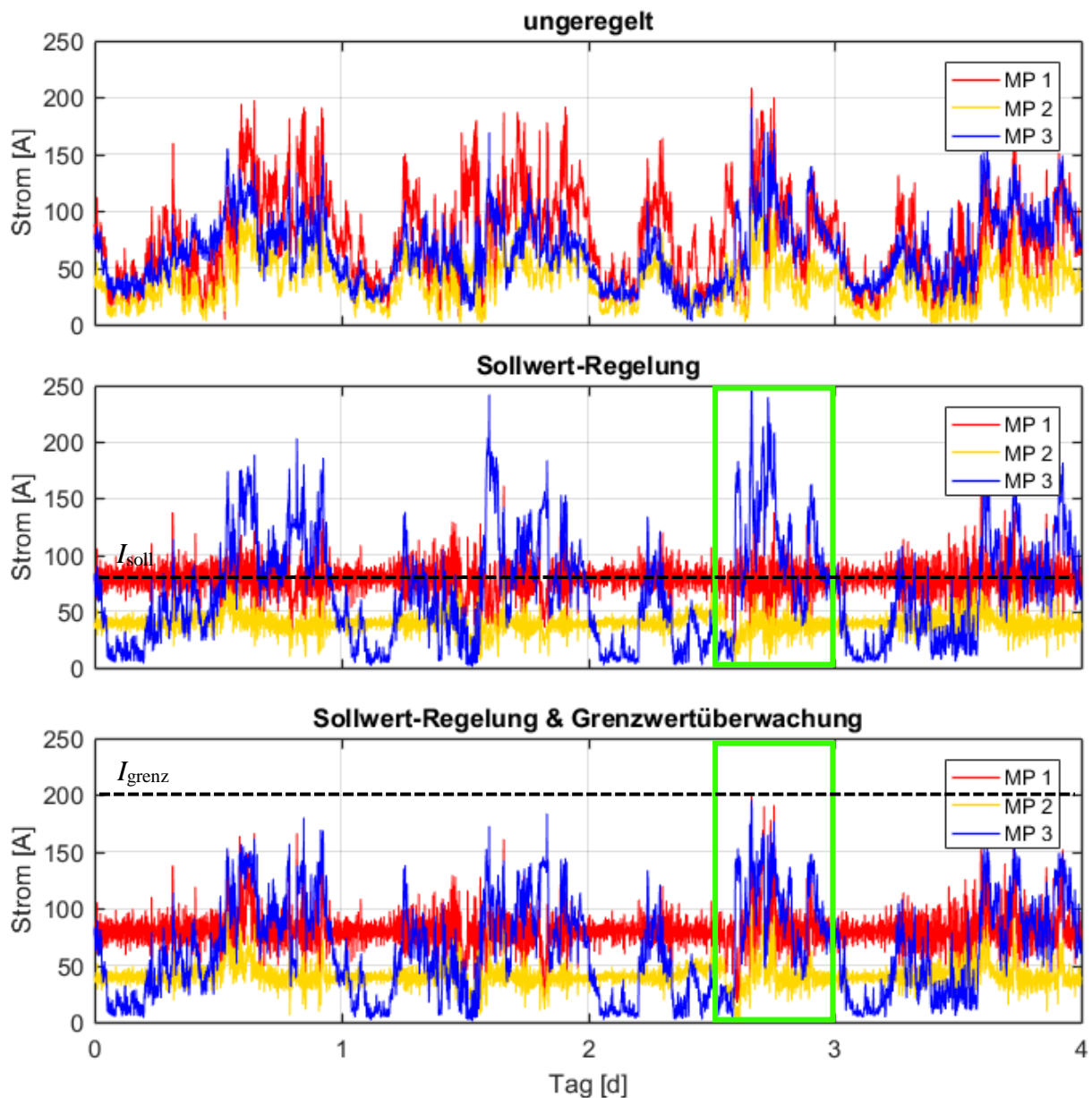


Abbildung 3.23: Exemplarische Soll- und Grenzwertregelung Strom

Bei einer Sollwertregelung in MP 1 auf  $I_{soll} = 80$  A, dargestellt in der mittleren Abbildung, ist eine entsprechende Ausprägung des Stromes in MP 1 zu erkennen. Aufgrund der hohen Volatilität der Haushaltslasten, verbunden mit der Trägheit des Reglers, bildet sich ein um den Sollwert ausgeprägtes Band.

Die Einhaltung des Sollwertes führt aufgrund der Leistungsverchiebung zu einer Anhebung der Ströme in MP 2. Diese erreichen in der mittleren Abbildung bis zu 250 A. Der thermische Grenzstrom  $I_{th} = 215$  A des verwendeten Kabeltyps wäre somit überschritten.

Durch eine Sollwertregelung mit kombinierter Grenzwertüberwachung kann der Strom in MP 2 auf  $I_{grenz} = 200$  A begrenzt werden. Die Ergebnisse hierzu sind im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Die



Begrenzung führt jedoch aufgrund der Priorisierung der Grenzwertregelung zu einer Abweichung vom Sollwert in MP 1.

Die dargestellten Regelkonzepte konnten im Rahmen der Simulationsstudien ebenso für Spannungswerte verifiziert werden.

Die Grenzen des Regelkonzeptes werden durch den Einfluss des FLOW-R auf einen Messpunkt bestimmt. Ist dieser nur gering, resultiert dies in einer flachen Geradensteigung, welche auf einen geringen Einfluss der Steuerspannung auf die Strom- oder Spannungswerte im Messpunkt hinweist.

### 3.4.6 Bestimmung der Platzierung und Parametrierung der Regler im Testnetz

Die Platzierung des FLOW-R im Testnetz entsprach der Platzierung im Simulationsnetz. Diese wurde aufgrund der topologischen als auch der baulichen Gegebenheiten festgelegt. Die Parametrierung der Steuerspannungsstufen entsprach den im Rahmen der Konzeptionierung festgelegten diskreten Stufen für Steuerspannungsbetrag und –winkel (vgl. Abschnitt 3.2.3.1).

Die Bemessungsleistung des FLOW-R wurde aufgrund der maximal zu erwartenden Ströme auf  $S_r=150$  kVA festgelegt.

## 3.5 Design

### 3.5.1 Systemkonzept

Ausgehend von der Konstruktionsweise klassischer Netzregler wurde basierend auf den Erkenntnissen aus Arbeitspaket 4 ein reales Konzept zunächst für den hardwaretechnischen Aufbau des FLOW-R erstellt. In Zusammenarbeit mit der TUK ist dieses bestehende Hardware-Konzept erweitert worden. Ein zusätzlicher Drehstrom-Transformator wurde als Phasenschieber zur Wahl der erforderlichen Winkelstufen integriert. Pro Phase sind vier einphasige Transformatoren festgelegt worden, die jeweils drei verschiedene Zustände, kurzgeschlossen, abwärts- oder aufwärtsregelnd, besitzen können. Sie sind hinsichtlich der Sekundärspannung vom kleinsten bis zum größten jeweils um das Dreifache größer und lassen sich je Phase beliebig zusammen und/oder gegeneinander schalten. Hiermit ergibt sich nach Gleichung (13) die Möglichkeit 81 Spannungsstufen von -40 bis +40 zu schalten und damit die Steuerspannung zwischen  $-8\% U_n$  bis  $+8\% U_n$  in 0,2 %-Schritten zu realisieren.

$$\text{Stufenanzahl} = 3^{\text{Trafo-Anzahl}} 3^{\text{Trafo-Anzahl}} = 3^4 = 81 \quad (13)$$

Zur Kommunikation mit der internen SPS-Steuereinheit wurde der Einbau eines BPL-Modems vorgesehen, um die Messwerte der abgesetzten Messpunkte zu erhalten.

### 3.5.2 Konzeption einer Lösung zum lokal-autarken Regelsignalaustausch

Im Rahmen des Arbeitspakets 5.4 wurde ein Konzept zum Regelsignalaustausch entwickelt, das eine direkte Kommunikation der am Regelkonzept beteiligten Systeme ermöglicht. Zentrale Anforderung war, dass das Kommunikationssystem zwischen FLOW-R und Messgeräten im Netz die direkte Kommunikation zur Abstimmung der Regelung ermöglichen sollte, ohne dass dabei zentrale Kommunikationskomponenten in die Datenübertragung eingebunden werden müssen.

Zu Beginn wurden allgemeine Anforderungen an Routingverfahren abgeleitet, um diese Kommunikation in einem realen NS-Netz umzusetzen. Danach wurden verschiedene vorhandene Routing-Algorithmen analysiert. Bei der Analyse konnte ein geeigneter Routing-Algorithmus gefunden werden. Auf Basis dieses Algorithmus wurde dann ein Konzept zur Implementierung entwickelt.

Bei der Schnittstelle zur internen Kommunikation zwischen SPS und BPL-Modem mittels Modbus/TCP im Regler konnte auf eine Ethernet-Verbindung zwischen beiden Komponenten zurückgegriffen werden.

### 3.5.3 Prototypen-Auslegung, Projektierung

Der Prototyp ist basierend auf dem ausgewählten Feldtest-Netz und seinem dort geplanten Standort mit ausreichend Toleranz für eine Bemessungsleistung von 150kVA dimensioniert worden. Aufgrund der bekannten Netz-Topologie und der daraus folgenden Impedanz aus Sicht des Reglers sowie den Ergebnissen der Simulation der TUK, haben sich die minimale Stufengröße von 0,2% der Nennspannung und infolgedessen die Auslegung der Sekundärspannungen der vier Transformatoren zu 0,2%, 0,6%, 1,8% und 5,4% der Nennspannung ergeben, was eine maximal mögliche Spannung über dem Regler von 8,0% entspricht. Die absoluten Sekundärspannungen betragen somit bei Nennspannung von 230V im Strang 0,46 V, 1,38 V, 4,14 V und 12,42 V, in Summe 18,4 V.

Da die Pilotanlage für eine Bemessungsleistung von 150kVA ausgelegt worden ist, erhält man einen Bemessungsstrom von 217 A, welcher durch die Sekundärspulen der jeweiligen vier Transformatoren fließen kann. Zuzüglich der Verlustleistung der Transformatoren von bis zu zehn Prozent und unter Verwendung von Standardbaugrößen ergeben sich die Transformator-Bemessungsleistungen von 130VA, 400VA, 1000VA und 3000VA. Die daraus resultierenden primärseitigen Ströme betragen 0,51 A, 1,45 A, 4,27 A und 12,56 A. Da die vier Transformatoren primär parallelgeschaltet sind, addieren sich die einzelnen Ströme zu einem Gesamtstrom von 18,79 A. Dieser Strom muss je nach Phasenverschiebung der einzuprägenden Spannung über dem Regler von dem Drehstrom-Transformator sekundärseitig getragen werden. Da auch dieser Transformator eine Verlustleistung besitzt und ebenfalls eine Standardbaugröße verwendet werden sollte, ist er für eine Leistung von 15.000 VA ausgelegt worden. Sein Primärstrom beträgt somit maximal 21,65 A.

Das Konzept des Aufbaus und der Schaltung bedingt die grundsätzlichen Regelalgorithmen hinsichtlich ihrer Schaltabfolge. Bevor eine Stufe geschaltet werden kann, muss zunächst der gewählte Phasenwinkel geschaltet werden, um primärseitig offen betriebene Transformatoren zu verhindern. Gleiches gilt für die Winkel-Umschaltung. Es müssen zunächst alle Stufen herausgenommen werden, bevor der Phasenwinkel geändert werden kann.

Für das Einprägen phasenverschobener Spannungen über dem Regler werden drei Phasenlagen durch die Strangspannungen sowie drei weitere über den Phasenschieber durch die verketteten Spannungen bereitgestellt. Die fehlenden Phasenwinkel ergeben sich durch Umkehr/Wenden der primärseitigen Ansteuerung der vier einphasigen Transformatoren, siehe Tabelle 3.6.

Tabelle 3.6: Angaben zu den einstellbaren Winkelstufen

Winkel/ -stufe	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wenden	x	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	✓

Somit erhält man zwölf Winkelstufen (0-11) in 30°-Schritten.

$$Wenden = \text{Runden} \left( \frac{\text{Rest} \left( \frac{\text{Winkelstufe} - Nr}{4} \right)}{4} \right) \quad (14)$$

Die Schaltung einer Stufe in einem Leiter mithilfe der vier Transformatoren ist eine Kombination der einzelnen, drei möglichen Schaltrichtungen aufwärts (+1), kurzgeschlossen ( $\pm 0$ ) oder abwärts (-1).

$$\text{Stufenzahl} = \sum_{\text{Trafo-Nr.}=1}^{\text{Trafo-Anzahl}} \text{Schaltrichtung}(\text{Trafo} - \text{Nr.}) \cdot 3^{\text{Trafo-Nr.}-1} \quad (15)$$

Für die grundsätzlichen Regelalgorithmen ist jedoch die inverse Betrachtung relevant. Im Falle einer Differenz zwischen Soll- und Istwert einer Regelgröße soll mittels FLOW-R selbige ausgeregelt werden. Hierfür ergibt sich eine zu stellende Stufenzahl. Anhand der Stufenzahl lässt sich für jeden einphasigen Transformator eine Schaltrichtung bestimmen (Ergebnis 2  $\triangleq$  Schaltrichtung (-1)).

$$Schaltrichtung(Trafo - Nr.) = Rest \left( \frac{\text{Runden} \left( \frac{Rest \left( \frac{Stufenzahl}{3^{Trafo-Nr.}} \right)}{3^{Trafo-Nr.-1}} \right)}{3} \right) \quad (16)$$

Entsprechend der Kategorisierung der Regelziele durch die TUK in einerseits Spannungs- und Stromregelung sowie andererseits der Betrachtung von Regelgrößen, beliebig dezentralen Messwerten und gleichmäßiger Belastung an den Ortsnetz-Abgängen der Transformatorstation ist die interne Einteilung in der Software erfolgt. Hierbei ist prinzipiell ein vermascht betriebenes NS-Netz auf ein Ringnetz vereinfacht worden. Diese Betrachtung ermöglichte es, die von der TUK hergeleiteten mathematischen Zusammenhänge allgemein darzustellen. Anhand dieser sind erste Regelalgorithmen softwaretechnisch skizziert worden.

Die wesentlichen Merkmale des Designs sind auch in der Abbildung des darauf basierenden Prototyps (Abbildung 3.24) deutlich zu erkennen und entsprechend beschriftet.

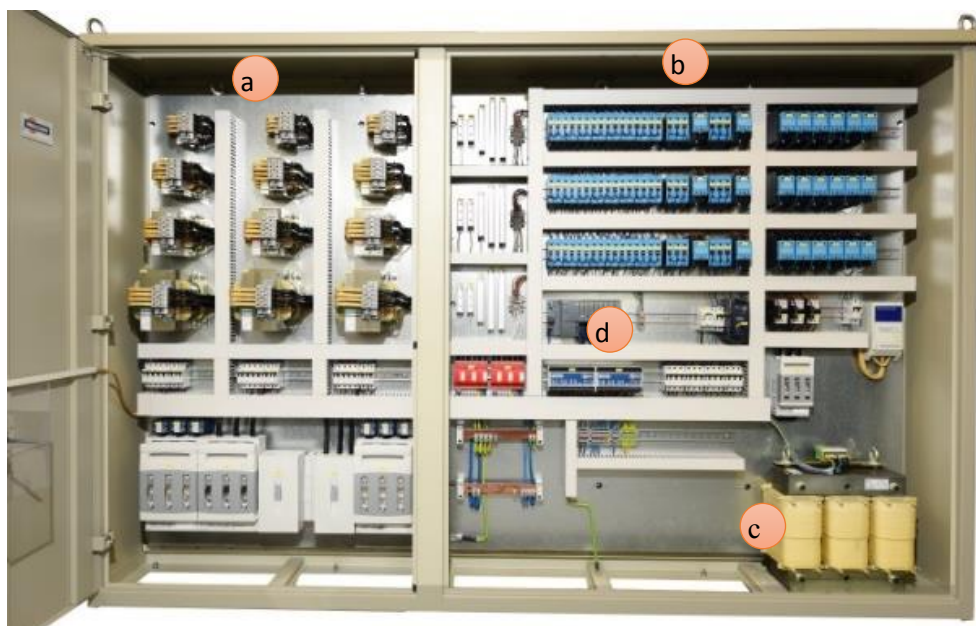


Abbildung 3.24: Prototyp eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers mit a) Stufentransformatoren, b) Relais-Matrix, c) Phasenschieber, d) Ansteuerinheit (Quelle: Walcher)

### 3.5.4 Umsetzung des Regelkonzepts

Das Regelkonzept wird in einer SPS des Herstellers Siemens implementiert. Aufgrund der hersteller-spezifischen Anforderungen ergibt sich eine grundlegende Programmierstruktur, die sich in Organisationsbausteine (OB), die vom System aufgerufen werden, in Funktionsbausteine (FB) und Funktionen (FC), die innerhalb der OB für die Bearbeitung der Algorithmen zuständig sind, sowie in Datenbausteine

(DB), die globale und lokale Daten enthalten, aufteilen lässt. FB besitzen zu Speicherzwecken im Unterschied zu FC statischer Variablen, sodass sie für jede Instanz einen zugehörigen DB benötigen. Aus diesem Grund sind FB für die elementaren Programmbestandteile und die FC für eine den FB übergeordnete Strukturierung verwendet.

Die Realisierung des gesamten SPS-Programms macht eine gemäß der oben beschriebenen Gliederung grundlegende Strukturierung notwendig. Neben der reinen Steuerung für das Regelkonzept beinhaltet die Software weitere FC. Diese beinhalten die Berechnung aller Variablen, die sich aus der Parametrierbarkeit ergeben, die Abfrage, Skalierung und weitere Verarbeitung der Messwerte im Regler und an den dezentralen Messpunkten, eine SPS-interne Begrenzung gewisser Variablen auf deren jeweils zulässigen Bereich, eine manuelle Möglichkeit zur De- und Reaktivierung des Reglers, eine Störungs- und Warnungsbearbeitung sowie das Protokollieren und Zählen relevanter Reglerdaten.

Für die Programmierung der gesamten Regelung haben sich Software-Fragmente des bisherigen Netzregler-Programms teilweise verwenden lassen. Dies betraf im Wesentlichen die steuerungstechnische Abfolge beim Ein- und Ausschalten der einphasigen Transformatoren. Elemente wie Grenzwertüberwachung, Störungsbearbeitung und statistische Betrachtung sind umprogrammiert und angepasst worden. Der Großteil des Regelkonzepts ist jedoch neu programmiert worden, da dies wegen der völlig abgewandelten Anwendung erforderlich war.

Beim herkömmlichen Netzregler wird lediglich die Ausgangsspannung gemessen und geregelt. Mittels FLOW-R wird das vermascht betriebene NS-Netz soweit messtechnisch erfasst, dass alle beeinflussbaren Größen im Regler abgebildet werden. Eine diesbezüglich relevante Größe spielt die sich für den Standort des Reglers ergebende Impedanz der vorliegenden Netz-Topologie. Diese Impedanz wird zunächst durch die Spannungs- und Strommessungen am Ein- und Ausgang des Reglers berechnet. Weiterhin dient die Messung dieser Größen zur Regelung der Spannung an den Regler-Anschlüssen und des Stroms durch den Regler. Dementsprechend ist diese Messwertaufnahme in der Software realisiert.

Eine umfassendere Messwernerfassung stellt die Abfrage der dezentralen Messpunkte dar. Mit an den in Abbildung 3.4 dargestellten Messpunkten installierten Messgeräten wird von der SPS mittels Modbus/TCP-Protokoll kommuniziert. Das SPS-Programm ist derart dynamisch ausgeführt, dass diese Anzahl an einer Stelle zentral parametrierbar wird und sich die weitere Programmbearbeitung entsprechend darauf aufbaut. Lediglich die Einstellungen der Messgeräte müssen noch mit der Software abgeglichen werden. Aufbauend auf der Parametrierung erfolgt die Modbus/TCP-Kommunikation. Hierfür ist ein Systemfunktionsbaustein aus dem TIA-Portal zu verwenden. Dieser ist in einem eigenen FB soweit optimiert worden, dass zyklisch alle Messpunkte ausgelesen werden.

Die Programmierung ist soweit aufeinander aufgebaut, dass nur die wesentlichen Größen festgelegt werden müssen. Alle weiteren abhängigen Variablen berechnen sich hieraus. Dies betrifft einerseits die zulässigen Grenzwerte verschiedener Parameter und andererseits die sich aus der Projektierung ergebenden Größen der Regler-Auslegung. Bezüglich der Grenzwerte ist eine Überwachung notwendig, um materiellen Schaden und ein Fehlverhalten des Reglers zu vermeiden sowie mögliche Störungen rechtzeitig zu detektieren.

Die Programmierung der erforderlichen neuen Software bezüglich der reinen Regelalgorithmen basiert auf den mathematisch hergeleiteten Zusammenhängen, die sich in einem Ringnetz, d.h. einem einfach vermascht betriebenen NS-Netz, auf das sich jedes beliebig vermaschte Netz vereinfachen lässt, ergeben. Elektrotechnisch wird prinzipiell das Superpositionsprinzip angewandt. Der vorhandene Ringstrom wird mit einem durch den Regler verursachten Regelstrom überlagert. Die allgegenwärtige Größe für die Regelung eines solchen Netzes ist die sich für den Regler ergebende, generell konstante Impedanz der Topologie. Ist bekannt, welcher Regelstrom notwendig ist, um die gewünschte Führungsgröße einzuregeln, wird entsprechend dem ohmschen Gesetz die passende Spannung eingepreßt. Diese Methode ist auch im Prototyp zunächst vorgesehen worden.

In Zusammenarbeit mit der TUK ist das oben beschriebene Prinzip abgewandelt worden. Die gleichbleibende Impedanz sorgt dafür, dass in der Regel auch eine konstante Phasenlage für die vom Regler zu stellende Spannung ausreicht, sodass eine Winkel-Umschaltung nur bei sich ändernden Netzeigenschaften erforderlich wird. Ausgehend von der Betrachtung eines einfachen Ringnetzes gelangt man durch das ohmsche Gesetz zu der Erkenntnis, dass zwischen einzuprägender Spannung und Regelstrom ein linearer Zusammenhang besteht. Ein solcher Zusammenhang besteht auch zu allen Strömen und Spannungen in einem beliebig vermaschten Netz, was aber eine deutlich aufwändigere Netzwerkanalyse voraussetzt. Mit dem Wissen linearer Zusammenhänge hat sich die Möglichkeit ergeben, die Regelung der Größen anhand von linearen Kennlinien (siehe auch Abschnitt 3.2.4) aufzubauen, welche sich zyklisch zur Einhaltung der Genauigkeit aktualisieren. Deren Erzeugung erfolgt wie auch die Berechnung der Impedanz aus Sicht des Reglers trivial durch das Stellen zweier verschiedener Stufen, anhand deren Werte sich die Kennlinien berechnen lassen. Für die Regelung betrachtet der Regler nach Sollwertvorgabe die zugehörige Kennlinie und stellt die zielführende Regelspannung. Der gesamte Ablauf der Regelung findet innerhalb einer Schrittkette statt.

### **3.5.5 Systemsicherheit (Ausfallsicherheit)**

Um Betriebssicherheit zu garantieren, ist neben den hardwaretechnischen Schutzmaßnahmen eine sichere Störungsbearbeitung durch die Software zu gewährleisten. Ist die SPS spannungslos und/oder die Steuerung inaktiv oder liegt eine Störung vor, sorgt die Realisierung der Schaltung durch entsprechende Hardware für eine sichere Rückfallebene. Durch die Software erfolgt bei aktiver SPS zunächst

eine Abfrage aller sicherheitsrelevanten Betriebsmittel. Dies kann unmittelbar durch Signale von Rückmeldekontakten oder durch softwaremäßige Auswertung von Messwerten geschehen.

Die Kommunikation muss hierbei extrahiert betrachtet werden, da sie per Schnittstelle teilweise außerhalb des Reglers arbeitet und nur bedingt von diesem beeinflusst werden kann. Störungen werden durch das SPS-Programm rechtzeitig erkannt, jedoch erst dann berücksichtigt, wenn sie die Regelung beeinflussen. Gegebenenfalls erfolgt anschließend eine Fehlerauswertung und der Regler überwacht sich im Fehlerfall selbständig. Die Abfrage dezentraler Messpunkte durch die Kommunikation bietet weiterhin die Möglichkeit, Fehler im Netz durch signifikante Abweichung von systemisch eigentlich stabilen Größen festzustellen, die die Regelung beeinflussen oder im schlechtesten Fall sogar behindern.

Letztendlich müssen die Regelalgorithmen so funktionieren, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussen und das System instabil werden lassen. Hierfür ist in der SPS bezüglich der Regelziele deren eindeutige Unterscheidung programmiert. Zusätzlich ist zur Einhaltung der erlaubten Grenzwerte von Strom und Spannung eine Routine implementiert, die den bezüglich aller Messungen optimalen Betriebspunkt in Form einer minimal möglichen Überschreitung wählt.

### **3.5.6 Entwurf von Testszenarien und Testaufbauten**

Die eingehende Kontrolle im Prüffeld bei Walcher bezüglich des hardwaretechnischen Aufbaus und erster, einfacher Schalthandlungen für die Regelung basierte auf den Prüfvorschriften für die Netzregler und ist in Bezug auf Erweiterungen für FLOW-R angepasst worden.

Weiterhin ist im Rahmen dieses Arbeitspakets zunächst ein Prüfplan, der in seinem grundlegenden Aufbau von Walcher bereits für die bekannten Netzregler verwendet worden ist, für den geplanten Labortest entworfen worden. Dieser Prüfplan diente als Entwurf zur Abdeckung aller im Voraus absehbaren Betriebsfälle. In Absprache mit PWN und der TUK ist dieser optimiert und im Rahmen der Möglichkeiten des Testlabors der TUK auf die wesentlichen Punkte Betriebssicherheit, Regelungsverfahren und -ziele sowie Kommunikations- und Messfehler reduziert worden.

## **3.6 Implementierung**

### **3.6.1 Entwicklung der BPL-Kommunikationsmodule**

Ziel des Arbeitspaketes war es den im Arbeitspaket 5.4 ausgewählten Routing-Algorithmus zu implementieren und die Firmware ausführlich im Labor zu testen, um diesen letztendlich auf entsprechenden BPL-Modems im Feldtest einsetzen zu können. Startpunkt der Entwicklung war die Erstellung eines Lastenheftes. Hierzu konnte auf die im Arbeitspaket 5.4 festgelegten Anforderungen zurückgegriffen

werden. Die PPC verfolgt einen agilen Softwareentwicklungsansatz. Hierbei wird Scrum als Projektmanagement-Framework praktiziert. Die Definition eines Lastenheftes erfolgt in Form von User Stories, die im Rahmen des Backlog-Refinements immer kleinteiliger aufgeteilt werden und dann im Entwicklungsteam im Rahmen von Entwicklungssprints implementiert werden. Die Erstellung von Lasten- und Pflichtenheft sind somit Teil des Backlog-Refinements, der parallel zu den Sprints durchgeführt wird.

Ein weiteres Merkmal der agilen Softwareentwicklung nach Scrum ist die permanente Durchführung von entwicklungsbegleitenden Softwaretests. Parallel zur Implementierung der einzelnen User-Stories werden Testszenarien definiert, die jede neue Version des Codes durchlaufen muss. Auf diese Weise können Fehler in der Implementierung schneller erkannt und behoben werden.

Die im Lastenheft definierten Anforderungen konnten im Rahmen des Projektes implementiert werden, wobei im Rahmen des Feldtests einige Verbesserungspotentiale im Routing-Algorithmus entdeckt wurden, die vor einer Marktreife der Software noch umgesetzt werden müssen.

### **3.6.2 Aufbau, Produktion der Pilotanlage**

Der Aufbau und die Produktion des Prototyps im Testlabor der TUK erfolgten entsprechend des erarbeiteten Aufbauplans. Das Betriebsmittel wurde nach dem erstellten Stromlaufplan angeschlossen.

Der Einbau der Kommunikationsschnittstelle wurde in diesem Zusammenhang auf die Testphase verschoben, da die Verbindung über BPL in diesem Projektstatus noch nicht zwingend erforderlich war.

## **3.7 Labortest**

### **3.7.1 Aufbau der Testumgebung**

Zur Überprüfung des FLOW-Rs in sämtlichen Betriebszuständen, der ordnungsgemäßen Funktionsweise aller Algorithmen sowie zur Überprüfung der sicherheitsrelevanten Schutzeinrichtungen des FLOW-R, wurde in den Räumlichkeiten der TU Kaiserslautern eine Testumgebung konzipiert und aufgebaut. Der resultierende Prüfstand umfasst neben einer Netznachbildung eines NS-Netzes, Lasten und Einspeisungen zur Simulation realer Verbraucher oder Erzeuger.

Das Modell der Netznachbildung bildet ein vermaschtes NS-Netz, bestehend aus Kabeln des Typs NAYY 4x150, ab. Die Längen ergeben sich aufgrund früherer Untersuchungen zu synthetischen Netzmodellen. Widerstände und Reaktanzen einzelner Netzabschnitte wurden mittels Stahlgitterwiderständen und Induktivitäten nachgebildet. Abbildung 3.25 stellt die entworfene Topologie, mit den als Impedanz dargestellten Kabelstrecken sowie einzelnen Messpunkten M dar. Das Netzmodell ist an eine Labor-Verteilung angeschlossen, welche die Funktion der Ortsnetzstation übernimmt. Durch Heraustrennen bzw. Einsetzen der Verbindungen X11 bis X32 sind mehrere unterschiedlich vermaschte Topologien darstellbar.



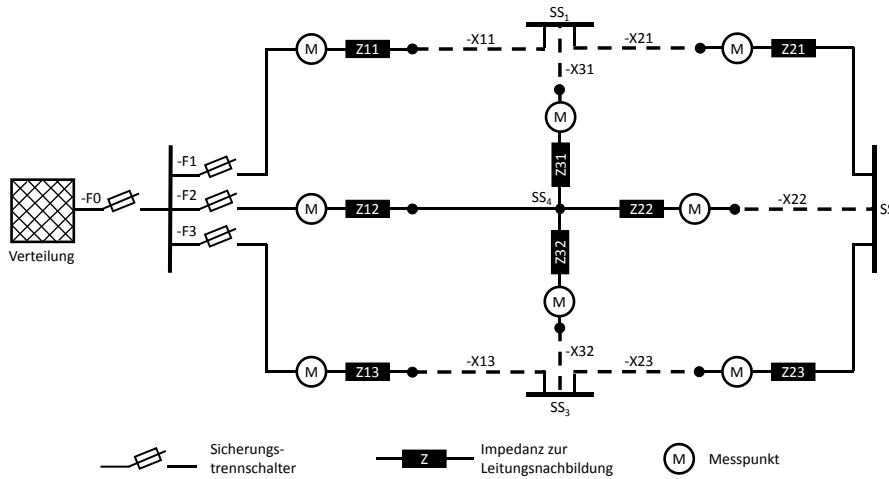


Abbildung 3.25: Netzmodell mit Impedanzen und Messpunkten

Die Realisierung erfolgte in den in Abbildung 3.26 dargestellten Schaltschränken. Sowohl der Anschluss des Reglers, als auch der Anschluss von Lasten und Erzeuger erfolgen über die installierten Sammelschienensysteme in den Schaltschränken.

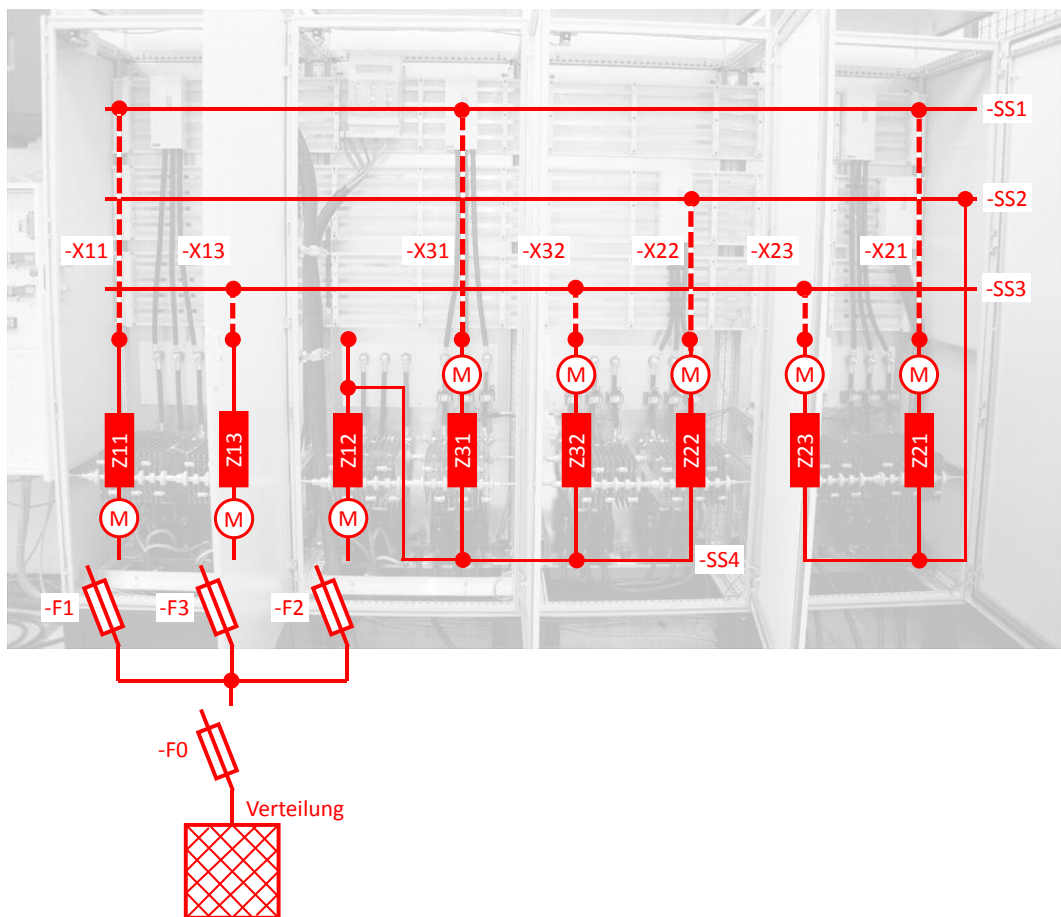


Abbildung 3.26: Schaltschranke mit Netznachbildung

Die Lasten (siehe Abbildung 3.27) zur Nachbildung einer Gruppe aus Verbrauchern weisen jeweils eine Leistung von  $P_{load,peak} = 75 \text{ kW}$  ( $\cos \varphi \approx 1$ ) auf. Die speziell hierzu entwickelte Ansteuerung ermöglicht eine symmetrische oder asymmetrische Stufung in 1,7-kW-Schritten. Durch eine Ethernet-Anbindung

an das Labor-Kommunikationsnetz können MATLAB®-basierte Lastprofile erzeugt und als Sollwert übergeben werden (Abbildung 3.27). Ebenso erfolgt eine Messung der bezogenen Leistung und weiterer Parameter.

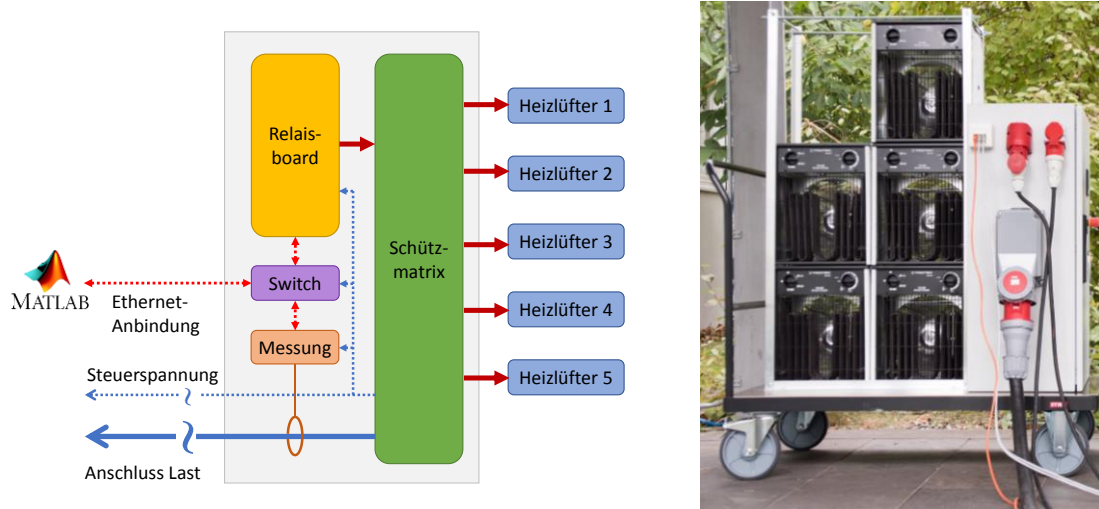


Abbildung 3.27: Schematische Darstellung der Laststeuerung (links) sowie Aufbau einer Last auf Fahrwagen (rechts)



Abbildung 3.28: Wechselrichter der Hersteller SMA und KACO mit jeweils 9kVA



Abbildung 3.29: DC-Quellen (oben) und Leitungsnachbildung (unten)

Zur Anhebung der Knotenspannung werden zwei Wechselrichter der Hersteller SMA und KACO mit jeweils 9 kVA Leistung eingesetzt (siehe Abbildung 3.28). Die DC-Versorgung erfolgt über zwei getrennt ansteuerbare DC-Quellen, die ebenso kommunikativ erschlossen sind (Abbildung 3.29). (siehe Abbildung 3.29). Auch hier ist eine Sollwertvorgabe durch MATLAB® möglich.

Aufgrund der im Modellnetz nachgebildeten, realen Querschnitte des Kabeltyps NAYY 4x150 führt eine maximale Einspeisung von 18 kVA zu keiner nennenswerten Anhebung der Knotenspannungen im Modell. Somit werden die Wechselrichter an einer ebenso nachgebildeten Stichleitung angeschlossen, um an dessen Ende eine nennenswerte Spannungsanhebung  $> 15\% U_n$  zu erhalten (Abbildung 3.30). Abbildung 3.31 gibt eine Übersicht zum Laboraufbau. Die Lasten und die Pilotanlage wurden über die in der Abbildung zu sehenden Kabel an die NS-Netznachbildung angeschlossen.

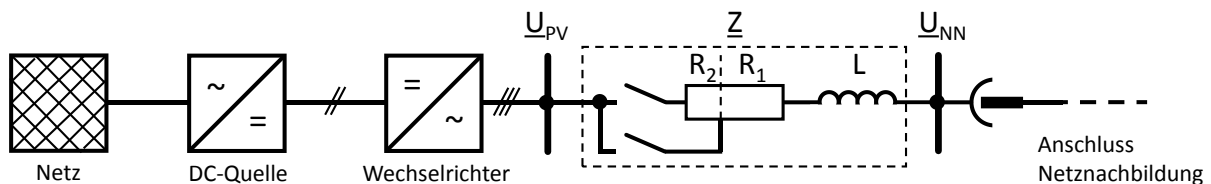


Abbildung 3.30 : PV-Nachbildung mit Stichleitungsmodell

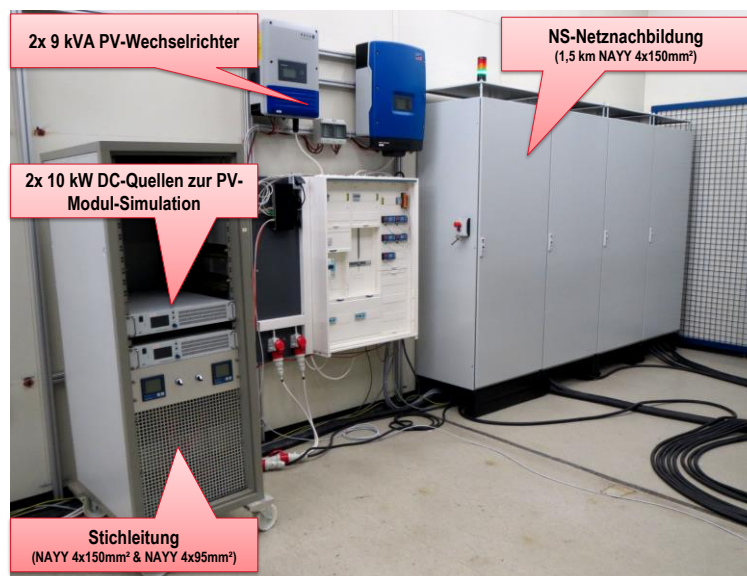


Abbildung 3.31: Labor-Prüfstand mit PV-Simulator

### 3.7.2 Integration des Prototyps in die Laborumgebung

Durch die Bauweise des Prüfstands konnte die Pilotanlage im Testlabor einfach platziert und montiert werden. Die anschließende Inbetriebnahme im Testlabor erfolgte schrittweise. Hierzu wurde der Regler zunächst in einem offenen Ring betrieben und die Kommunikation zwischen Regler-Steuerung und Messtechnik überprüft. Weiterhin erfolgte durch Anschluss der Lasten eine erste Überprüfung des Verhaltens bei Bemessungsleistung. Danach erfolgte ein weiterer Test zur Regelung der Ausgangsspannung zur ersten Validierung der Algorithmen.

Die durchgeführten Labortests zeigten die korrekte Implementierung aller Regelziele. Die Überprüfung der sicherheitsrelevanten Funktionen erfolgte durch simulierte Fehlerzustände und wurde ebenso bestanden. Somit ist gewährleistet, dass der Regler bei internen Störungen, aber auch bei Unterbrechungen einzelner Außenleiter oder der Kommunikationsverbindung in einen sicheren Modus versetzt

wird. Ein mehrstündiger Betrieb des Reglers bei Bemessungsleistung zur Überwachung seines thermischen Verhaltens bewies die Effektivität der aktiven Belüftung.

### 3.7.3 Validierung des Regelkonzepts verschiedener Regelziele

#### 3.7.3.1 Netzmodell

Die Algorithmen zur Spannungs- und Wirkleistungsregelung wurden in dem in Abbildung 3.32 dargestellten, zweifach vermaschten Netz durchgeführt. Hierzu sind sowohl die Last- als auch PV-Nachbildungen an die Sammelschiene  $SS_2$  angeschlossen. Die Messung der relevanten Größen erfolgte durch Messgerät  $M_{214}$ . Der FLOW-R wurde an der dargestellten Position in den Ring integriert.

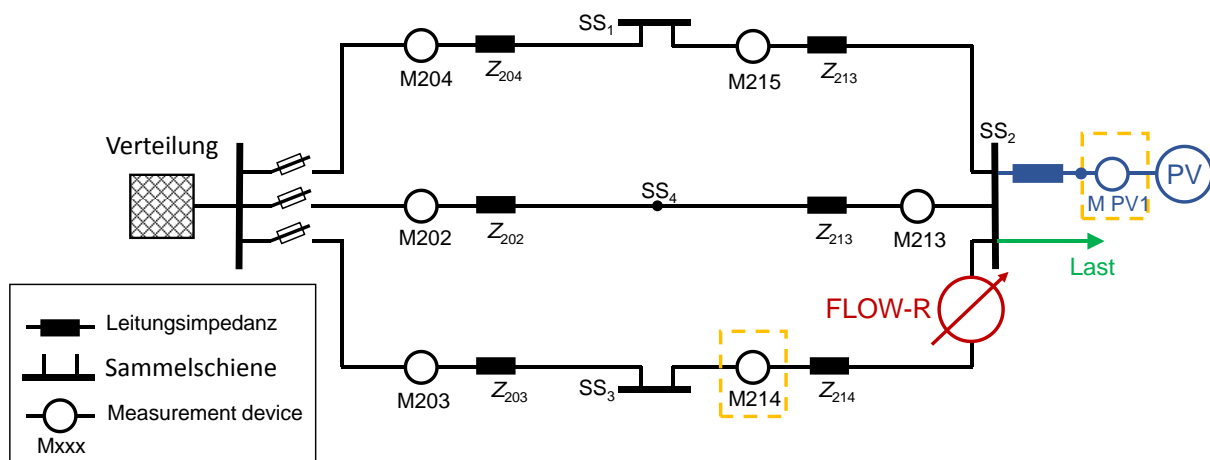


Abbildung 3.32 : Netzmodell zur Überprüfung der Regler-Algorithmen

#### 3.7.3.2 Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung

Zum Test der Regelziele Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung wurde durch die Lasten im vorab dargestellten Netz der in Abbildung 3.33 blau dargestellte Stromverlauf über einen Zeitraum von 30 min generiert. Dieser erreicht in der Spitze einen Betrag von 90 A und soll von beiden Regelzielen auf 50 A geregelt bzw. begrenzt werden. Die Ergebnisse der Messungen sind für die Sollwertregelung in Rot, für die Grenzwertüberwachung in Grün dargestellt. Im Falle der Sollwertregelung konnte der Strombetrag im Messpunkt mit einer Abweichung von  $\pm 5$  A konstant gehalten werden. Die Abweichung resultiert aus dem Zeitverhalten der Regler-Steuerung. Aufgrund der zyklischen Erfassung aller Messdaten und Abarbeitung des Programms entsteht eine maximale Differenz zwischen einer Messwertänderung und Stufenanpassung von  $\sim 15$  s. Daraus ergibt sich der erkennbare Rechteckverlauf des Sollwertes. Dieser ist für einen realen Netzbetrieb, im Hinblick auf die Anforderung zur Begrenzung der thermischen Belastung, unkritisch.

Die Grenzwertüberwachung konnte ebenso erfolgreich getestet werden. Diese wird erst bei Erreichen des vorgegebenen Grenzwertes (hier 50 A) aktiv und weist danach ein der Sollwertregelung ähnelndes Verhalten auf.

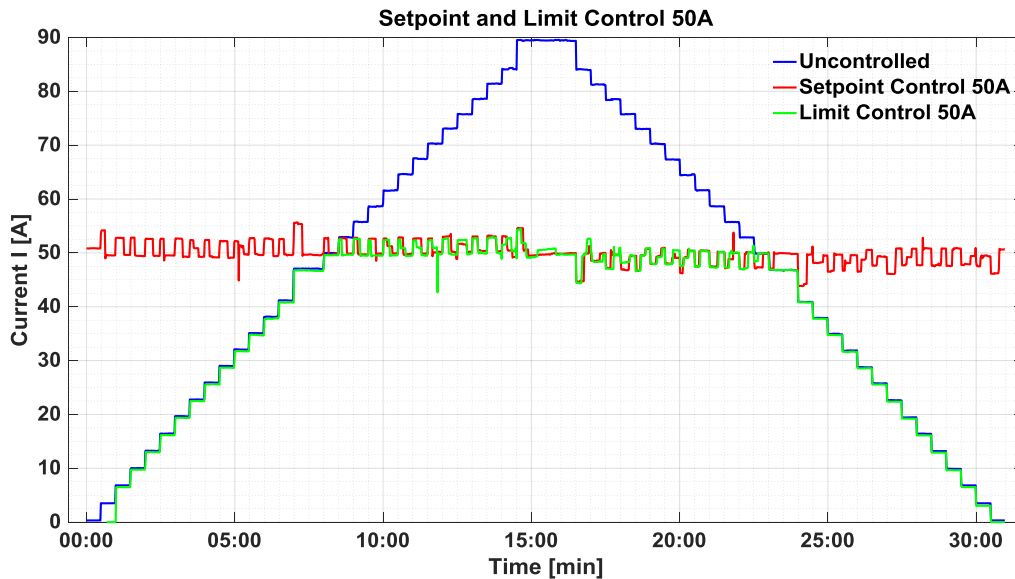


Abbildung 3.33: Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung

Beide Regelziele wurden ebenso für einen asymmetrischen Belastungsfall getestet. Im dargestellten Beispiel in Abbildung 3.34 sind sowohl der asymmetrische Lastverlauf als auch das Verhalten des Regelalgorithmus zu erkennen. Dieser ist in Analogie zur vorab dargestellten symmetrischen Belastung in der Lage, den Strombetrag zu regeln. Auch hier gilt für die Bestimmung der unterschiedlichen Steuerspannungen der drei Außenleiter das vorab beschriebene Zeitverhalten. Dieses resultiert insbesondere im Fall von Leiter L1 aus der erkennbaren Spitze zu Beginn des Regelvorgangs. Der starke Lastsprung wird nach wenigen Sekunden durch den Algorithmus erkannt und abgeregelt.

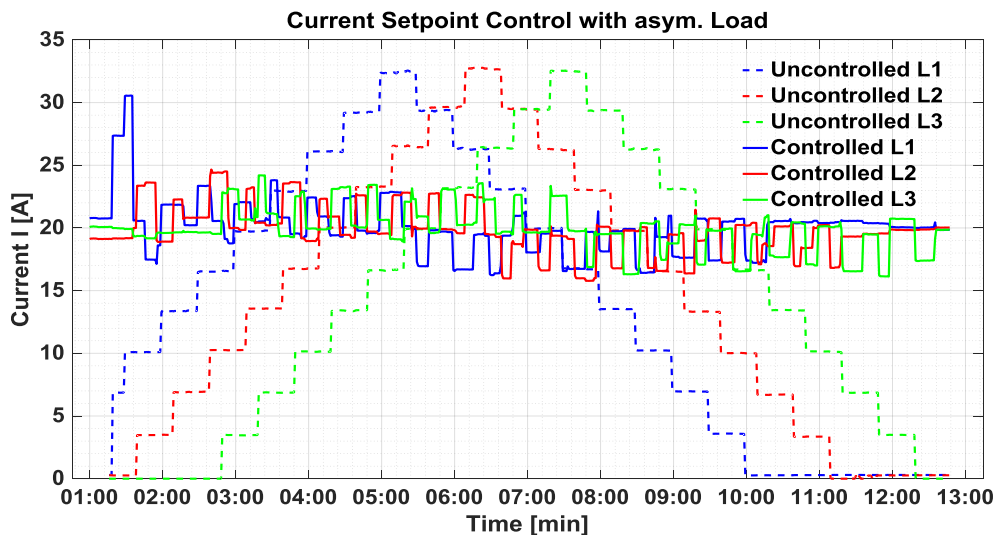


Abbildung 3.34: Strombetragsregelung bei asymmetrischer Belastung

### 3.7.3.3 Kombinierte Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung

Neben der unabhängigen Ausführung der dargestellten Regelziele ist ebenso eine Kombination der Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung möglich. Die Darstellung der Messergebnisse er-

folgt hierzu in Abbildung 3.35. Durch das Überschreiten des vorgegebenen Grenzwertes 60 A im Messpunkt M 213 (blau) wird der Stromfluss in M 213 begrenzt, wodurch die Einhaltung des Sollwertes von 80 A in M 214 nicht mehr gewährleistet werden kann. Dies stellt sich wiederum durch die erkennbare Abweichung im Bereich ~ 14 min bis ~ 17 min dar.

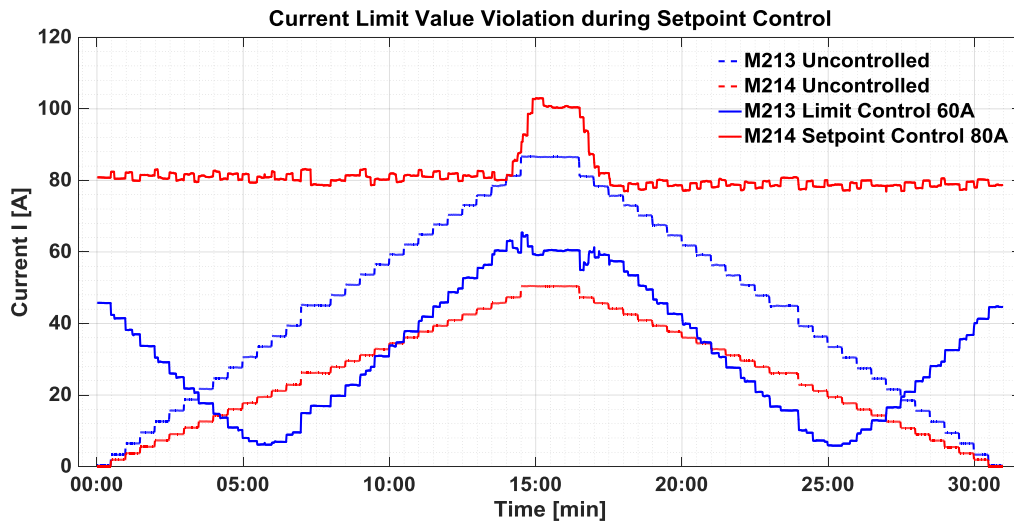


Abbildung 3.35: Messergebnisse der kombinierten Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung.

### 3.7.3.4 Mehrfache Grenzwertüberwachung

Neben der Kombination von Sollwertregelung und Grenzwertüberwachung wurde auch das Verhalten bei mehrfacher Grenzwertverletzung getestet. Auch hier stellen die Messergebnisse in Abbildung 3.36 das korrekte Verhalten der Algorithmen dar. Aufgrund der festgelegten Grenzwerte in M 213 (50 A) und M 214 (80 A) kommt es bei steigender Last zu einer mehrfachen Grenzwertverletzung. Diese resultiert im Zeitraum ~ 13 min bis ~ 18 min in einer gleichmäßigen Abweichung von den Grenzwerten.

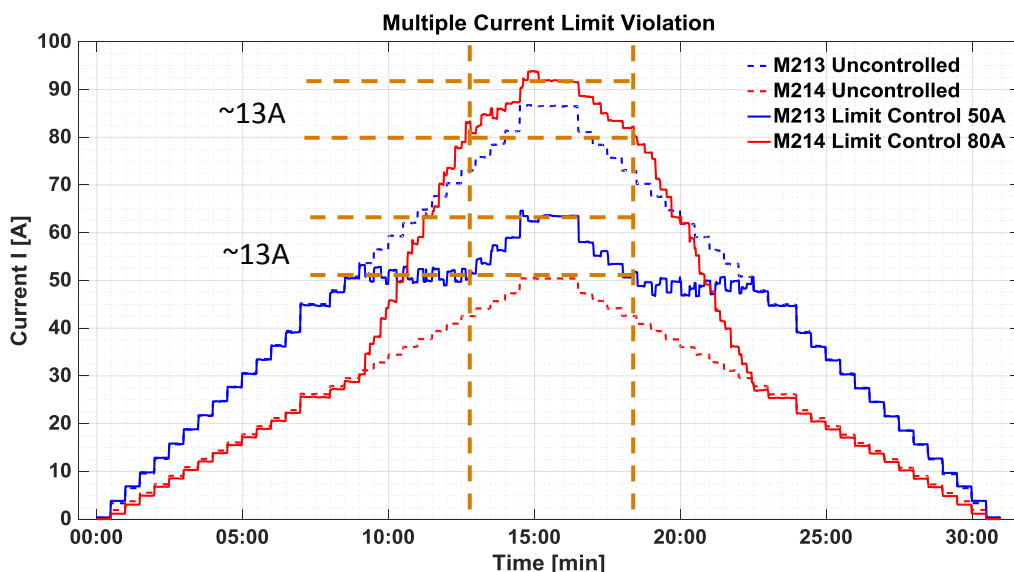


Abbildung 3.36: Messergebnisse der mehrfachen Grenzwertverletzung



### 3.7.3.5 Thermographiemessung

Zur Bestimmung der thermischen Belastung der internen Komponenten des FLOW-R wurde dieser über mehrere Stunden bei Bemessungsleistung betrieben und die Temperatur im oberen Bereich des Reglerschaltschranks erfasst (Abbildung 3.37). Diese wird aufgrund der aktiven Belüftung auf einem konstanten Niveau von 48°C gehalten. Die Umgebungstemperatur innerhalb des Labors betrug dabei über den gesamten Zeitraum ca. 22°C.

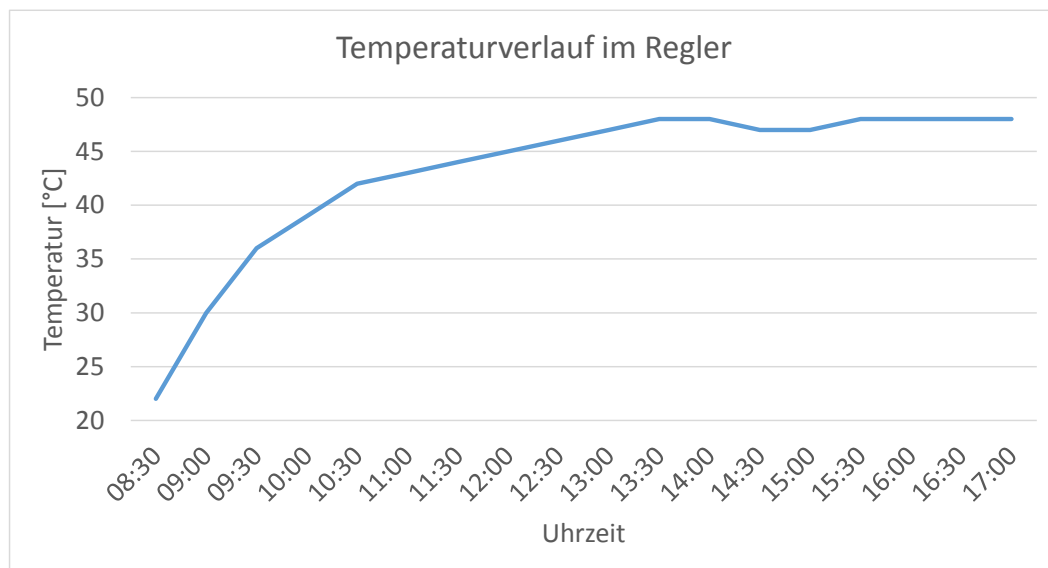
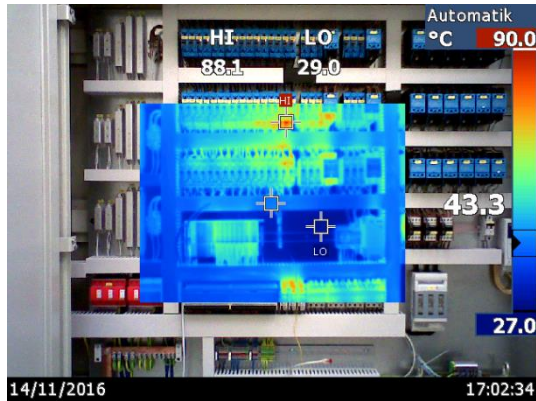
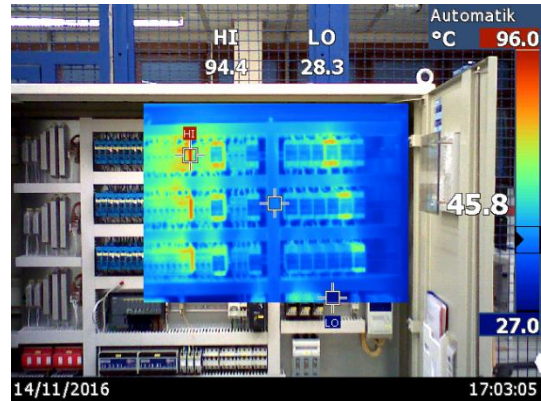


Abbildung 3.37: Temperaturverlauf im Reglerschaltschrank bei Bemessungsleistung

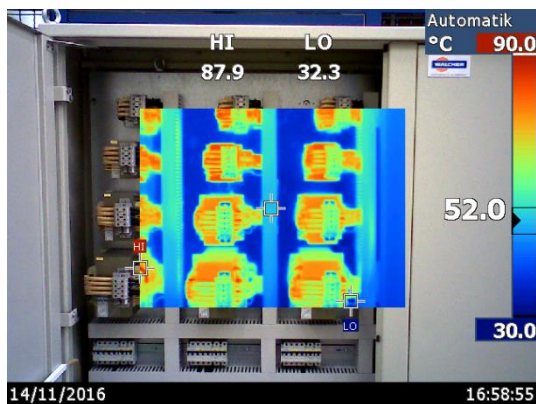
Mittels einer Wärmebildkamera wurden die Temperatur-Hotspots erfasst und den Baugruppen zugeordnet (Abbildung 3.38). Diese weisen jedoch keine kritischen Temperaturerhöhungen hinsichtlich der erlaubten Grenzwerte auf. Ebenso wurden am Gehäuse des Reglers keine bedenklichen Temperaturen festgestellt, die eine Restriktion gegen einen unbeschränkten Einsatz im Freien, darstellen.



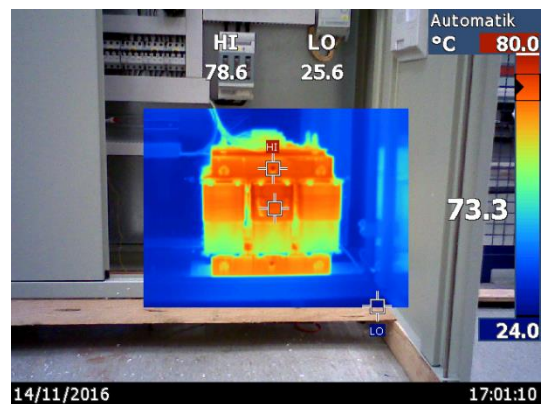
SPS-Steuerung



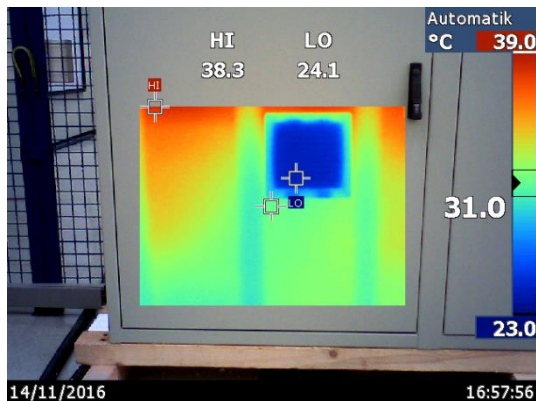
Relais-Ansteuerung



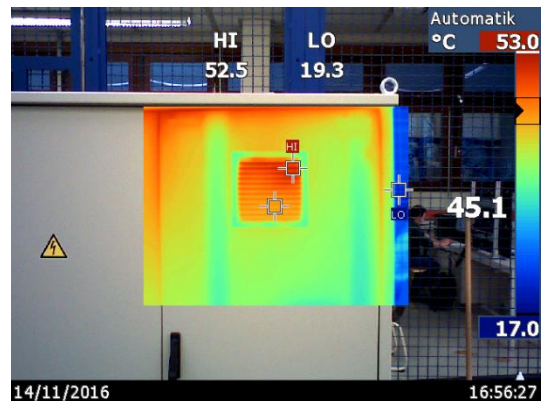
Stufentransformatoren



Zusatztransformator



Lufteintritt bei Lüfter



Luftaustritt

Abbildung 3.38 : Übersicht der Thermographieaufnahmen



## 3.8 Feldtest

### 3.8.1 Montage und Inbetriebnahme der Pilotanlage im Testnetz

Montage und Inbetriebnahme der Pilotanlage konnten im Testnetz Heuchelheim-Klingen aufgrund der optimalen Zuwegung sowie der günstigen Anschlussmöglichkeiten am benachbarten Kabelverteilerschrank KV11T problemlos durchgeführt werden (Abbildung 3.39). Die wesentlichen Installationen wurden durch die Pfalzwerke Netz AG beauftragt, beaufsichtigt und durch Partnerunternehmen durchgeführt. Die Inbetriebnahme sowie die Parametrierung erfolgten in Zusammenarbeit zwischen PWN, WA und TUK. Installation und Einbindung in das BPL-Netz wurden durch PPC durchgeführt.

Weiterhin wurden zwei Temperatursensoren zur Beobachtung der Temperaturentwicklung im Reglerinneren im aktiven Betrieb (auch bei direkter Sonneneinstrahlung) installiert. Abbildung 3.40 zeigt die montierte Pilotanlage.



Abbildung 3.39: Montagephase des Reglers.  
Anordnung direkt neben dem KV.



Abbildung 3.40: FLOW-R nach abgeschlossener Installation

### 3.8.2 Durchführung der Messkampagne

#### 3.8.2.1 Referenzmessung

Zur Verifizierung der Messergebnisse bei aktivem Regelbetrieb fanden mehrere Referenzmessungen bei inaktivem Regler statt. Diese wurden an sonnigen, nur teilweise bewölkten Tagen durchgeführt. Hierzu wurde ein Messpunkt als Spannungsreferenz (siehe Abbildung 3.41, oben) und zwei weitere Messpunkte als Stromreferenzen (siehe Abbildung 3.41, unten) gewählt. Das Messintervall zur Datenaufzeichnung wurde für diese und nachfolgende Messungen auf 60 Sekunden festgelegt. Die Messwerte sind mit den gemessenen, sowie einem gefilterten Wert dargestellt. Die ungefilterten Messwerte für Ströme und Spannungen weisen dabei nennenswerte Spitzen auf, welche auf die volatilen Leistungsflüsse aufgrund des Verbraucherverhaltens in den NS-Netzen zurückzuführen sind. Der aufgrund der Mittelwertbildung geglättete Verlauf zeigt jedoch den deutlich zu erkennenden Tagesverlauf der PV-Einspeisung. Diese wirkt sich auf Spannungen und Ströme gleichermaßen aus.

Im Tagesverlauf am MP 3135 wurden Spannungen bis zu 247 V und am MP 3141 Ströme von bis zu 80 A gemessen.

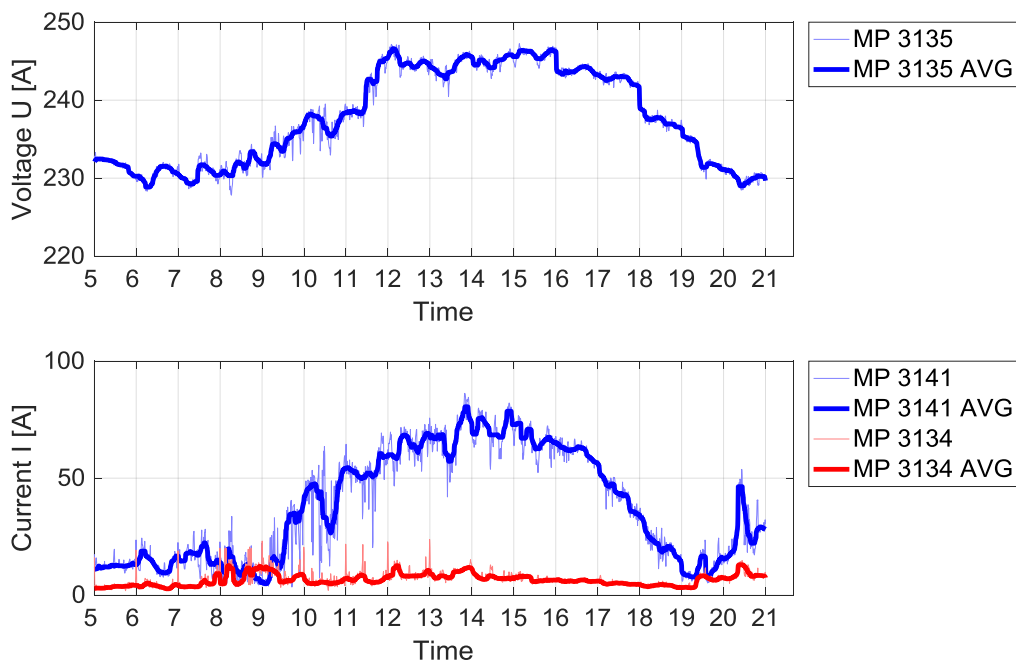


Abbildung 3.41 : Referenzmessung an MP 3135 (Spannung) und MP 3141 sowie MP 3134 (Strom)

Nachfolgend werden die relevanten Ergebnisse des Regelziel-Tests innerhalb der Feldtestphase vorgestellt. Dabei gilt es zu beachten, dass das ausgewählte Testnetz trotz hoher PV-Durchdringung keine thermischen Überlastungen im Kabelnetz aufweist. Im Rahmen der Untersuchungen wurden somit die Parametrierungen der Regelziele mit dem Ziel der Überprüfung des Reglers und der Darstellbarkeit der Ergebnisse gewählt. Es wurden daher Grenzwerte im zweistelligen Ampere-Bereich basierend auf den oben beschriebenen Messergebnissen gewählt. Jedoch sind die Ergebnisse der Messungen auf Spannungen und Ströme in betrieblich sinnvollen Grenzbereichen skalierbar.

### 3.8.2.2 Sollwertregelung Strom

In Abbildung 3.42 ist die vom Regler durchgeführte Sollwertregelung Strom mit einem Sollwert  $I_{\text{set}} = 40\text{A}$  dargestellt.

Im Rahmen der Sollwertregelung für Ströme wurden der Sollwert  $I_{\text{set}} = 40\text{A}$  an MP 3141 gewählt. In Abbildung 3.42 ist deutlich die konstante Einhaltung des Regelziels zu erkennen. Aufgrund der Leistungsverschiebung hat dies eine entsprechende Anhebung des Stromes in MP 3134 zur Folge.

Die starke Ausprägung der Spitzen des Stromverlaufs in MP 3134 zu jeder vollen Stunde resultiert aus der stündlich stattfindenden Aktualisierung der Kennlinien. Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert wurde, basiert die Aktualisierung und Anpassung der Kennlinien auf einer kurzzeitigen Einstellung zweier diskreter Steuerspannungsstufen, die zu einer Strom- und Spannungsänderung in allen Messpunkten führt. Die dabei gemessenen Werte dienen als Stützpunkte für das beschriebene Verfahren. Aufgrund

der kurzen Zeitdauer von weniger als 30 s haben die kurzzeitigen Anhebungen oder Absenkungen der Ströme keinen nennenswerten Einfluss auf das thermische Zeitverhalten.

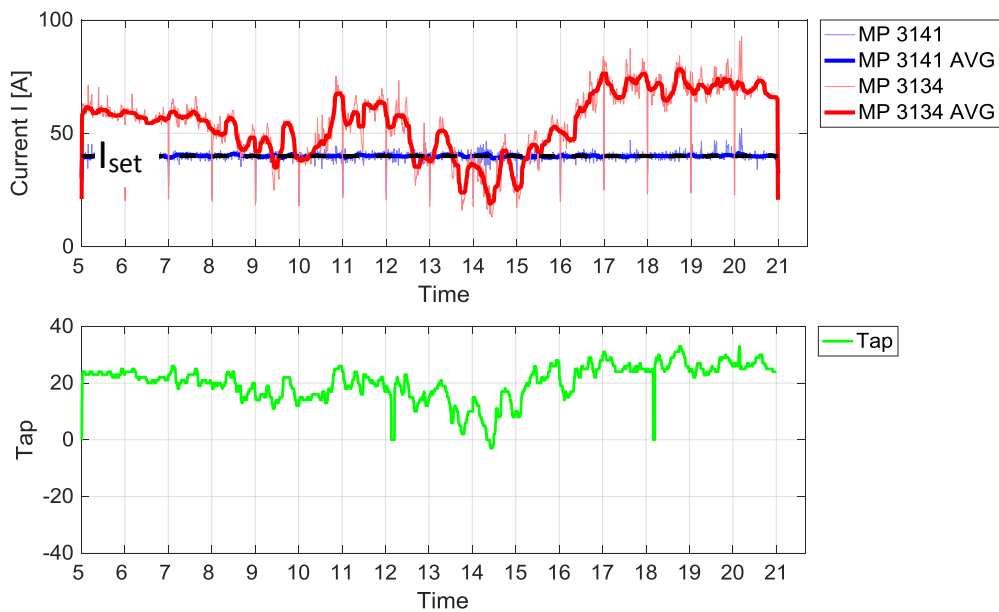


Abbildung 3.42: Sollwertregelung Strom an MP 3141

### 3.8.2.3 Grenzwertüberwachung Strom

Im Rahmen der Grenzwertüberwachung für Ströme wurde der Grenzwert  $I_{limit} = 40$  A an MP 3141 gewählt. In Abbildung 3.43 ist deutlich die Begrenzung des Stromes zwischen ca. 11 Uhr bis 16 Uhr zu erkennen. Aufgrund der Leistungsverschiebung führt dies zu einer entsprechenden Anhebung des Stromes in MP 3134.

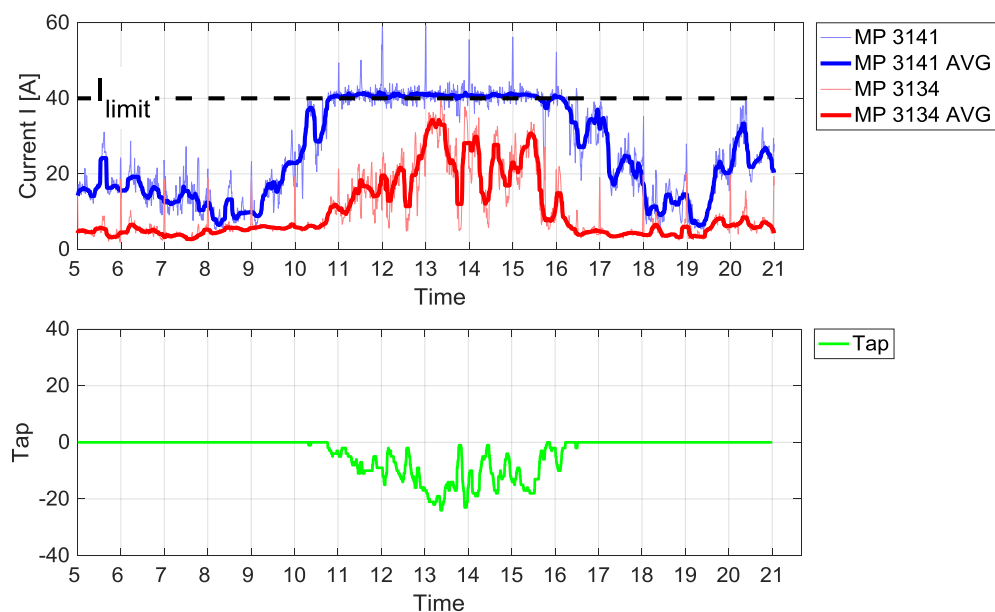


Abbildung 3.43: Grenzwertüberwachung Strom an MP 3141

### 3.8.2.4 Kombinierte Sollwertregelung mit Grenzwertüberwachung Strom

Auch im Feldtest wurde die kombinierte Sollwertregelung mit Grenzwertüberwachung getestet. Hierzu wurde ein Sollwert von  $I_{\text{set}} = 40 \text{ A}$  an MP 3141 und ein Grenzwert  $I_{\text{limit}} = 60 \text{ A}$  an MP 3134 festgelegt. Die in Abbildung 3.44 dargestellten Verläufe weisen das bereits im Labortest nachgewiesene Verhalten auf. Aufgrund der Überschreitung des Grenzwertes gegen 10:30 Uhr vernachlässigt der Regler die Einhaltung des Sollwertes bis ca. 18:00 Uhr. Nach der Unterschreitung des Grenzwertes findet anschließend wieder eine reine Sollwertregelung statt.

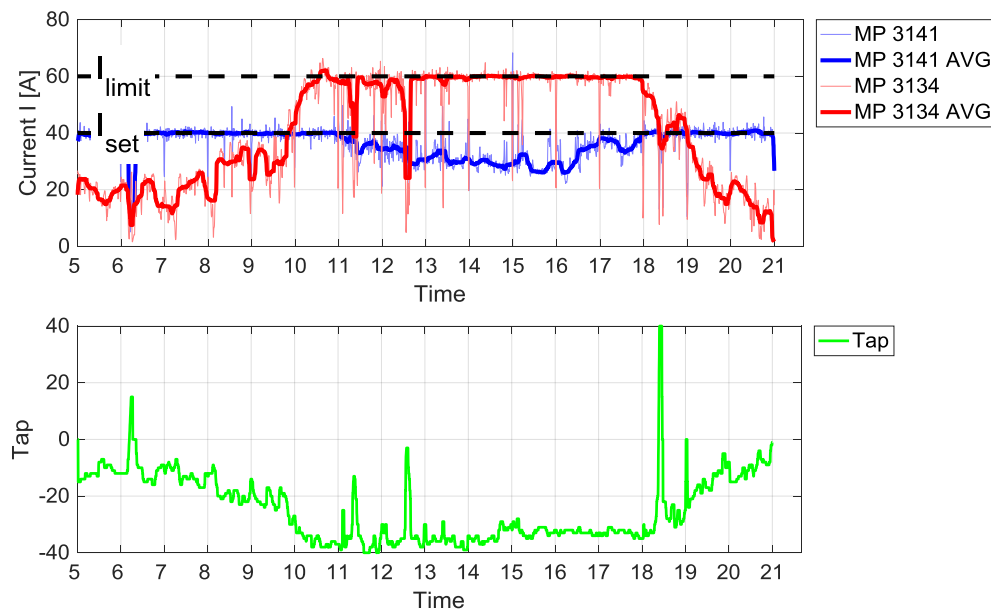


Abbildung 3.44: Kombiniert Sollwertregelung und Grenzwertüberwachung Strom an MP 3141 und MP3134

### 3.8.2.5 Sollwertregelung und Grenzwertregelung Spannung

Das vorab dargestellte Regelziel zur kombinierten Spannungsregelung und Wirkleistungsüberwachung für Ströme kann ebenso auf Spannungen angewendet werden.

Zur Überprüfung der Algorithmen wurde für den MP 3135 der Sollwert  $U_{\text{set}} = 240 \text{ V}$  gewählt. Eine Begrenzung der Spannung auf  $U_{\text{limit}} = 248 \text{ V}$  erfolgte an MP 3134. Abbildung 3.45 zeigt die aufgenommenen Spannungsverläufe. Auch hier konnten die Regelalgorithmen die gewünschten Regelziele erfüllen.

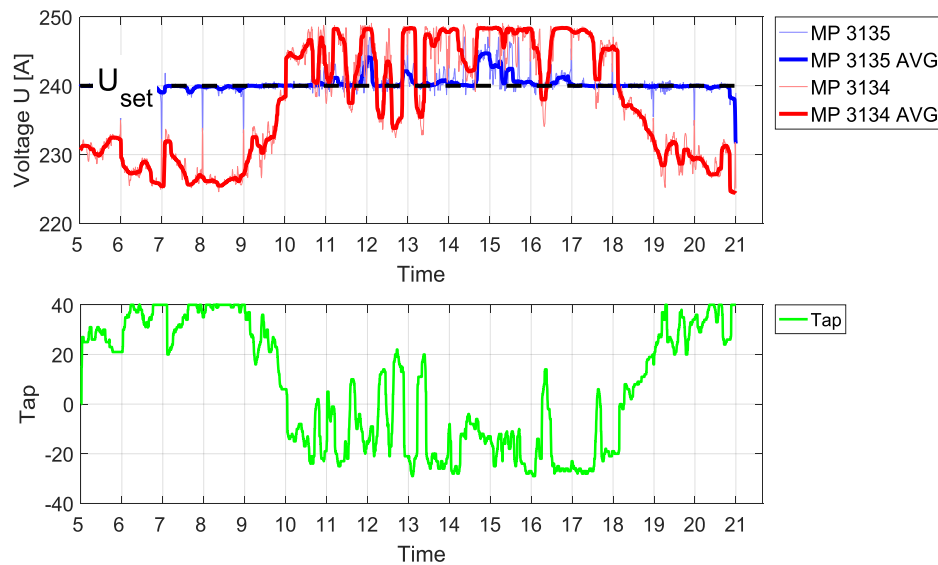


Abbildung 3.45: Sollwertregelung mit Grenzwertüberwachung Spannung

### 3.8.3 Auswertung der relevanten Daten aus dem Netz

Die Messdaten während der Phase des Feldtests haben im Allgemeinen den Erwartungen gemäß den jeweils gewählten Regelzielen entsprochen. Zu Beginn hat sich herausgestellt, dass die Kommunikation der SPS im Regler mit den verteilten Messgeräten unter gewissen Umständen instabil gewesen ist. Dies hat es erforderlich gemacht, die programmierte Kommunikations- und Störungsbearbeitung solcher Unterbrechungen hinsichtlich der Fehlertoleranz anzupassen. Ein stabiles Regelverhalten ist die Folge.

Eine weitere wichtige Feststellung ist das Auftreten von abweichendem/schwingendem Verhalten bei signifikanter Blindleistung im Vergleich zur Wirkleistung an gewählten Messpunkten im Netz gewesen. Hieraus ist deutlich geworden, dass der sich aus dem Leistungsfaktor ergebende Winkel bei der Wahl der Phasenlage der einzuprägenden Spannung berücksichtigt werden muss.

Die Analyse aller Regelalgorithmen erfolgte kontinuierlich während des Feldtest. Die Erkenntnisse hieraus sind unmittelbar in eine Anpassung der Software eingeflossen. Neben Software-Anpassungen ist hierbei auch die Parametrierung optimiert worden. In weiterführenden Versuchen sind ähnlich zur Notwendigkeit eines diskret verstellbaren Winkels Untersuchungen zwecks Anzahl und Größe der Transformatoren und Stufen vorgenommen worden. Hierbei hat sich herausgestellt, dass für eine Basis-Ausführung eines solchen Reglers keine Umschaltbarkeit der Phasenlage gegeben sein muss sowie drei Transformatoren bei geeigneter Wahl der Stufengröße ausreichen, um qualitativ ausreichende Ergebnisse zu erzielen.

## **3.9 Vergleichende Bewertung**

### **3.9.1 Technische Bewertung**

#### **3.9.1.1 Innovative Betriebsmittel**

Die Einhaltung der durch die Norm DIN EN 50160 vorgegebenen Spannungen, sowie die Einhaltung des zulässigen thermischen Grenzstromes, insbesondere der Kabel, stellt eine zunehmende Herausforderung für den Niederspannungs-Netzbetrieb dar. Stehen zur Einhaltung des Spannungsbandes die unter Abschnitt 1.5 genannten Netzregler zur Verfügung, wurde erst mit dem FLOW-R ein Betriebsmittel zur Wirkleistungsregelung im NS-Netz geschaffen.

Hierzu bedarf es jedoch der angesprochenen vermaschten Netze. Diese weisen nach Studien [24] und [25] eine um bis zu 25 % gesteigerte Aufnahmefähigkeit für erneuerbare Erzeuger auf. Die Umschaltung zu vermaschten Netzen ist insbesondere in halb- oder vorstädtischen Topologien häufig einfach zu realisieren. Aufgrund der oftmals vermascht gebauten, aber strahlenförmig betriebenen Netze ist vielerorts der Einsatz von sogenannten Trennmessern oder Sicherungen in Kabelverteilerschränken zur Verbindung der Netzen ausreichend. Ein geringfügiger Ortsnetzausbau, wie er gerade im ländlichen Bereich auftreten könnte, muss nach den in Abschnitt 3.9.2 beschriebenen wirtschaftlichen Kriterien bewertet werden.

Innovative Maßnahmen müssen folglich gleichberechtigt mit konventionellen Maßnahmen geprüft werden. Dabei gilt es auch die zukünftigen Anforderungen zu beachten, gerade auch, wenn die Prognostizierung der Versorgungsaufgabe mit Risiken verbunden ist. Dadurch gelten insbesondere flexibel einsetzbare Maßnahmen als sinnvolle Alternative zum konventionellen Netzausbau.

Weiterhin sind die Dauer zur Umsetzung einer Maßnahme sowie die Beeinträchtigung der öffentlich genutzten Infrastrukturen zu beachten. Gerade innovative Maßnahmen bieten hier durch ihre einfache Integrierbarkeit nennenswerte Vorteile.

#### **3.9.1.2 FLOW-R**

Die Funktionalität des FLOW-R beinhaltet in erster Linie die Einhaltung von Bemessungsströmen in einem vermascht betriebenen NS-Netz. Sollten mehrere Ströme an unterschiedlichen Messpunkten für eine Überschreitung der zulässigen Grenzen sorgen, so wählt der FLOW-R eine optimale Stellung, um die jeweilige Grenzwertverletzung an allen betroffenen Stellen minimal zu halten. Diese Wirksamkeit ist zumindest kurzfristig betrachtet eine Alternative zu herkömmlichem Netzausbau und eine neue Möglichkeit zur optimalen Ausnutzung von NS-Netzen in Anbetracht wachsender Anforderungen durch Elektromobilität und regenerative Energieerzeugung.

An zweiter Stelle besitzt er äquivalent zur Einhaltung der Bemessungsströme die Eigenschaft, dass er, sofern es zu keiner Überschreitung eines Stroms kommt, die Spannung an allen Knotenpunkt innerhalb

des zulässigen Bereichs hält, wiederum versehen mit einer Optimierung bei multiplen Spannungsbandverletzungen. Da diese hauptsächlich durch Einspeisung verursacht werden und Erzeugungsanlagen sich selbst überwachen, wird die obengenannte Einhaltung des Stroms höher priorisiert.

Die Grenzen des Einsatzbereichs eines FLOW-R ergeben sich zunächst durch seine bauliche Ausführung. Die Bemessungsleistung begrenzt ihn bezüglich des lastseitig maximal erlaubten Stroms. Aus der gewählten minimalen Stufengröße und der Anzahl der in einem Leiter in Serie geschalteten Transformatoren berechnet sich die maximal über dem Regler stellbare Spannung. Durch den zusätzlichen Drehstrom-Transformator kann die Phasenlage der Spannung variiert werden. Ohne Drehstrom-Transformator besteht zumindest noch die Möglichkeit, durch manuelle Anschluss-Veränderung der einphasigen Transformatoren diese Phasenlage netzspezifisch anzupassen. Die maximal möglichen Steuerströme in den einzelnen Messpunkten ergeben sich durch die jeweilige Topologie des vermascht betriebenen NS-Netzes.

Bauartbedingt sollte noch darauf geachtet werden, dass für die verwendeten Betriebsmittel geeignete Umgebungsbedingungen für einen sicheren Betrieb geschaffen werden. Je nach Schrank muss eine geeignete Belüftung gewählt werden, um einen Einsatz unter den verschiedensten klimatischen Bedingungen zu gewährleisten. Gegebenenfalls kann dies durch konstruktive und/oder bauliche Anpassungen weiter optimiert werden.

Die Ausführung eines FLOW-R sollte minimal drei Transformatoren je Außenleiter enthalten. Für eine höhere Genauigkeit der einzuregelnden Größe kann ein vierter Transformator vorgesehen werden, wodurch sich bei quasi gleichbleibender maximaler Stellgröße die minimale Stufung auf ein Drittel verringert und sich die Stufenzahl von  $\pm 13$  auf  $\pm 40$  erhöht. Mithilfe eines Drehstrom-Transformators kann eine dynamische Winkel-Umschaltung erfolgen, die jedoch nicht zwingend erforderlich ist, da einerseits eine Mehrzahl an NS-Netzen sich topologisch ähneln, andererseits bei Bedarf die Phasenlage durch manuelle Anpassung der Verdrahtung geändert werden kann.

### **3.9.2 Wirtschaftliche Bewertung**

Die wirtschaftliche Bewertung eines FLOW-Rs erfolgt anhand eines Vergleichs zwischen verschiedenen Regler-Ausführungsvarianten und einem konventionellen Netzausbau. Hierzu werden in Tabelle 3.7 verschiedene Varianten des FLOW-Rs dargestellt. Diese unterscheiden sich in der Bemessungsleistung des Reglers, der Anzahl der Stufentransformatoren sowie der Realisierung der Steuerspannungswinkel. Wie vorab beschrieben, können die Winkel durch einen Zusatztransformator variabel gestaltet sein oder festverdrahtet und somit nicht veränderbar realisiert werden. Die sich aufgrund dieser Variationsmöglichkeiten ergebenden Unterschiede in den Investitionsbeträgen für einen Regler sind in der

Tabelle dargestellt. Hierin sind ebenso die Kosten für den Sockel sowie für zwei Messpunkte eingerechnet. Die Betriebskosten ergeben sich im Wesentlichen aus der zweijährig stattfindenden Kontrolle und Reinigung des Reglers sowie den in diesem Rahmen zu tauschenden Filtermatten der Lüfter.

Die PWN hat hierzu eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, die den Discounted Cash Flow (DCF) einer Realisierung mittels FLOW-R dem DCF eines konventionellen Ortsnetzausbaus mit einem Kabel des Typs NAYY 4x150 gegenüberstellt. Die Kosten für Tiefbau, Verlegung und Montage werden dabei mitberücksichtigt.

Die Zahlenwerte für die Betriebskosten des Reglers sowie die Kosten für einen konventionellen Netzausbau wurden aufgrund der internen Kostenansätze der PWN ermittelt. Dazu werden in den Berechnungen die von der BNetzA vorgegebenen Eigenkapitalzinssätze nach §7 Abs. 6 NEV und §7 Abs. 7 NEV, ein durchschnittlicher Gewerbesteuerhebesatz sowie ein Diskontierungszinssatz angesetzt. Weiterhin wurden die kalkulatorischen und handelsrechtlichen Nutzungsdauern berücksichtigt.

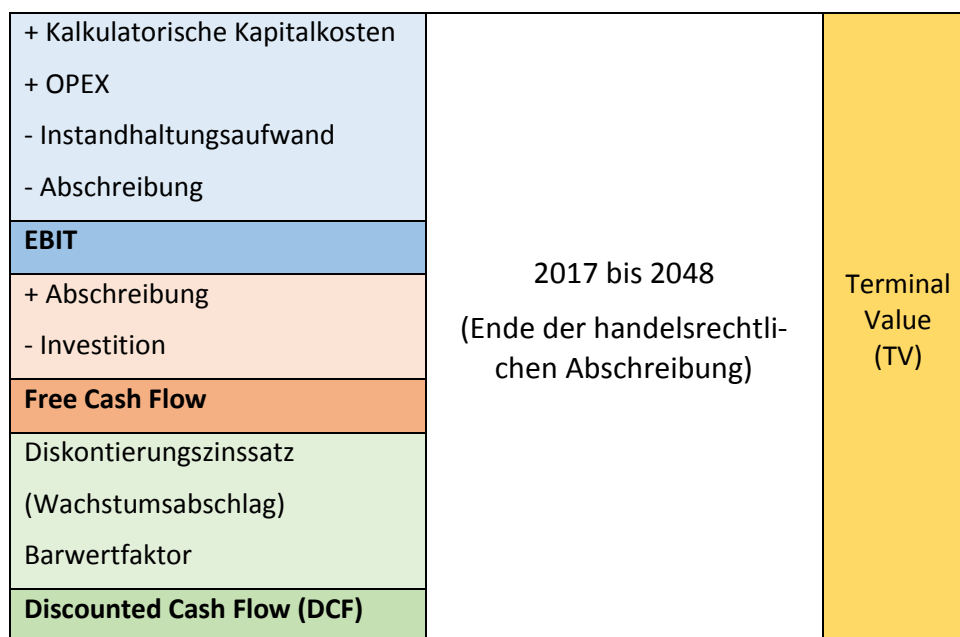


Abbildung 3.46: Schematische Darstellung des DCF-Verfahrens

Die zur Berechnung eines DCF erforderlichen Berechnungsschritte sind in Abbildung 3.46 schematisch dargestellt. Ausgehend von einer Berechnung des jährlichen EBITs (= Earnings Before Interests and Taxes) bis zum Ende der handelsrechtlichen Nutzungsdauer des Betriebsmittels (hier: Regler oder Kabel) wird der jährliche Free Cash Flow berechnet. Zusammen mit dem Barwertfaktor, welcher mit dem Diskontierungszinssatz bestimmt werden kann, wird der ebenso jährliche DCF bestimmt.

Als Entscheidungskriterium zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird die Summe der jährlichen DCFs (Gleichung (17)), zusammen mit einem Terminal Value (TV), zum Vergleich zwischen der Summe der DCFs für einen FLOW-R und dem konventionellen Netzausbau herangezogen.



$$\text{Summe } DCF = \sum_{t=1}^T DCF(t) + TV \quad (17)$$

Die Ergebnisse für die verschiedenen Regler-Varianten können der Tabelle 3.7 entnommen werden. Hierbei wurden den jeweiligen FLOW-R-Varianten, die realisierbaren Kabelstrecke bei konventionellem Netzausbau, welche den gleichen DCF erwirtschaften würden, gegenübergestellt. Somit liegen die realisierbaren Längen des konventionellen Netzausbaus, in Abhängigkeit der Ausstattung des Reglers, zwischen 440 m bis zu 600 m.

**Tabelle 3.7: Wirtschaftliche Bewertung FLOW-R**

FLOW-R			Konv. Netzausbau		
Variante Regler	Investition	Betriebskosten/Jahr	Variante	Investition	Länge
FLOW-R, 100 kVA, fixer Winkel, 3 Stufentrafos	22.210 €	48,00 €		49.720 €	440 m
FLOW-R, 150 kVA, fixer Winkel, 3 Stufentrafos	23.010 €	48,00 €	Kabeltyp	50.850 €	450 m
FLOW-R, 100 kVA, fixer Winkel, 4 Stufentrafos	24.210 €	48,00 €	NAYY 4x150	54.240 €	480 m
FLOW-R, 150 kVA, fixer Winkel, 4 Stufentrafos	25.010 €	48,00 €	(inkl. Tiefbau,	56.500 €	500 m
FLOW-R, 100 kVA, variabler Winkel (mit Zusatztrafo), 3 Stufentrafos	26.810 €	48,00 €	Verlegung,	59.890 €	530 m
FLOW-R, 150 kVA, variabler Winkel (mit Zusatztrafo), 3 Stufentrafos	28.010 €	48,00 €	Montage,	64.410 €	570 m
FLOW-R, 100 kVA, variabler Winkel (mit Zusatztrafo), 4 Stufentrafos	28.810 €	48,00 €	usw.)	65.540 €	580 m
FLOW-R, 150 kVA, variabler Winkel (mit Zusatztrafo), 4 Stufentrafos	30.010 €	48,00 €		67.800 €	600 m

### 3.9.3 Sonstige Bewertungskriterien

Neben einer reinen wirtschaftlichen und technischen Betrachtung müssen ebenso weitere Kriterien zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

- Der flexible Einsatz des Reglers ermöglicht eine einfache Standortänderung im Falle einer sich ändernden Versorgungsaufgabe, geplanter Anpassungen der Topologie oder erforderlicher Standortänderungen.
- Konventioneller Netzausbau ist häufig mit erheblichen Tiefbaumaßnahmen verbunden, welche eine Störung der Anwohner durch Baulärm oder des Verkehrsflusses zur Folge haben kann. Durch den Einsatz innovativer Betriebsmittel, wie dem FLOW-R, können diese Auswirkungen teilweise begrenzt oder völlig vermieden werden.

### 3.9.4 Volkswirtschaftliche Auswirkungen

Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen des Einsatzes von FLOW-R lassen sich nur schwer prognostizieren oder monetär beziffern. Jedoch führt der Einsatz des Reglers als Alternative zu einem kostenintensiven Netzausbau zu einer Reduzierung der Kosten der Netzbetreiber. Der zusätzlich erzielte Effekt zur Ertüchtigung der Netze zur weiteren Aufnahme von Einspeisern oder Lasten trägt zur Erfüllung der Ziele der Bundesregierung für eine sichere, umweltschonende und zuverlässige Energieversorgung aus erneuerbaren Energieträgern bei. Zusammen mit vielen weiteren Einzelmaßnahmen kann somit der Umbau der Energieversorgungsnetze gewährleistet werden. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen

liegen somit in der Reduzierung der Netzausbaukosten, der Förderung der erneuerbaren Erzeuger und damit verbundenen ökonomischen Effekten.

## 4 Verwertung

### 4.1 Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Im Rahmen der Projektdurchführung sind Kosten für Personal, Reisen und Material entstanden. Die detaillierten Aufstellungen der Kosten sind dabei den Verwendungsnachweisen der Partner zu entnehmen.

Die größten Kostenpositionen im Gesamtprojekt betreffen dabei

- den Personaleinsatz,
- den Prototypen-Aufbau,
- den Prüfstand-Aufbau,
- die Mess- und Kommunikationstechnik,
- die Installation des Reglers im Testnetz.

### 4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt war nur durch einen intensiven Personaleinsatz umzusetzen und war mit erheblichen technischen Risiken verbunden. Der hohe personelle Aufwand zur Entwicklung des Reglers sowie der Weiterentwicklung der BPL-Technik trug zur Bindung von Fachpersonal bei allen beteiligten Partnern bei. Zusätzlich erfolgten Investitionen in Mess- und Kommunikationstechnik sowie für die Produktion des Regler-Prototyps. Trotz umfassender Simulationsstudien barg die Realisierung des Reglers Risiken, die erst im Labor- und-, später im Feldtest ausgeräumt werden konnten. Ein möglicher Abbruch des Projektes aufgrund eines nicht erreichten Meilensteins hätte somit auch das Risiko eines obsolet gewordenen Prototyps und der überflüssigen Messtechnik im Testnetz mit sich geführt.

Sowohl der hohe Personal- als auch der beachtliche Materialaufwand haben eine Förderung erforderlich gemacht.

### 4.3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Alle Partner zogen einen hohen Nutzen aus den Ergebnissen des FLOW-R-Projektes.

Auf Seiten der PW konnten Erfahrungen zur kommunikativen Anbindung innovativer Netzregler gemacht werden. Weiterhin dient das Wissen zum internen und externen Erfahrungsaustausch über aktuelle Entwicklungen zu neuen Smart Grids – Technologien. Hierbei konnte eine hohe Aufmerksamkeit für das Unternehmen und seine Tätigkeitsfelder erzielt werden. Insbesondere im Hinblick auf neue Geschäftsfelder, auch im Zusammenhang mit Themen der Digitalisierung, Automatisierung oder Energiemanagement in Verteilnetzen, trägt das Wissen zur eigenen Positionierung bei.

Die PWN erhält durch den Regler die erste innovative Maßnahme zur Leistungsverschiebung in NS-Verteilnetzen. Diese kann als Alternative zum konventionellen Netzausbau angewendet werden. Weiterhin wurden Erkenntnisse aus der Messkampagne und den Feldtests gezogen. Der Einsatz der Messtechnik führte zu neuen Erkenntnissen bezüglich der Auslastung des Netzes. Ebenso konnte die Anwendung der BPL-Technik, welche auch im Hinblick auf einen späteren Smart Meter –Rollout von Interesse ist, im Netz erprobt werden.

Die TUK erweiterte das eigene Wissen bezüglich innovativer Smart Grids-Technologien, deren Simulation und dem Design realer, innovativer Betriebsmittel. Durch den Aufbau des Prüfstands und die Durchführung von Labortests konnten weitere Erfahrungen gesammelt werden. Der Prüfstand verbessert die Leistungsfähigkeit des Lehrstuhls und erhöht die Chancen bei einer Bewerbung um weitere Förder- und Industrieprojekte. Daneben konnte der Prüfstand erfolgreich in den Forschungs- und Lehrbetrieb der TU Kaiserslautern integriert werden. Neben Übungen für Studenten wird das Labor auch in Rahmen von Forschungs- und Studienarbeiten genutzt.

Bei PPC konnten im Projekt sehr wichtige Erkenntnisse insbesondere zur Nutzung von Routing-Algorithmen für die lokale Kommunikation innerhalb einer Netzzelle gewonnen werden. Diese Erkenntnisse werden zur Weiterentwicklung des BPL-Systems für netzdienliche Anwendungen eingesetzt, die nach der Umsetzung innerhalb des nächsten Jahres die Nutzbarkeit von BPL-Systemen für netzdienliche Anwendungen noch verbessern werden. Diese Maßnahmen werden die Akzeptanz und die Wirtschaftlichkeit des BPL-Systems weiter erhöhen.

Durch die Konzeption einer Sicherheitsarchitektur auf Basis der SMGW-Infrastruktur zur Netzsteuerung konnten bei PPC wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung bzw. Erweiterung der Technischen Richtlinie des BSI gewonnen werden, die in die entsprechenden Diskussionen eingebracht werden können.

WA konnte durch das Projekt die eigenen Fähigkeiten in Design, Planung und Konstruktion moderner Netzregler erweitern. Durch die Einbindung der BPL-Technik wurden neue Erfahrungen im Umgang mit dieser Technologie gemacht, die auch in anderen Geschäftsfeldern zum Einsatz gebracht werden können. Der entwickelte FLOW-R kann durch geringfügige Anpassungen zu einem neuen, marktreifen Produkt weiterentwickelt werden. Dieses stellt eine nennenswerte Erweiterung des Portfolios dar.

#### **4.4 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Insgesamt haben sich zum wissenschaftlichen und technischen Stand vor dem Projekt (siehe Abschnitt 1.5) wenige Fortschritte an anderen Stellen ergeben. Der FLOW-R als Applikation in vermaschten NS-Netzen zur Spannungs- und Wirkleistungsregelung ist z. Z. weltweit einzigartig.

Das Forschungsprojekt Verteilnetz 2020 ist aktuell noch nicht beendet [8]. Innerhalb dieses Forschungsprojekts wurde ein Prototyp eines Multifunktionaler Längsregler entwickelt. Dieser enthält jedoch keine Funktionen zur Anwendung im vermaschten NS-Netz. Unter Verwendung des in FLOW-R entwickelten Regelkonzepts wäre jedoch eine Anwendung denkbar.

#### 4.5 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden national und international sowohl auf Kongressen und Fachtagungen als auch in Fachzeitschriften und Journals veröffentlicht.

- Kongressteilnahmen:
  - CIRED 2016, 15.-18. Juni 2016 in Helsinki/Finnland  
“Development of a Phase Shifting Regulator for Power Flow Control in Low Voltage Grids”
  - IEEE PES General Meeting 2016, Boston/USA  
“Power Flow Control with Phase Shifting Regulators in meshed Distribution Grids”
  - VDE Kongress 2016, Mannheim  
„Entwicklung eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers für vermaschte Niederspannungsnetze”
  - ISGT 2017, Turin/Italien  
“Results of the Laboratory Tests of a novel Regulator for meshed Low-Voltage Networks”
  - FNN Fachkongress Netztechnik 2017
  - CIRED 2018, 7.-8. Juni, Ljubljana/Slowenien (geplant)  
“Fallback Solution for Low-Voltage Regulator Control using Artificial Neural Networks”
- Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Journals:
  - UNISPECTRUM 2016 der TU Kaiserslautern
  - Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 1/0218
  - UNISPECTRUM 1/2018 der TU Kaiserslautern
- Sonstige Beiträge
  - Beitrag im SWR Aktuell
  - Diverse Online-Magazine

## 5 Abkürzungsverzeichnis

BNetzA	Bundesnetzagentur
BPL	Breitband-Powerline
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CC	Common Criteria
CLS	Controlable Local System
CMTS	Cable Modem Termination System
DCF	Discounted Cash Flow
DB	Datenbaustein
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSL	Digital Subscriber Line-Technologie
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EBIT	Earnings before interests and taxes
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
FB	Funktionsbaustein
FC	Funktion
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service
HA	Hausanschluss
HS	Hochspannung
Hös	Höchstspannung
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
ISMS	Informationssicherheits-Managementsystem
IT	Informationstechnologie
KNN	Künstliches neuronales Netzwerk
KV	Kabelverteilerschrank
MC	Magnitude Control (Betragssteuerung)
MP	Messpunkt
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
OB	Organisationsbaustein
ONS	Ortsnetzstation
rONT	Regelbarer Ortsnetztransformator
SMGW	Smart Meter Gateway
SP	Stützpunkt

---

SPS	Speicher Programmierbare Steuerung
TLS	Transport Layer Security
TR	Technische Richtlinie
Tr	Transformator
TV	Terminal Value (=Endwert)
UMG	Universalmessgerät
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VPN	Virtual Private Network
WiStrg	Winkelsteuerung

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Projektplan.....	10
Abbildung 1.2: Elektronische Spannungsregler Funktionsschaltbild [6].....	12
Abbildung 1.3: Bauformen unterschiedlicher Spannungsregler: Links: ABB [6], Mitte: AEG PS [7], Rechts: Walcher.....	13
Abbildung 1.4: Schematische Topologie des Datenflusses bei aktuellem Stand der Technik .....	14
Abbildung 3.1 : Darstellung der Simulationsergebnisse im Excel-Tool.....	20
Abbildung 3.2: Kommunikationsnetz in Heuchelheim-Klingen.....	22
Abbildung 3.3: Übersicht der installierten BPL-Geräte im Netzplan.....	23
Abbildung 3.4: Netzplan des Testnetzes mit Darstellung der Messpunkte .....	24
Abbildung 3.5: Vereinfachte Ringstruktur mit unbestimmter Anzahl an Lasten .....	27
Abbildung 3.6 : Steuerstrom innerhalb eines NetZRings .....	28
Abbildung 3.7 : Schaltkreis zur Steuerspannungsbetragssteuerung.....	30
Abbildung 3.8 : Schaltkreis zur Winkelsteuerung.....	31
Abbildung 3.9: Erzeugung der Kennlinien mittels Stützpunkte (SP) .....	33
Abbildung 3.10: Anpassung der Kennlinien nach Erfassung aktualisierter Messwerte .....	34
Abbildung 3.11 : Schmatische Darstellung einer Sollwert-Regelung .....	34
Abbildung 3.12 : Grenzwertüberwachung an einem Messpunkt .....	35
Abbildung 3.13: Mehrfache Grenzwertverletzung.....	36
Abbildung 3.14 : Kombinierte Sollwert-Regelung mit Grenzwertüberwachung .....	36
Abbildung 3.15: Struktur des KNN .....	38
Abbildung 3.16: Schätzung der Stufenstellung durch das KNN .....	38
Abbildung 3.17: Test des KNN für die Spannungsbegrenzungsregelung .....	39
Abbildung 3.18: Platzierungsvarianten .....	40
Abbildung 3.19: Synthetisches Testnetz .....	45
Abbildung 3.20: Kalkulierte und simulierte Kennlinien für Ströme .....	46
Abbildung 3.21: Kalkulierte und simulierte Kennlinien für Spannungen .....	46
Abbildung 3.22: Reales NS-Testnetz mit relevanten Messpunkten .....	47



---

Abbildung 3.23: Exemplarische Soll- und Grenzwertregelung Strom .....	48
Abbildung 3.24: Prototyp eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers mit a) Stufentransformatoren, b) Relais-Matrix, c) Phasenschieber, d) Ansteuereinheit (Quelle: Walcher) .....	52
Abbildung 3.25: Netzmodell mit Impedanzen und Messpunkten .....	57
Abbildung 3.26: Schaltschränke mit Netznachbildung.....	57
Abbildung 3.27: Schematische Darstellung der Laststeuerung (links) sowie Aufbau einer Last auf Fahrwagen (rechts).....	58
Abbildung 3.28: Wechselrichter der Hersteller SMA und KACO mit jeweils 9kVA .....	58
Abbildung 3.29: DC-Quellen (oben) und Leitungsnachbildung (unten) .....	58
Abbildung 3.30 : PV-Nachbildung mit Stichleitungsmodell.....	59
Abbildung 3.31: Labor-Prüfstand mit PV-Simulator.....	59
Abbildung 3.32 : Netzmodell zur Überprüfung der Regler-Algorithmen .....	60
Abbildung 3.33: Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung.....	61
Abbildung 3.34: Strombetragsregelung bei asymmetrischer Belastung.....	61
Abbildung 3.35: Messergebnisse der kombinierten Strombetragsregelung und Grenzwertüberwachung.....	62
Abbildung 3.36: Messergebnisse der mehrfachen Grenzwertverletzung .....	62
Abbildung 3.37: Temperaturverlauf im Reglerschaltschrank bei Bemessungsleistung.....	63
Abbildung 3.38 : Übersicht der Thermographieaufnahmen .....	64
Abbildung 3.39: Montagephase des Reglers.....	65
Abbildung 3.40: FLOW-R nach abgeschlossener Installation .....	65
Abbildung 3.41 : Referenzmessung an MP 3135 (Spannung) und MP 3141 sowie MP 3134 (Strom)..	66
Abbildung 3.42: Sollwertregelung Strom an MP 3141 .....	67
Abbildung 3.43: Grenzwertüberwachung Strom an MP 3141 .....	67
Abbildung 3.44: Kombiniert Sollwertregelung und Grenzwertüberwachung Strom an MP 3141 und MP3134 .....	68
Abbildung 3.45: Sollwertregelung mit Grenzwertüberwachung Spannung .....	69
Abbildung 3.46: Schematische Darstellung des DCF-Verfahrens.....	72

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Übersicht der Arbeitspakete.....	8
Tabelle 1.2: Typische IKT für den flächigen Einsatz mit ihren zentralen Vermittlungsknoten .....	14
Tabelle 3.1 : Strukturmerkmale UP Bahnhofstraße .....	21
Tabelle 3.2 : Übersicht der Messdaten .....	25
Tabelle 3.3 : Auswahl häufige verwendeter Kabeltypen und deren Parameter .....	26
Tabelle 3.4: Kombinatorik zur Steuerspannungserzeugung .....	30
Tabelle 3.5: Kombinatorik zur Winkelansteuerung.....	31
Tabelle 3.6: Angaben zu den einstellbaren Winkelstufen.....	51
Tabelle 3.7: Wirtschaftliche Bewertung FLOW-R.....	73

## 8 Literatur

- [1] J. Büchner *et al.*, „Moderne Verteilernetze für Deutschland: Verteilernetzstudie“. im Auftrag des BMWi, Sep. 2014. [Online] Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/verteilernetzstudie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/verteilernetzstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Zugriff am: Mrz. 01 2018.
- [2] A. Agricola *et al.*, „dena - Verteilnetzstudie: Ausbau - und Innovationsbedarf der Strom - verteilnetze in Deutschland bis 2030“. Endbericht, Berlin, Dez. 2012. [Online] Verfügbar unter: [https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/esd/9100\\_dena-Verteilnetzstudie\\_Abschlussbericht.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9100_dena-Verteilnetzstudie_Abschlussbericht.pdf). Zugriff am: Mrz. 01 2018.
- [3] T. Ackermann *et al.*, „Verteilnetzstudie Rheinland-Pfalz“. Endbericht, Jan. 2014. [Online] Verfügbar unter: [https://mwkel.rlp.de/fileadmin/mwkel/Abteilung\\_6/Energie/Verteilnetzstudie\\_RLP.pdf](https://mwkel.rlp.de/fileadmin/mwkel/Abteilung_6/Energie/Verteilnetzstudie_RLP.pdf). Zugriff am: Mrz. 01 2017.
- [4] Siemens Power Transmission & Distribution, Inc., *Distribution Voltage Regulators*. Produktbroschüre. [Online] Verfügbar unter: <https://www.energy.siemens.com/us/pool/us/power-distribution/voltage-regulators/voltage-regulator-brochure.pdf>. Zugriff am: Mrz. 12 2018.
- [5] W. Kruschel, J. Costa, B. Sahan und P. Zacharias, „Dezentrale Spannungsregelung in intelligenten Niederspannungsnetzen - Leistungselektronische Komponenten zur Erhöhung der Aufnahmekapazität für erneuerbare Erzeugungseinheiten“ in *Tagungsband zum Internationalen ETG-Kongress // Internationaler ETG-Kongress 2011: Umsetzungskonzepte nachhaltiger Energiesysteme - Erzeugung, Netze, Verbrauch ; Vorträge des Internationalen ETG-Kongresses vom 8. - 9. November 2011 in Würzburg ; Fachtagungen 1 bis 5*, Würzburg, 2011.
- [6] M. Sadowski, „Aktive Spannungsregelung im elektrischen Verteilnetz“, Jun. 21 2012.
- [7] D. Fuhlbohm und K. Kauke, *Spannungsregler spart Ortsnetzausbau: Unzulässige Spannungserhebung sicher verhindern*. [Online] Verfügbar unter: [https://www.aegps.com/fileadmin/user\\_upload/MEDIA\\_PDFs\\_JPEGs/RES/Power\\_Controller/Thyrobox\\_VR/EWreport\\_2012-12\\_DE.pdf](https://www.aegps.com/fileadmin/user_upload/MEDIA_PDFs_JPEGs/RES/Power_Controller/Thyrobox_VR/EWreport_2012-12_DE.pdf). Zugriff am: Mrz. 12 2018.
- [8] Projektkonsortium Verteilnetz2020, *Verbesserung der Aufnahmefähigkeit und Sicherung der Netzqualität von Verteilnetzen*. Website. [Online] Verfügbar unter: <http://vn2020.emp-portal.de>. Zugriff am: Mrz. 12 2018.
- [9] M. Meyer, B. Maucher und R. Witzmann, „Verbesserung der Aufnahmefähigkeit und Sicherung der Netzqualität von Verteilnetzen“ in *EnInnov 2016: 14. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2016.
- [10] D. de Santis, G. Abbatantuono, S. Bruno, M. La Scala und R. Sbrizzai, „Feasibility of power flow control on LV distribution systems“ in *Proceedings of the 2014 International Conference on Advances in Engineering Mechanics and Materials*, Santorini Island, Greece, 2014.

- [11] S. Lang und W. H. Wellssow, „Development of a phase shifting regulator for power flow control in low voltage grids“ in *CIGRE Workshop 2016*, Helsinki, 2016.
- [12] S. Lang und W. H. Wellssow, „Power Flow Control with Phase Shifting Regulators in meshed Distribution Grids“ in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, 2016.
- [13] M. Nielsen, *Neural networks and deep learning*. Website. [Online] Verfügbar unter: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/>. Zugriff am: Mrz. 12 2018.
- [14] *Schutzprofil für die Kommunikationseinheit eines intelligenten 3 Messsystems für Stoff- und Energiemengen: BSI-CC-PP-0073*, 2014.
- [15] *Schutzprofil für das Sicherheitsmodul der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems für Stoff- und Energiemenge: BSI-CC-PP-0077-V2*, 2014.
- [16] *Technische Richtlinie BSI TR-03109*, 2015.
- [17] *IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1a Energiewirtschaftsgesetz*, 2015.
- [18] *Informationstechnik - Sicherheitsverfahren - Informationssicherheitsmanagementsysteme - Anforderungen*.
- [19] *BSI-Standard 100-2. IT-Grundschutz-Vorgehensweise*, 2008.
- [20] H.-J. Appelrath, P. Beenken, L. Bischofs und M. Uslar, Hg., *IT-Architekturentwicklung im Smart Grid: Perspektiven für eine sichere markt- und standardbasierte Integration erneuerbarer Energien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [21] *Informationstechnik - Sicherheitsverfahren - Leitfaden für Informationssicherheitsmaßnahmen*.
- [22] *Informationstechnik - Sicherheitsverfahren - Leitfaden für das Informationssicherheitsmanagement von Steuerungssystemen der Energieversorgung auf Grundlage der ISO/IEC 27002*.
- [23] H. Rui, *Target-oriented Planning for Electric Distribution Grids with Smart Grid Metrics*, 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2017.
- [24] S. Votruba, L. Krivanec, F. Broz und K. Prochazka, „Interconnected Low Voltage Grid, Grid for the future Smart Grids?“ in *23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIGRE)*, Lyon, 2015.
- [25] A. Murmann, *Topologische Schalthandlungen als Netzoptimierende Maßnahme*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/700-topologische-schalthandlungen-als-netzoptimierende-massnahme>. Zugriff am: Mrz. 12 2018.

