

Stefan Lang

### **Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers für vermaschte Niederspannungs- netze**

Band 6

# **Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungsreglers für vermaschte Niederspannungsnetze**

vom

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stefan Lang  
geb. in Idar-Oberstein

Tag der mündlichen Prüfung: 05. April 2019

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Görge

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson



Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und  
Energiemanagement

Band 6

**Stefan Lang**

**Konzeption eines Spannungs- und Wirkleistungs-  
reglers für vermaschte Niederspannungsnetze**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6696-8

ISSN 2366-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement (ESEM) an der Technischen Universität Kaiserslautern und wurde im Rahmen meiner anschließenden Beschäftigung bei der Pfalzwerke Aktiengesellschaft zu Ende geführt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow, für die Betreuung der Arbeit, die damit verbundenen hilfreichen Diskussionen, Anregungen und Hinweise. Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats sowie Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Görges für die Wahrnehmung des Vorsitzes der Prüfungskommission. Weiterhin danke ich meinen Kollegen am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement für die gute Zusammenarbeit, die regen und manchmal auch heiteren Diskussionen, welche die Arbeit in jeglicher Hinsicht erleichterten.

Sowohl die Idee als auch Teile des Inhalts dieser Arbeit basieren auf dem im Zeitraum Oktober 2014 bis September 2017 durchgeführten Forschungsprojekt *Flexibler Ortsnetz Spannungs- und Wirkleistungsregler (FLOW-R)*, welches am Lehrstuhl ESEM mit den Beteiligten der Firmen Pfalzwerke Netz AG, Pfalzwerke Aktiengesellschaft, Power Plus Communications AG und Walcher GmbH & Co. KG erfolgreich umgesetzt wurde. Die bemerkenswerten Ergebnisse des Projekts, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen, wären ohne das großartige Engagement der Projektpartner, aber auch vieler Studierender im Rahmen ihrer Forschungs- und Abschlussarbeiten, nicht möglich gewesen. Somit gilt mein besonderer Dank für die hervorragende und vertrauensvolle Zusammenarbeit all denen, die mit ihrem Einsatz den FLOW-R verwirklicht haben.

Meinen Eltern danke ich, dass sie mich stets gefördert und viele Wege geebnet haben, egal in welchen Lebenslagen. Nur dadurch konnte ich meine Ausbildung absolvieren und meinen Lebensweg, bis hin zu dieser Dissertation, beschreiten.

Zu guter Letzt bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner liebevollen Frau Claudia und unserer kleinen Tochter Marlene für das aufgebrachte Verständnis und den stets freigehaltenen Rücken während dieser arbeitsintensiven Zeit. Nur dadurch war es möglich, zusätzlich zu einer neuen Arbeitsstelle und der unbeschreiblich schönen Aufgabe als "Paapaaa", die Promotion erfolgreich zu Ende zu bringen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Herausforderungen für zukünftige Niederspannungsnetze . . . . .	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen Niederspannungsnetze</b>	<b>5</b>
2.1	Aufbau und Betriebsmittel von Niederspannungsnetzen . . . . .	5
2.1.1	Netztopologien . . . . .	5
2.1.2	Betriebsmittel . . . . .	7
2.1.2.1	Ortsnetzstation mit Transformator . . . . .	7
2.1.2.2	Kabel und Freileitung . . . . .	7
2.1.2.3	Kabelverteilerschränke . . . . .	10
2.1.2.4	Schutz . . . . .	10
2.1.3	Haushaltslasten . . . . .	12
2.1.4	Elektrofahrzeuge . . . . .	14
2.1.4.1	Bestand an Fahrzeugen . . . . .	14
2.1.4.2	Ladeinfrastruktur im Privatbereich . . . . .	14
2.1.5	Dezentrale Erzeugungsanlagen . . . . .	15
2.2	Grenzwerte für Niederspannungsnetze . . . . .	17
2.2.1	Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen . . . . .	17
2.2.2	Thermische Belastung von Leitungen und Kabeln . . . . .	19
2.2.2.1	Grenzen der zulässigen thermischen Belastbarkeit . . . . .	19
2.2.2.2	Bestimmung des thermischen Zeitverhaltens . . . . .	20
2.3	Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte . . . . .	22
2.3.1	Etablierte Maßnahmen . . . . .	22
2.3.2	Topologieänderung zur Einhaltung der Grenzwerte . . . . .	23
2.3.2.1	Topologieänderung zu Ringnetz oder vermaschtem Netz . . . . .	23
2.3.2.2	Inhomogene Netzauslastung . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Entwurf eines Reglers zur Spannungs- und Wirkleistungsregelung</b>	<b>25</b>
3.1	Konzept . . . . .	25

3.2	Optimale Steuerspannung zur Wirkleistungsregelung . . . . .	26
3.2.1	Ringnetz mit einer Last . . . . .	26
3.2.2	Ringnetz mit mehreren Lasten . . . . .	28
3.2.3	Ringnetze mit beliebiger Anzahl an Lasten . . . . .	30
3.2.4	Strombetragsregelung mittels Steuerspannung . . . . .	32
3.2.5	Netze mit vermaschter Topologie . . . . .	34
3.2.6	Spannungsregelung . . . . .	35
3.2.7	Leistungsregelung . . . . .	39
3.3	Automatische Bestimmung der Maschenimpedanz . . . . .	40
3.4	Schaltungsdesign des Reglers . . . . .	42
3.4.1	Grundlagen der Steuerspannungserzeugung . . . . .	42
3.4.2	Stufenweite und -anzahl . . . . .	45
3.4.3	Realisierung der Steuerspannungsbetragsstufen . . . . .	46
3.4.4	Realisierung der Steuerspannungswinkel . . . . .	48
3.4.5	Abweichung durch Winkel-Diskretisierung . . . . .	49
3.5	Verlustleistung bei Regler-Einsatz . . . . .	52
3.5.1	Verlustleistung des Reglers . . . . .	52
3.5.2	Netzverluste bei Regler-Einsatz . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Regelkonzepte mittels Kennlinienverfahren</b>	<b>55</b>
4.1	Analytisch bestimmbare Regelziele zur Strombetragsregelung in Ringnetzen . . . . .	55
4.2	Kennlinienverfahren für vermaschte Topologien . . . . .	57
4.2.1	Konzept . . . . .	57
4.2.2	Erzeugung von Kennlinien . . . . .	58
4.2.3	Kontinuierliche Anpassung der Kennlinie . . . . .	61
4.2.4	Regelkonzept zur Sollwertregelung . . . . .	62
4.2.5	Regelkonzept zur Grenzwertregelung an einem Messpunkt . . . . .	63
4.2.6	Regelkonzept zur Grenzwertregelung an mehreren Messpunkten . . . . .	64
4.2.7	Regelkonzept für kombinierte Soll- und Grenzwertregelung . . . . .	66
4.3	Implementierung der Regelkonzepte . . . . .	67
4.4	Messdatenerfassung und -übertragung . . . . .	69
4.4.1	Messdatenerfassung . . . . .	69
4.4.2	Messdatenübertragung . . . . .	70
4.5	Platzierungsstrategie für einen Spannungs- und Wirkleistungsregler . . . . .	71
4.5.1	Platzierungsvarianten . . . . .	71

---

4.5.2	Bauliche Anforderungen . . . . .	73
4.5.3	Platzierung der Messtechnik . . . . .	74
4.6	Dimensionierung und Parametrierung des Reglers . . . . .	74
4.6.1	Dimensionierung des Reglers . . . . .	74
4.6.2	Parametrierung der Regelkonzepte . . . . .	75
4.6.2.1	Sollwertregelung . . . . .	75
4.6.2.2	Grenzwertregelung an einem Messpunkt . . . . .	76
4.6.2.3	Grenzwertregelung an mehreren Messpunkten . . . . .	77
4.6.2.4	Kombinierte Soll- und Grenzwertregelung . . . . .	77
4.6.2.5	Kombinierte Spannungs- und Strom-Regelung . . . . .	77
4.7	Topologiefehlererkennung . . . . .	77
4.7.1	Grundlagen Topologiefehler . . . . .	77
4.7.2	Detektion mittels Maschenimpedanz-Auswertung . . . . .	78
4.7.2.1	Topologiefehlerindikator . . . . .	78
4.7.2.2	Simulation zur Topologiefehlererkennung . . . . .	78
4.7.3	Detektion mittels Messtechnik . . . . .	81
4.8	Rückfallebene für Kommunikationsunterbrechungen . . . . .	82
4.8.1	Auswirkungen fehlender Messdaten . . . . .	82
4.8.2	Konventionelle Rückfallebene . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Simulative Verifikation der Regelkonzepte</b> . . . . .	<b>85</b>
5.1	Grundlagen der simulativen Verifikation . . . . .	85
5.1.1	Simulationsprozess . . . . .	85
5.1.2	Struktur des synthetischen Testnetzes . . . . .	86
5.1.3	Struktur des realen Testnetzes . . . . .	86
5.1.4	Lastzeitreihen . . . . .	89
5.1.4.1	Haushalte und Photovoltaik . . . . .	89
5.1.4.2	Elektrofahrzeuge . . . . .	89
5.2	Verifikation des Steuerspannungsansatzes . . . . .	89
5.3	Verifikation der analytischen Regelziele . . . . .	90
5.3.1	Optimale Steuerspannung . . . . .	90
5.3.2	Diskrete Steuerspannung . . . . .	92
5.4	Verifikation des Kennlinien-Konzepts . . . . .	92
5.5	Verifikation der Regelkonzepte mittels Kennlinienverfahren . . . . .	95
5.5.1	Referenzwert-Simulation . . . . .	95

5.5.2	Sollwertregelung . . . . .	96
5.5.2.1	Stromsollwert . . . . .	96
5.5.2.2	Spannungssollwert . . . . .	97
5.5.3	Grenzwertregelung an einem Messpunkt . . . . .	97
5.5.3.1	Stromgrenzwert . . . . .	97
5.5.3.2	Spannungsgrenzwert . . . . .	98
5.5.4	Grenzwertregelung an mehreren Messpunkten . . . . .	100
5.5.5	Kombinierte Soll- und Grenzwertregelung . . . . .	100
5.5.5.1	Strom Soll- und Grenzwert . . . . .	100
5.5.5.2	Strom- und Spannungsgrenzwert . . . . .	101
5.6	Bewertung der Simulationsergebnisse . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Verifikation im Labor- und Feldtest</b>	<b>105</b>
6.1	FLOW-R-Prototyp . . . . .	105
6.2	Labortest . . . . .	106
6.2.1	Grundlagen des Labortests . . . . .	106
6.2.1.1	Testprozess . . . . .	106
6.2.1.2	Struktur des Labornetzmodells . . . . .	106
6.3	Verifikation der Regelkonzepte im Labortest . . . . .	108
6.3.1	Regelkonzepte zur Stromregelung . . . . .	108
6.3.1.1	Soll- und Grenzwertregelung . . . . .	108
6.3.1.2	Regler-Zeitverhalten . . . . .	109
6.3.1.3	Regelung asymmetrischer Ströme . . . . .	110
6.3.1.4	Grenzwertverletzung an mehreren Messpunkten . . . . .	111
6.3.1.5	Kombinierte Sollwert- und Grenzwertregelung . . . . .	112
6.3.2	Regelkonzepte zur Spannungsregelung . . . . .	113
6.3.2.1	Grenzwertregelung . . . . .	113
6.4	Feldtest . . . . .	115
6.4.1	Grundlagen des Feldtests . . . . .	115
6.4.2	Struktur des Testnetzes . . . . .	115
6.5	Verifikation der Regelkonzepte im Feldtest . . . . .	116
6.5.1	Referenzmessung . . . . .	116
6.5.2	Sollwertregelung . . . . .	117
6.5.3	Grenzwertregelung an einem Messpunkt . . . . .	118
6.5.4	Grenzwertregelung an mehreren Messpunkten . . . . .	118

---

6.5.5	Kombinierte Soll- und Grenzwertregelung . . . . .	119
6.5.5.1	Stromregelung . . . . .	119
6.5.5.2	Spannungsregelung . . . . .	120
6.5.6	Regelung mit reduzierter Transformator-Stufenanzahl . . . . .	121
6.6	Bewertung der Labor- und Feldtestergebnisse . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Betrieblicher Nutzen</b>	<b>125</b>
7.1	Gesichtspunkte zur Entscheidungsfindung . . . . .	125
7.2	Wirtschaftliche Bewertung . . . . .	126
7.2.1	Regulatorische Bewertung . . . . .	126
7.2.2	Finanzmathematische Bestimmung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	126
7.2.3	Vergleich eines SWRs mit konventionellem Netzausbau . . . . .	127
7.3	Technische Bewertung . . . . .	129
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>152</b>
<b>13</b>	<b>Verzeichnis der Variablen, Indizes und Symbole</b>	<b>155</b>
<b>14</b>	<b>English Summary</b>	<b>159</b>
<b>15</b>	<b>Anhang</b>	<b>163</b>
15.1	Prüfstand . . . . .	163
15.1.1	Topologie der Netznachbildung . . . . .	163
15.1.2	Leitungsnachbildung . . . . .	163
15.1.3	Integration in Schaltschränke . . . . .	165
15.1.4	Lastnachbildung . . . . .	165
15.1.5	PV-Nachbildung . . . . .	167
15.1.6	Mess- und Kommunikationstechnik . . . . .	169
15.2	Schaltkreise des Reglers . . . . .	170
15.3	Zeigerdiagramm . . . . .	172
15.4	Simulations- und Testnetze . . . . .	173

15.5 Kabeltypen . . . . .	176
15.6 Kosten Netzausbau . . . . .	177
<b>16 Lebenslauf</b>	<b>179</b>