

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund und Ziele der Arbeit . . . . .	1
1.2. Rahmenbedingungen und Forschungsstand . . . . .	3
1.3. Wissenschaftliche Fragestellung und Beitrag der Arbeit . . . . .	9
1.4. Methodische Vorgehensweise und Struktur der Arbeit . . . . .	10
<b>2. Analyse der Ausgangssituation</b>	<b>13</b>
2.1. Netzplanung und -betrieb . . . . .	13
2.1.1. Netzplanungsprozesse und -kriterien . . . . .	13
2.1.2. Potential und Herausforderungen des Betriebs vermaschter Netze . . . . .	15
2.2. Analyse der Netzautomatisierung auf Niederspannungsebene . . . . .	17
2.2.1. Regulatorische und technische Rahmenbedingungen . . . . .	17
2.2.2. Regelbare Aktoren auf Niederspannungsebene . . . . .	19
2.3. Analyse der Mess- und Kommunikationsinfrastruktur . . . . .	22
2.3.1. Intelligente-Messsysteme-Infrastruktur . . . . .	22
2.3.1.1. Smart Meter Rollout und Smart Meter Gateway . . . . .	22
2.3.1.2. Informationstechnik und Kommunikationstechnologien . . . . .	23
2.3.1.3. Steuerbox . . . . .	25
2.3.2. Datenanalyse und erzielbare Messzyklen . . . . .	26
2.3.3. Netzzustandsdaten und Datenschutzaspekte . . . . .	27
<b>3. System- und Modellkonzept</b>	<b>31</b>
3.1. Systemkonzept der vorgeschlagenen Lösung . . . . .	31
3.2. Spannungsabhängigkeit von Lasten im Modell . . . . .	34
3.3. Zugrundeliegende Modelle . . . . .	35
3.3.1. Netztopologie . . . . .	35
3.3.2. Aktoren . . . . .	36
3.4. Herleitung des Maschenstromregler-Modells . . . . .	38
<b>4. Eingangsgrößenbildner</b>	<b>41</b>
4.1. Vorgaben an das System . . . . .	41
4.1.1. Definition der Ein- und Ausgangsdaten . . . . .	41
4.1.2. Beobachtbarkeit des Systems und Anforderungen an Ersatzmesswerte . . . . .	42

4.2.	Datenaufbereitung . . . . .	43
4.2.1.	Plausibilisierung von rohen Messdaten . . . . .	43
4.2.2.	Zuweisung von Messfehler-Standardabweichungen . . . . .	44
4.3.	Verfahren zur Generierung von Ersatzmesswerten . . . . .	44
4.3.1.	Ersatzmesswerte für nicht-gemessene Spannungswerte . . . . .	44
4.3.2.	Ersatzmesswerte für nicht-gemessene Leistung von Lasten . . . . .	48
4.3.3.	Andere Ersatzmesswerte . . . . .	52
4.4.	Verfahren zur Schätzung und Plausibilisierung des Netzzustands . . . . .	53
4.4.1.	Spezifikation des gewählten Verfahrens zur Netzzustandsschätzung . . .	53
4.4.2.	Plausibilisierung des Netzzustands . . . . .	54
<b>5.</b>	<b>Regeleinrichtung</b> . . . . .	<b>57</b>
5.1.	Vorgaben an das System . . . . .	57
5.1.1.	Ein- und Ausgangsdaten der Regeleinrichtung . . . . .	57
5.1.2.	Anforderungen an die Regeleinrichtung und Regelstabilität . . . . .	57
5.2.	Verfahren zur Pseudo-Worst-Case-Prognose . . . . .	59
5.3.	Verfahren zur Dynamische-Grenzwert-Anpassung . . . . .	64
5.4.	Verfahren zur Korrektur des Netzzustands auf Basis weniger Echtzeitmesswerte	65
5.5.	Verfahren zur Stellgrößenoptimierung . . . . .	66
5.5.1.	Wahl der mathematischen Methode . . . . .	66
5.5.2.	Verzweigungsbaum-Schnitt-Heuristik . . . . .	68
5.5.2.1.	Schematik . . . . .	68
5.5.2.2.	Bilden des Verzweigungsbaums . . . . .	69
5.5.2.3.	Prozess der Lösungsfindung . . . . .	71
5.5.3.	Straftermfunktion . . . . .	76
5.5.4.	Beschneidung des Verzweigungsbaums . . . . .	79
5.5.5.	Parametrisierung . . . . .	81
<b>6.</b>	<b>Untersuchungsrahmen und Verifikation</b> . . . . .	<b>83</b>
6.1.	Untersuchungsmethodik und Definition von Bewertungsgrößen . . . . .	83
6.2.	Simulationsrahmen . . . . .	87
6.2.1.	Netzmodelle und Profile . . . . .	87
6.2.2.	Messszenarien . . . . .	91
6.2.3.	Übersicht Untersuchungsszenarien und kritische Betrachtung . . . . .	92

---

6.3. Untersuchung der Verfahren im Eingangsgrößenbildner . . . . .	95
6.3.1. Ersatzwertbildung und Netzzustandsschätzung . . . . .	95
6.3.2. Plausibilisierung des Netzzustands . . . . .	98
6.4. Untersuchung der Verfahren in der Regeleinrichtung . . . . .	100
6.4.1. Pseudo-Worst-Case-Prognose . . . . .	100
6.4.2. Netzzustands-Korrektur . . . . .	102
6.4.3. Stellgrößenoptimierung . . . . .	105
<b>7. Simulative Bewertung und Validierung</b> . . . . .	<b>111</b>
7.1. Systemsimulation . . . . .	111
7.2. Validierung des Systems im Laborversuch . . . . .	119
7.3. Validierung des Eingangsgrößenbildners im Feldversuch . . . . .	121
7.4. Bewertung der Regelstabilität . . . . .	123
<b>8. Diskussion und Schlussfolgerung</b> . . . . .	<b>125</b>
8.1. Kritische Betrachtung der Verfahren und Ergebnisse . . . . .	125
8.2. Ableiten von Erkenntnissen . . . . .	126
8.3. Ausblick . . . . .	127
<b>Quellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>129</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>141</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>143</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>144</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	<b>147</b>
<b>A. Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	<b>153</b>
A.1. Behandlung und Darstellung der Grundlagen . . . . .	153
A.2. Netzberechnungsverfahren . . . . .	153
A.2.1. Lastflussrechnung . . . . .	153
A.2.2. Optimierte Lastflussberechnung . . . . .	154
A.3. Netzzustandsschätzung . . . . .	155
A.4. Datengesteuerte Verfahren . . . . .	156
A.5. Graphentheorie . . . . .	157

<b>B. Weiterführende Daten und Abbildungen</b>	<b>158</b>
B.1. Netzmodelle . . . . .	158
B.2. Daten zu den generierten Profilen . . . . .	159
<b>C. Vision zum praktischen Einsatz der Ortsnetz-Automatisierung</b>	<b>163</b>
C.1. Definition spärliche Datenlage . . . . .	163
C.2. Steuerung über Steuerbox . . . . .	164
C.3. Umsetzung . . . . .	165
<b>Zusammenfassung</b>	<b>169</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>171</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>173</b>