

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit	4
2 Status Quo der Frequency Containment Reserve	7
2.1 Grundlagen	7
2.2 Frequency Containment Reserve mit Erneuerbaren Energien	12
2.3 Frequency Containment Reserve mit Batteriespeichern	16
2.4 Herausforderungen zukünftiger Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung	18
2.5 Forschungsfragen	31
3 Speicherdimensionierung zur Unterstützung eines Pools aus Erneuerbaren Energien	33
3.1 Generierung von Szenarien unter Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeiten	35
3.1.1 Datengrundlage der Untersuchungen	37
3.1.2 Untersuchung der zeitlichen stochastischen Abhängigkeiten	40
3.1.3 Modellierung der zeitlichen Abhängigkeiten mithilfe der Copula-Theorie	44
3.1.4 Erzeugungsszenarien unter Einbezug der räumlichen Abhängigkeiten	60
3.2 Speicherdimensionierung unter Einbezug der Szenarien	66
3.2.1 Szenarien des Ladestands	67
3.2.2 Dimensionierung der Speicherkapazität	69
3.2.3 Dimensionierung der Speicherleistung	73
3.2.4 Verfahren zur Validierung der berechneten Speichergroße	74
3.3 Exemplarische Anwendung der Speicherdimensionierung	78
3.3.1 Verwendete Anlagenpools	79
3.3.2 Validierung der Zuverlässigkeit der Erbringung	81
3.3.3 Speicherdimensionierung bei unterschiedlichen FCR-Geboten	82

4 Gebotserstellung für die Teilnahme am Frequency-Containment-Reserve-Markt	87
4.1 Poolsteuerung zur Maximierung der Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung	88
4.1.1 Erweiterte Poolsteuerung	89
4.1.2 Zuverlässigkeitssberechnung der Gebote eines Tages mit Hilfe des Szenariengenerators	95
4.2 Optimierung der Gebote eines Tages unter Einhaltung der geforderten Zuverlässigkeit	99
4.2.1 Herleitung eines geeigneten Optimierungsverfahrens	100
4.2.2 Optimierung mit dem Genetischen Algorithmus	104
4.3 Exemplarische Anwendung der Gebotsoptimierung	113
4.3.1 Validierung der Gebotsoptimierung	113
4.3.2 Einfluss der Produktzeitscheibenlänge	117
5 Fahrplanoptimierung und Steuerung eines Pools zur Erbringung der Frequency Containment Reserve	119
5.1 Optimierung des Pool-Fahrplans unter Einhaltung der Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung	120
5.1.1 Methodischer Ansatz	121
5.1.2 Mathematische Formulierung der Optimierung	131
5.2 Anlagensteuerung zur Erbringung der Frequency Containment Reserve	139
5.3 Exemplarische Anwendung der Poolsteuerung	145
5.3.1 Datengrundlage und Aufbau des Modells	146
5.3.2 Validierung der Zuverlässigkeit der Fahrplanoptimierung	149
5.3.3 Tagessimulation der Fahrplanoptimierung	151
5.3.4 Erbringung der FCR in einem kritischen Netzzustand	154
6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	161
7 Zusammenfassung und Ausblick	169
Literaturverzeichnis	175
Abkürzungen und Formelzeichen	187
Abbildungsverzeichnis	193
Tabellenverzeichnis	199
Anhang A Informationen zu den untersuchten Anlagenpools	201

Anhang B Zusätzliche Ausführungen zur Methode	206
B.1 Berechnung der möglichen Einspeisung der EEA für die Fahrplanoptimierung	206
B.2 Erweiterung der Zielfunktion der Fahrplanoptimierung	208