

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungen und Skripte	v
Symbole	xi
1 Einleitung	1
2 Herleitung der Fragestellung	3
2.1 Aktuelle Herausforderungen und Chancen	3
2.1.1 Entwicklung der Stromerzeugung	3
2.1.2 Europäische Integration der Regelleistungsmärkte	7
2.2 Stand der Forschung	13
2.3 Ziel der Arbeit	14
3 Analyse	17
3.1 Regelreserve – Regelleistung und Regelarbeit	17
3.1.1 Leistungsfrequenzregelung – Überblick	19
3.1.2 Bilanzkreissystem	20
3.1.3 Regelreservequalitäten – technische Anforderungen	21
3.1.4 Regelreserveprodukte und -märkte – ökonomische Anforderungen	23
3.1.5 Regelkonzept – Leistungsaustausch und Regelzonensaldo	25
3.1.6 Schlussfolgerung	27
3.2 Leistungsbilanzabweichungen	27
3.2.1 Überblick über Leistungsbilanzabweichungsursachen	27
3.2.2 Ungeplante Nichtverfügbarkeiten und Veränderung der Last	28
3.2.3 Deterministische Abweichungen – Fahrplanwechsel	32

3.2.4	Prognosefehler bei Einspeisungen aus erneuerbaren Energien	34
3.2.5	Ungeplante Nichtverfügbarkeit von Kraftwerken	41
3.2.6	Schlussfolgerung	42
3.3	Einsatz der Regelreserve in Europa	43
3.3.1	Vom Netzregelverbund zur International-Grid-Control-Cooperation	43
3.3.2	Imbalance-Netting, Reserve-Sharing und Reserve-Exchange	46
3.3.3	Netzengpasssituation und Grenzkupplstellen	48
3.3.4	Regionale Mindestvorhaltung	49
3.4	Dimensionierung von Regelreserve	50
3.4.1	Überblick	50
3.4.2	Aktuelle Vorgehensweisen	52
3.4.3	Studien- und Forschungsschwerpunkte	56
3.4.4	Anforderung an die zukünftige Dimensionierung von Regelreserve	58
3.5	Abgrenzung des zeitlichen und geografischen Betrachtungsbereichs	59
4	Verfahren und Mathematische Modellbildung	61
4.1	Methodischer Ablauf	61
4.2	Monte-Carlo-Simulation	63
4.2.1	Last-/Einspeisezeitreihen auf Basis einer europäischen Marktsimulation	63
4.2.2	Stochastisches Modell der EE-Prognosefehler	65
4.2.3	Stochastische Modelle der weiteren Ursachen von Leistungsbilanzungleichgewichten	67
4.2.4	Verfahrensablauf der Monte-Carlo-Simulation	70
4.2.5	Zeitreihen der Leistungsbilanzabweichungen	70
4.3	Bemessung der Regelreserve	71
4.3.1	Sicherheitsniveau und Produktdefinition	72
4.3.2	Aggregation der Bilanzfehler je LFC-Block	72
4.3.3	Aufteilung der Gesamtregelreserve auf a/mFRR	73
4.3.4	Regelreserve pro Produkt und je LFC-Block (100% Kernanteil)	74
4.4	Untersuchung des Kernanteils	74

4.4.1	Modell des europäischen Übertragungsnetzes	75
4.4.2	Modelle und Verfahrensablauf der Netzbetriebssimulation	75
4.4.3	Aufbau und Formulierung des Optimierungsproblems	77
4.4.4	Zeitreihe der benötigten Regelreserve je LFC-Block (Minimaler Kernanteil)	81
5	Exemplarische Untersuchungen	83
5.1	Parametrierung der Modelle und des Verfahrens	84
5.2	Backtesting für das Jahr 2015	85
5.3	Beschreibung des Untersuchungsprogramms	88
5.3.1	Allgemeine Annahmen und Eingangsdaten	88
5.3.2	Entwicklung der Stromerzeugung bis 2024	89
5.3.3	Entwicklung der Stromerzeugung bis 2050	91
5.4	Wechselwirkungen zwischen Verbrauch, EE-Anteil und Regelleistungsbedarf	93
5.4.1	Einfluss des Verbrauchs auf die Höhe des Regelleistungsbedarfs	93
5.4.2	Einfluss der Einspeisung aus WEA auf die Höhe des Regelleistungsbedarfs	94
5.4.3	Einfluss der Einspeisung aus PVA auf die Höhe des Regelleistungsbedarfs	96
5.4.4	Schlussfolgerung	97
5.5	Mehrwert der dynamischen Bemessung der Regelreserve	97
5.5.1	Szenario 2015 – Moderater EE-Anteil	98
5.5.2	Szenario 2024 – Erhöhter EE-Anteil	99
5.5.3	Schlussfolgerung	102
5.6	Berücksichtigung des INP bereits bei Dimensionierung der Regelreserve	103
5.6.1	Szenario 2015 – Moderater EE-Anteil	103
5.6.2	Szenario 2050 – Hoher EE-Anteil	104
5.6.3	Schlussfolgerung	106
5.7	Untersuchung der pauschalen Kernanteile für Regelreserve	107
5.8	Schlussfolgerung	109
6	Zusammenfassung	111
	Literaturverzeichnis	115

Abbildungsverzeichnis	135
Tabellenverzeichnis	139
Studentische Arbeiten	141
Veröffentlichungen	143
A Anhang	147
A.1 Weiterführende Grafiken	147
A.2 Allgemeine mathematische Modelle und Grundlagen	149
A.3 Bestimmung repräsentativer Netznutzungsfälle	154
A.4 Verteilung und Einspeisezeitreihen von EE-Anlagen	154
A.5 Ermittlung von Zeitreihen der regionalen Stromnachfrage	155
A.6 Europäische Marktsimulation zur Bestimmung von Last-/Einspeisesituationen	156