

Inhaltsverzeichnis

KurzfassungI

Abstract II

AbbildungsverzeichnisIX

Tabellenverzeichnis XVII

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und IndizesXIX

1 Einleitung 1

1.1 Hintergründe..... 1

1.2 Stand der Forschung und Motivation 5

1.2.1 Forschungsgebiet 1: Spannungsebenen übergreifende
Flexibilitätsmarktkonzepte 5

1.2.2 Forschungsgebiet 2: Aggregation von flexiblen Wirk- und
Blindleistungspotenzialen der Verteilnetzebene als Feasible Operation
Region..... 13

1.3 Definition der zentralen Forschungsfrage und grundlegende Annahmen..... 16

1.4 Definition der Forschungsziele und Gliederung der Arbeit 18

2 Flexibilisierung der Verteilnetzebene mit lokalen VNB-Flexibilitätsmärkten..... 21

2.1 Sicht der Bundesnetzagentur auf Flexibilitäten im Elektroenergiesystem und
lokale VNB-Flexibilitätsmärkte 21

2.1.1 Definition des von der Bundesnetzagentur verwendeten
Flexibilitätsbegriffs..... 22

2.1.2 Herausforderungen bei der Erschließung zukünftiger Flexibilitäten 25

2.1.3 Lokale VNB-Flexibilitätsmärkte als ein möglicher Ansatz zur
Erschließung zukünftiger Flexibilitäten 26

2.2 Evolution der Mechanismen zur Flexibilitätsbereitstellung hin zu lokalen
VNB-Flexibilitätsmärkten..... 27

2.2.1 Konventionelles Blindleistungsmanagement zur statischen
Spannungshaltung..... 28

2.2.2 Vor- und Nachteile lokaler Kennlinienverfahren zur statischen
Spannungshaltung..... 30

2.2.3 Vor- und Nachteile von Sollwertvorgaben des Verteilnetzbetreibers
zur bedarfsgerechten Blindleistungsbereitstellung 31

2.2.4 Vor- und Nachteile verteilter Netzregelungsstrategien auf Basis von
Multi-Agenten-Systemen zur statischen Spannungshaltung 33

2.2.5 Vor- und Nachteile lokaler Blindleistungsmärkte zur Neugestaltung
des Blindleistungsmanagements..... 35

2.3 Gestaltungsoptionen lokaler VNB-Flexibilitätsmärkte 36

2.3.1 Literaturüberblick und Einsatzgebiete lokaler
VNB-Flexibilitätsmarktkonzepte..... 36

2.3.2 Festlegung von Einsatzgebieten lokaler VNB-Flexibilitätsmärkte 38

2.3.3 Flexibilitäten und Flexibilitätsangebote an lokalen
VNB-Flexibilitätsmärkten 39

2.3.4 Allgemeines Funktionsprinzip lokaler VNB-Flexibilitätsmärkte..... 41

2.3.5 Mögliche Flexibilitätsmarktakteure und deren Aufgaben 42

2.3.6	Definition der Flexibilitätmarktregeln für lokale VNB-Flexibilitätsmärkte	45
2.3.7	Abgrenzung der in dieser Arbeit verwendeten Interpretation lokaler VNB-Flexibilitätsmärkte zu ähnlichen Begriffen in der Literatur	47
2.3.8	Zusammenfassung der Gestaltungsoptionen lokaler VNB-Flexibilitätsmärkte	48
3	Lokaler VNB-Flexibilitätsmarkt zum integrierten Wirk- und Blindleistungsmanagement	49
3.1	Definition der am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt gehandelten sowie netzeigenen Flexibilitäten und deren Einsatzgebiete	50
3.2	Netzmodellierung und Integration von Transformatorstufungen als flexibles Netzbetriebsmittel	53
3.2.1	Allgemeine Modellierung der Netzstrukturen	53
3.2.2	Beschreibung der Netztopologie und Aufbau der Knotenadmittanzmatrix	56
3.2.3	Integration von Transformatorstufenschaltern in die Knotenadmittanzmatrix	57
3.2.4	Kostenbewertung des Verteilnetzbetreibers für eine Transformatorstufung als äquivalenter Flexibilitätspreis	58
3.3	Erstellung von Flexibilitätsangeboten am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	58
3.3.1	Technische Eigenschaften der FBA	59
3.3.2	Flexibilitätspotenziale der FBA	59
3.3.3	Flexibilitätspreis des Flexibilitätsangebots einer FBA	65
3.3.4	Informationsgehalt und Struktur des Flexibilitätsangebots	69
3.4	Marktakteure und Aufgabenverteilung am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	72
3.4.1	Aufgaben und Interaktionen des Flexibilitätmarktbetreibers	73
3.4.2	Aufgaben und Interaktionen des VNB	74
3.4.3	Aufgaben und Interaktionen der Anlagenbetreiber und Aggregatoren	74
3.5	Koordinationsschema und zeitliche Abläufe am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	75
3.5.1	Teil 1 des Koordinationsschemas am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	76
3.5.2	Teil 2 des Koordinationsschemas am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	77
3.5.3	Zeitliche Abläufe am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	78
3.6	Adaption von Preisbildungsmechanismen zum integrierten Wirk- und Blindleistungsmanagement	80
3.7	Anonymisierung von Flexibilitätsangeboten durch den Flexibilitätmarktbetreiber	81
3.7.1	Zusammenfassen der Flexibilitätspotenziale je Netzknoten	81
3.7.2	Herausforderung bei der Berücksichtigung der individuellen Flexibilitätspreise der FBA im zusammengefassten Flexibilitätspolygon	84
3.7.3	Prämonetarisierung knotenscharfer Flexibilitätsangebote	85
3.8	Auswahl bedarfsgerechter Flexibilitätsangebote durch den VNB	92
3.8.1	Integration der Flexibilitätspotenziale der FBA in die Leistungsflussberechnung nach dem Newton-Raphson Verfahren	92

3.8.2	Beschreibung der Betriebsführungsplanung des VNB als adaptierter OPF	96
3.9	Erzeugung des lokalen Flexibilitätsergebnisses.....	99
4	Globaler ÜNB-Flexibilitätsmarkt unter Ausnutzung vertikaler Netzbetreiberinteraktionen	100
4.1	Definition der am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt gehandelten sowie übertragungsnetz eigenen Flexibilitäten und deren Einsatzgebiete	100
4.2	Marktakteure und Aufgabenverteilung am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	102
4.2.1	Aufgaben und Interaktionen des globalen Flexibilitätmarktbetreibers ..	102
4.2.2	Aufgaben und Interaktionen des VNB am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	103
4.2.3	Aufgaben und Interaktionen des ÜNB	103
4.2.4	Definition der Angebotsstruktur als gemeinsame Aufgabe des globalen Flexibilitätmarktbetreibers und des ÜNB	104
4.3	Koordinationsschema und zeitliche Abläufe am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt unter Ausnutzung vertikaler Netzbetreiberkooperationen	105
4.3.1	Koordinationsschema Teil 1 am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	105
4.3.2	Koordinationsschema Teil 2 am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	106
4.3.3	Zeitliche Abläufe bei der Kopplung der Flexibilitätsebenen in Bezug auf das Koordinationsschema am lokalen VNB- und globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	108
4.4	Anforderungen an die Aggregation verteilter Flexibilitätangebote als FOR.....	110
5	Aggregationsmethoden zur Bestimmung der FOR	111
5.1	Einführung der FOR als PQ-Flexibilitätspolygon.....	112
5.1.1	Eigenschaften der FOR als PQ-Flexibilitätspolygon.....	113
5.1.2	Einfluss des lokalen VNB-Flexibilitätsgeschehens und vertikaler Netzbetreiberinteraktionen auf die FOR	114
5.1.3	Erhöhung des Informationsgehalts der FOR als Flexibilitätsangebot der Verteilnetzebene am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	116
5.2	Stochastische Aggregationsmethoden.....	119
5.2.1	Bildung von Zufallsszenarien und virtuelle Aggregation der FBA Flexibilitäten	119
5.2.2	Bewertung der Zufallsszenarien über Leistungsflussberechnungen und Bestimmung der FOR.....	123
5.2.3	Literaturauswertung zu stochastischen Aggregationsmethoden.....	125
5.3	Optimierungsbasierte Aggregationsmethoden	128
5.3.1	Definition der Zielfunktion zur Bestimmung der FOR	128
5.3.2	Abtaststrategien zur Bestimmung des FOR-Randes	128
5.3.3	Formulierung der FOR-Bestimmung als nichtlineares Optimierungsproblem.....	134
5.3.4	Alternative Formulierungen der FOR-Bestimmung als Optimierungsproblem.....	137
5.3.5	Literaturauswertung zu optimierungsbasierten Aggregationsmethoden ...	141
5.4	Bestimmung einer multidimensionalen FOR	146

5.4.1	Erhöhung des Informationsgehalts der FOR durch zusätzliche Aggregationsdurchläufe in parallelen, äußeren Iterationsschleifen	146
5.4.2	Bestimmung der Kostenstruktur der FOR	148
5.5	Bewertung stochastischer und optimierungsbasierter Aggregationsmethoden.....	151
6	Partikelschwarmbasierte Aggregation zur Bestimmung der multidimensionalen FOR.....	153
6.1	Grundprinzip und Algorithmus der klassischen PSO	155
6.1.1	Iterative Abtastung des zulässigen Lösungsraums durch den Partikelschwarm	155
6.1.2	Abbruchbedingungen der PSO	157
6.1.3	Programmprozessschema der PSO.....	158
6.1.4	Optionen zur Parametrisierung der PSO	159
6.2	Erweiterung der klassischen PSO als Bestandteil einer optimierungsbasierten Aggregationsmethode.....	160
6.2.1	Initialisierung des Partikelschwarms in beliebigen Polygonen	161
6.2.2	Integration von Nebenbedingungen auf Basis technischer Netzrestriktionen	163
6.2.3	Erweiterung des Begrenzungsoperators für beliebige Polygone	164
6.2.4	Geschwindigkeitsregulierung des Partikelschwarms in beliebigen Polygonen	167
6.2.5	Rückführung von unbestraften Schwarmpartikeln	174
6.2.6	Programmprozessschema der erweiterten PSO	175
6.2.7	Verfahrensinhärente Eigenschaften der erweiterten PSO	177
6.3	Plausibilisierung und Bewertung der erweiterten PSO im Vergleich mit bestehenden Aggregationsmethoden.....	178
6.3.1	Definition des Plausibilisierungsszenarios	178
6.3.2	Parametrisierung und Konvergenzverhalten der erweiterten PSO	181
6.3.3	Metrik zur Bewertung der Aggregationsmethoden	183
6.3.4	Simulationsumgebungen für den Vergleich der Aggregationsmethoden.....	185
6.3.5	Vergleich der Aggregationsmethoden zur Plausibilisierung der PSO.....	189
6.4	Bildung eines Flexibilitätsangebots der Verteilnetzebene am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt mithilfe der PSO-basierten Aggregationsmethode	192
6.4.1	Definition des Untersuchungsszenarios für den lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	193
6.4.2	Flexibilitätpotenzial des Verteilnetzgebiets bei Nennspannung an der vertikalen Systemschnittstelle	195
6.4.3	Bestimmung der Kostenstruktur der FOR als Bestandteil des Flexibilitätsangebots der Verteilnetzebene am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	203
6.4.4	Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Last- und Erzeugungsprognose.....	210
6.4.5	Einfluss von Spannungsvariationen an der vertikalen Systemschnittstelle auf das Flexibilitätpotenzial der Verteilnetzebene .	213

6.4.6	Einfluss ausgewählter Parameter der PSO auf die Ergebnissgüte und die Rechenzeit bei der FOR-Bestimmung.....	215
6.4.7	Bestimmung der multidimensionalen FOR als Flexibilitätsangebot der Verteilnetzebene am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	218
7	Flexibilitätsaggregation und -distribution am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	222
7.1	Vergleich der Kostenstruktur der FOR mit der kostenoptimalen Distribution eines ÜNB-Flexibilitätsbedarfs am lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	223
7.2	Technisch und wirtschaftlich optimale Betriebsführung des VNB.....	228
7.3	Gestaltungsmöglichkeiten zur Kostenaufteilung bei der ÜNB/VNB-Kooperation bei einer Flexibilitätsbereitstellung aus der Verteilnetzebene.....	233
7.3.1	Kostenaufteilung im wirtschaftlichen Interesse des ÜNB.....	233
7.3.2	Kostenaufteilung im wirtschaftlichen Interesse des VNB als Anreiz zur ÜNB/VNB-Kooperation.....	236
7.4	Einfluss des lokalen VNB-Flexibilitätsmarktgeschehens und der Kostenaufteilung zwischen den Netzbetreibern auf die ÜNB/VNB-Kooperation.....	237
8	Spezifikation des Flexibilitätsbedarfs am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	241
8.1	Technisch und wirtschaftlich optimale Betriebsführung des ÜNB.....	241
8.2	Erweiterung der PSO zur Berücksichtigung der monetarisierten PQ(U)-FOR.....	243
8.2.1	Integration der PQ(U)-FOR als Nebenbedingung der Optimierungsvariablen in die PSO.....	244
8.2.2	Integration der Kostenstruktur der FOR zur Bestimmung der Zielfunktionsterme.....	249
8.3	Erprobung und Bewertung der PSO-basierten Spezifikationsmethode	254
8.3.1	Definition des Untersuchungsszenarios für den globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	254
8.3.2	Spezifikation des Flexibilitätsbedarfs aus der Verteilnetzebene	256
8.4	Einordnung der Ergebnisse im Kontext des technoökonomischen Gesamtprozesses einer flexibilitätsmarktbasierten ÜNB/VNB-Kooperation	259
9	Zusammenfassung	264
10	Ausblick	270
10.1	Gestaltung, Erprobung und Vergleich erweiterter oder alternativer lokaler VNB- und globaler ÜNB-Flexibilitätsmarktkonzepte	270
10.2	Untersuchung erweiterter Netz- und Flexibilitätsmarktszenarien.....	271
10.3	Weiterentwicklung der Aggregations-, Spezifikations- und Distributionsmethode mit dem Fokus auf PSO-basierte Ansätze	271
10.4	Weiterführende Ausnutzung der PSO-generierten Metadaten.....	273
10.5	Spannungsebenen übergreifende Erweiterung der flexibilitätsmarktbasierten Netzbetreiberkooperation.....	274
11	Literaturverzeichnis	275
12	Anhang.....	299
12.1	Definitionen des Flexibilitätsbegriffs in Bezug auf das Elektroenergiesystem	299
12.2	Bestimmung der Elemente in der T-Ersatzschaltung von Transformatoren	300
12.3	Punkt-In-Polygon-Test nach Jordan.....	301

12.4	Veranschaulichung der Monetarisierung knotenscharf zusammengefasster Flexibilitätspolygone	301
12.5	Bildung der Jacobi-Matrix und Bestimmung von Startwerten	302
12.6	Alternativen für die Beschreibung von aggregierten Flexibilitätspotenzialen	304
12.6.1	Zulässiger Betriebsrahmen	304
12.6.2	Energiespeicheräquivalent	304
12.6.3	Zulässige Last-Sets	305
12.6.4	Flexibilitätsrahmen	305
12.6.5	Eignung der Ansätze hinsichtlich der Flexibilitätsaggregation	305
12.7	Optimierungsprobleme in ihrer allgemeinen Form	306
12.7.1	Nichtlineares Optimierungsproblem	306
12.7.2	Lineares Optimierungsproblem	306
12.8	Visualisierung und Plausibilisierung der klassischen PSO am Beispiel der fünften De Jong Funktion	307
12.9	Bestimmung des Bestrafungskoeffizienten	309
12.10	Skalierung der Flexibilitätspolygone zur Geschwindigkeitsbegrenzung des Partikelschwarms	309
12.11	Netz- und Betriebspunktdata für den lokalen VNB-Flexibilitätsmarkt	311
12.12	Weiterführende Informationen und Analysen des Untersuchungsszenarios	312
12.12.1	Kostenfaktoren im Untersuchungsszenario	312
12.12.2	Initialisierung und Konvergenzverhalten des Partikelschwarms	313
12.12.3	Bildung der Kostenstruktur der FOR auf Basis des Schwarmgedächtnisses	316
12.12.4	Kostenstrukturen im Untersuchungsszenario	317
12.13	Nachteile einer vollständig einheitlichen Angebotsstruktur von FBA und Verteilnetzen am globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	319
12.14	Netz- und Betriebspunktdata für den globalen ÜNB-Flexibilitätsmarkt	321
12.15	Erweiterungen Netz- und Flexibilitätsmarktszenarios	322
12.16	Multi-Level Flexibilitätsmarktkonzept	323
Lebenslauf		324
Wissenschaftlicher Werdegang		325