Sebastian Lehnhoff

Dezentrales vernetztes Energiemanagement

VIEWEG+TEUBNER RESEARCH

Sebastian Lehnhoff

Dezentrales vernetztes Energiemanagement

Ein Ansatz auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems

VIEWEG+TEUBNER RESEARCH

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.

Dissertation der Technischen Universität Dortmund, 2009,
u.d.T. „Sebastian Lehnhoff: Dezentrale vernetzte Energiebewirtschaftung auf Basis eines verteilten adaptiven Realzeit-Multiagentensystems (DEZENT)“

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Ute Wrasmann | Britta Göhrisch-Radmacher

Vieweg+Teubner Verlag ist ist eine Marke von Springer Fachmedien.
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1270-4

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Betriebssysteme und Rechnerarchitektur der Fakultät für Informatik an der Technischen Universität Dortmund in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. Horst F. Wedde für seine Unterstützung und wertvollen Anregungen während der Entstehung dieser Arbeit. Ich danke ihm an dieser Stelle besonders herzlich für die Möglichkeit, mich an seinem Lehrstuhl mit interessanten und anspruchsvollen wissenschaftlichen Projekten – ganz besonders auf dem Gebiet der vorliegenden Arbeit – befassen zu können.

Bei Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz bedanke ich mich sehr herzlich für die Kooperation und wertvolle Zusammenarbeit seines Lehrstuhls mit dem Lehrstuhl für Betriebssysteme und Rechnerarchitektur im DEZENT-Projekt und darüber hinaus. Für die die Erstellung des Zweitgutachtens bedanke ich mich herzlich.

Den Mitgliedern der Prüfungskommission Prof. Dr. Heiko Krumm und Dr. Ingo Battenfeld danke ich für ihre Bereitschaft zur Mitwirkung in der Kommission und dem damit verbundenen persönlichen Einsatz.

Meinen ehemaligen und derzeitigen Kollegen sowie den Studierenden und Projektpartnern bin ich tief verbunden für die Unterstützung und wertvollen kritischen Kommentare.

Im Besonderen danke ich meinem Kollegen und Projektpartner Olav Krause für seine unschätzbaren Beiträge aus der Perspektive eines hervorragenden Elektrotechnikers, der in der Lage war, einem Informatiker die theoretischen Hintergründe der elektrischen Energieversorgung anschaulich zu vermitteln. Ohne ihn wäre die Arbeit in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihre Geduld und ihre Unterstützung. Besonders möchte ich meinem Onkel Reinhard Schippkus danken, der diese Arbeit in unterschiedlichen Phasen als fachfremder Leser mit unendlicher Geduld lektoriert hat. Meinen Mitbewohnern Angelika, Sarah und Eddie möchte ich danken für ihre Geduld, besonders während der Schlussphase dieser Arbeit. Bei Jürgen, Ute und Lina bedanke ich mich für ihre Unterstützung und den großen Zuspruch. Meinen Freunden Stefan, Claudia, Ubald, Michael und Silke danke ich

für ihre Geduld, Rücksichtnahme und aufmunternden Worte in den letzten drei Jahren und darüber hinaus.

Sebastian Lehnhoff

Zusammenfassung

Ziel von DEZENT, einem interdisziplinären F&E-Gemeinschaftsprojekt der Fakultät für Informatik und der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Dortmund, ist die Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems, mit dem sich eine Vielzahl dezentraler und teilweise regenerativer (stochastischer) Energieumwandlungsanlagen unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Randbedingungen zu regionalen Bilanzkreisen zusammenschließen und in das europäische Versorgungs- und Verbundnetz integrieren lassen. Die auf diese Art und Weise dezentral verwaltete Leistung soll sowohl der allgemeinen Versorgung als auch Verstetigung stochastischer Einspeiser durch ihren koordinierten Einsatz zur Verfügung stehen. Das Management des dezentral organisierten elektrischen Energieversorgungssystems wird durch ein verteiltes adaptives sicherheitskritisches Realzeit-Multiagentensystem realisiert. Dabei werden die konfligierenden Zielanforderungen der unterschiedlichen Akteure in einem liberalisierten Energieversorgungssystem je nach Erzeugungs- bzw. Bedarfsprofilen (sowohl Regel- als auch Versorgungsleistung) angepasst und in ein stabiles Gesamtsystem integriert. Die integrierten Verhandlungen unterschiedlicher Verbraucher- und Erzeugerbedürfnisse unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen erfolgen dabei in Betriebszyklen von 500 ms. Das Ziel ist eine bedarfsorientierte Energieversorgung, in der Leitungsverluste minimiert und vorhandene Effizienzpotentiale durch eine dezentrale Organisation stärker genutzt werden. Es wird gezeigt, dass die verteilte Kontrolle einer Vielzahl kooperierender heterogener Systeme für einen stabilen Betrieb hinsichtlich der Befriedigung aller beteiligten Akteure sowie der Bereitstellung notwendiger Reserveleistung unter Einhaltung der strikten Zeitanforderungen möglich ist und günstiger sein kann als bei derzeitiger zentral geführter Versorgung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen **XI**

Tabellenverzeichnis **XIII**

Abbildungsverzeichnis **XV**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Verwandte Arbeiten 8
1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit 13

2 Das europäische Energieversorgungssystem **17**
2.1 Stand der Technik 17
2.2 Energiewirtschaftliche Entwicklung 30
2.3 Herausforderungen an eine verteilte Regelung dezentraler Energieumwandlungsanlagen 34

3 Verteilte Verhandlungen in einem dezentralen Agentensystem **37**
3.1 Agentenmodell 38
3.2 Verhandlungsarchitektur 41
3.3 Preisbildung 45
3.4 Anpassen von Geboten und Angeboten 49
3.5 Modellsimulationen zum Einfluss der *similarity* und der Preisrahmengröße 67
3.6 Kommunikation über Ticket Distributoren 71
3.7 Komplexität und Skalierbarkeit des Verhandlungsalgorithmus . . . 73

4 Dezentrales Netzmanagement **87**
4.1 Bedingte Konsumenten/Produzenten 88
4.2 Peak Demand and Supply Management in DEZENT 97
4.3 Virtuelle Konsumenten/Produzenten 111

4.4 Komplexität und Skalierbarkeit des erweiterten Verhandlungsalgorithmus 123

5 Verteiltes Lernen 129
5.1 Reinforcement Learning 130
5.2 Kooperatives Lernen in DEZENT 131
5.3 Modellsimulation des DECOLEARN-Algorithmus 137
5.4 Komplexität und Skalierbarkeit von DECOLEARN 143

6 Experimentelle Untersuchungen 145
6.1 Qualitätsmerkmale und Systemparameter in DEZENT 148
6.2 Experimentelle Vorgehensweise 149
6.3 Erzeugen einer Klasse realitätsnaher Konfigurationen 153
6.4 Aufbau des experimentellen Beispielnetzes 159
6.5 Experimentelle Untersuchung von DEZENT ohne Peak Management 166
6.6 Experimentelle Untersuchung von DEZENT mit Peak Management 185
6.7 Zusammenfassung der fallstudienhaften Untersuchung 199

7 Dezentrale Betriebsführung 205
7.1 Leitungsüberlastungen durch veränderte Versorgungskonfigurationen 207
7.2 Spannungsprofil in einem strahlenförmigen Netz 210
7.3 Herkömmliche Verfahren zur Bewertung von Betriebszuständen . 213
7.4 Stable State Recognition 216

8 Fazit und Ausblick 241
8.1 Fazit 241
8.2 Ausblick 244

A Anhang 249
A.1 Lastgangkurven Einzelhaushalte 249
A.2 Lastgangkurve Photovoltaik 252
A.3 Lastgangkurve Windkraft 253

Literaturverzeichnis 255

Abkürzungen

AGT	**A**llgemeine **G**leichgewichts**t**heorie
AS	**A**ncillary **S**ervices
BGM	**B**alancing **G**roup **M**anager
BHKW	**B**lock**h**eiz**k**raft**w**erk
BMWi	**B**undes**m**inisterium für **Wi**rtschaft und Energie
DEA	**D**ezentrale **E**nergieumwandlungs**a**nlage
DFG	**D**eutsche **F**orschungs**g**emeinschaft
DECOLEARN	**DE**ZENT **Co**llaborative **Learn**ing
DSM	**D**emand **S**ide **M**anagement
EEG	**E**rneuerbare **E**nergien **G**esetz
EnWG	**En**ergie**w**irtschafts**g**esetz
EV	**E**nergie**v**ersorger
EVU	**E**nergie**v**ersorgungs**u**nternehmen
HGÜ	**H**ochspannungs-**G**leichstrom-**Ü**bertragung
KWK	**K**raft-**W**ärme-**K**opplung
LP	**L**ineares **P**rogramm
MAS	**M**ulti**a**genten**s**ystem
NR	**N**ewton-**R**aphson (-Verfahren)
PV	**P**hoto**v**oltaik
PFSP	**P**ermutation **F**low-Shop **S**cheduling **P**roblem
REA	**R**egenerative **E**nergieumwandlungs**a**nlage
SSR	**S**table **S**tate **R**ecognition
TD	**T**icket **D**istributor
UCTE	**U**nion for the **C**oordination of **T**ransmission of **E**lectricity
ÜNB	**Ü**bertragungs**n**etz**b**etreiber
V2G	**V**ehicle **2** **G**rid
VK	**V**irtuelles **K**raftwerk
VDN	**V**erband **d**er **N**etzbetreiber
WEA	**W**ind**e**nergie**a**nlage

Tabellenverzeichnis

2.1 5-Stufen-Plan zum frequenzabhängigen Lastabwurf in Deutschland 28

3.1 Beispielhafte Preisentwicklung mit Preisauf- und -abschlägen . . . 58
3.2 Experimentelles Setup für die Laufzeitanalyse 67
3.3 Experimentelles Setup für preisbasierte Experimente 69
3.4 Das Informationsticket 72
3.5 Das Informationsticket 84

4.1 Batterieeigenschaften von Elektrofahrzeugen (Herstellerangaben) 95
4.2 Parameterbelegungen für Bedingte Konsumenten/Produzenten . . 97
4.3 Setup der Modellsimulationen zum allgemeinen Einfluss der identifizierten Parameter 102
4.4 Parametrierung und Gerätemengen des realistischen Szenarios . . 109
4.5 Ergebnisse des realistischen Szenarios für unterschiedliche Gerätekombinationen 110
4.6 Beispielverlauf des Newton-Raphson-Verfahrens 114
4.7 Gegebene und gesuchte Werte der einzelnen Knotenarten 116
4.8 Beispielwerte für eine Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens 119
4.9 Errechnete Werte für eine Lastflussberechnung 123

5.1 Experimentelles Setup für die Modellsimulationen 138

6.1 Modellparameter und beeinflusste Qualitätsmerkmale 149
6.2 Parameterbereiche der internen Modellparameter (Preisbildung) . 154
6.3 Parameterbereiche der internen Modellparameter (Peak Management) 154
6.4 Parameterbereiche der internen Modellparameter (DECOLEARN) . 155
6.5 Untere Schranken für s_{1C}, t_{1P} zur Vermeidung von Excessive Bargaining 158
6.6 Eckdaten der verwendeten Lastgangkurven 162
6.7 Betrachtete Simulationszeiträume und Konfigurationen von DECOLEARN 168

6.8 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_1 ohne Peak Management 169
6.9 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_2 ohne Peak Management 172
6.10 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_3 ohne Peak Management 176
6.11 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_4 ohne Peak Management 179
6.12 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_5 ohne Peak Management 182
6.13 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_1 mit Peak Management im Vergleich zu T_1 ohne Peak Management 188
6.14 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_2 mit Peak Management im Vergleich zu T_2 ohne Peak Management 191
6.15 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_3 mit Peak Management im Vergleich zu T_3 ohne Peak Management 193
6.16 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_4 mit Peak Management im Vergleich zu T_4 ohne Peak Management 195
6.17 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_5 mit Peak Management im Vergleich zu T_5 ohne Peak Management 197
6.18 Zusammengefasste Ergebnisse für den Beobachtungszeitraum T_6 mit Peak Management im Vergleich zu T_6 ohne Peak Management 199
6.19 Hochrechnung für bilanzierte Energiepreise bei unterschiedlichen Überdeckungsraten 204

7.1 Obere Schranke für die Anzahl an Facetten 231
7.2 Gefundene Anzahl an Facetten 231
7.3 Koeffizienten für die durchschnittliche Anzahl an Facetten 231
7.4 Gefundene und erwartete Anzahl an Facetten 232
7.5 Rechenzeit für die Hüllenberechnung 232
7.6 Aufwandsabschätzung für die Parallelisierung des Verfahrens . . . 239

Abbildungsverzeichnis

1.1 Lebenszyklen und Verbrauch von Energieträgern 1
1.2 Entwicklung bei der Förderung von fossilen Energieträgern 2
1.3 Virtuelles Kraftwerk 9
1.4 Notwendige Prozesse innerhalb eines Betriebsintervalls 15

2.1 Aufbau des elektrischen Energieversorgungsnetzes 19
2.2 Regelzonen deutscher Übertragungsnetzbetreiber 21
2.3 Idealisierter Transformator mit eingezeichnetem magnetischen Fluss durch den Eisenkern 22
2.4 Einordnung von Grund-, Mittel- und Spitzenlast in die Netzbelastung 25
2.5 Regelenergiephasen 30
2.6 Stochastische Last- und Versorgungsprofile 33

3.1 Kommunikationsprozess innerhalb des DEZENT-Betriebsintervalls 37
3.2 Orientierung des Agentenmodells an der vorhandenen elektrischen Versorgungsstruktur 38
3.3 Versorgungsstruktur des elektrischen Netzes 39
3.4 Agententopologie in DEZENT 40
3.5 Unterschiedliche Aufgabenbereiche des Agentensystems 42
3.6 Ablauf der Betriebsführung in DEZENT 42
3.7 Verhandlungsperioden, -zyklen, -runden 43
3.8 Aufgaben eines regionalen BGM-Agenten 45
3.9 Gestehungskosten für Strom aus Windenergie 46
3.10 Anpassung von Preisrahmen innerhalb einer Verhandlungsperiode 48
3.11 Diskrete Verhandlungsstrategien für Konsumenten bzw. Produzenten 50
3.12 Verhandlungskurvenverlauf in Abhängigkeit der Strategie-Parameter 52
3.13 Verhandlungen innerhalb eines Zyklus 55
3.14 Verhandlungsmonitor eines Beispielzyklus mit 150 Agenten . . . 56
3.15 Entwicklung der Verhandlungskurven über drei Zyklen hinweg . . 58
3.16 Verhandlungskurvenschar 61
3.17 Verlauf steilster Verhandlungskurven für unterschiedliche *similarity*-Werte 64

3.18 Rechenzeit für einen Verhandlungszyklus 68
3.19 Anzahl unbefriedigter Agenten bei verschiedenen *similarity*-Werten 69
3.20 Anzahl unbefriedigter Agenten bei verschiedenen Preisrahmengrößen 70
3.21 Schematische Darstellung des um Ticket Distributoren erweiterten DEZENT-Verhandlungsbaums 71
3.22 Kommunikationspfade ohne und mit Ticket Distributor 73
3.23 Schematische Darstellung des Algorithmus entlang eines Verhandlungspfades 75

4.1 Integrierte Kommunikations- und Koordinationsprozesse innerhalb des DEZENT-Betriebsintervalls 87
4.2 Netzfrequenz und Innenraumtemperaturen eines Kühlschranks unter indirektem Demand Side Management 90
4.3 Schematische Darstellung eines Blockheizkraftwerks 93
4.4 Schematisches Modell für Bedingte Konsumenten und Produzenten in DEZENT 96
4.5 Entwicklung des gewichteten Mittelwertes von $P_{p,n}$ für $\alpha = 0,1$. 98
4.6 Entwicklung des gewichteten Mittelwertes von $P_{p,n}$ für $\alpha = 0,3$. 99
4.7 Bestimmung der absoluten notwendigen Regelenergie 102
4.8 Eingesparte elektrische Arbeit für $t_{max} = 5$ Perioden und verschiedene t_{min} und t_{duty} Konfigurationen 103
4.9 Eingesparte elektrische Arbeit für $t_{max} = 25$ Perioden und verschiedene t_{min} und t_{duty} Konfigurationen 104
4.10 Eingesparte elektrische Arbeit für $t_{max} = 150$ Perioden und verschiedene t_{min} und t_{duty} Konfigurationen 105
4.11 Minimale absolute notwendige elektrische Arbeit in Abhängigkeit des Step-Size-Parameters α 106
4.12 Verstetigung des stochastischen Lastprofils 107
4.13 0,4kV/10kV-Feeder Lastprofil für einen Durchschnittstag in der Übergangsjahreszeit (Frühling/Herbst) 108
4.14 Erweiterte Aufgaben des BGM in DEZENT 112
4.15 Kurvenschar $f(x;a)$ für $a = 2$, $a = 3$, $a = 4$ und $a = 5$ 113
4.16 Vorgehensweise beim Newton-Raphson-Verfahren 114
4.17 Beispielnetz für eine Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens 119
4.18 Schematische Darstellung des erweiterten Algorithmus entlang eines Verhandlungspfades 124

5.1 Integrierte Kommunikations-, Koordinations- und Adaptionsprozesse innerhalb des DEZENT-Betriebsintervalls 129
5.2 Interaktion zwischen Agent und Umwelt unter Reinforcement Learning 130
5.3 Preisentwicklung über einen statischen (Konsumenten-)Strategieraum 132
5.4 Anpassung von Produzentenstrategien in Unterversorgungssituationen 136
5.5 Verlauf der Gesamtlast über die Simulationszeit 139
5.6 Innerhalb von 3 Verhandlungsebenen verhandelte Energie 140
5.7 Experimente in Abhängigkeit von der Größe der k-Nachbarschaft . 141
5.8 Verhandelte Energie auf den Verhandlungsebenen 1-3 142
5.9 Aktionen eines Agenten unter Verwendung von DECOLEARN . . . 143

6.1 Jobkorrelierte und maschinenkorrelierte Ausführungszeiten (Makespan) mit 3 Jobs auf 3 Maschinen 151
6.2 Aufbau des experimentellen Netzes 160
6.3 Systemweite Leistungsbilanz im Testszenario über den Simulationszeitraum von 24 h 163
6.4 Betrachtete Zeitintervalle innerhalb des 24 h-Testszenarios 167
6.5 Lastprofil des betrachteten Zeitraums T_1 170
6.6 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_1 ohne Peak Management 171
6.7 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_1 ohne Peak Management 172
6.8 Lastprofil des betrachteten Zeitraums T_2 173
6.9 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_2 ohne Peak Management 174
6.10 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_2 ohne Peak Management 175
6.11 Lastprofil des betrachteten Zeitraums T_3 177
6.12 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_3 ohne Peak Management 178
6.13 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_3 ohne Peak Management 178
6.14 Lastprofil des betrachteten Zeitraums T_4 180
6.15 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_4 ohne Peak Management 181
6.16 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_4 ohne Peak Management 181

6.17 Lastprofil des betrachteten Zeitraums T_5 183
6.18 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_5 ohne Peak Management 184
6.19 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_5 ohne Peak Management 184
6.20 Auswirkungen des Peak Demand and Supply Managements unter BGM 4 187
6.21 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_1 mit Peak Management 189
6.22 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_1 mit Peak Management 189
6.23 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_2 mit Peak Management 192
6.24 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_2 mit Peak Management 192
6.25 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_3 mit Peak Management 194
6.26 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_3 mit Peak Management 194
6.27 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_4 mit Peak Management 196
6.28 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_4 mit Peak Management 196
6.29 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_5 mit Peak Management 198
6.30 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_5 mit Peak Management 198
6.31 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_6 ohne Peak Management 200
6.32 Gemittelte Verbraucher- und Erzeugerpreise im Zeitraum T_6 mit Peak Management 201
6.33 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_6 ohne Peak Management 201
6.34 Durchschnittliche Verhandlungshöhe im Zeitraum T_6 mit Peak Management 202
6.35 Prozentuale eingesparte elektrische Regelarbeit pro BGM auf Ebene 1 (gemittelt) 203

7.1 Integrierte Kommunikations-, Koordinations-, Adaptions- und Stabilitätsprozesse innerhalb des DEZENT-Betriebsintervalls 205
7.2 Überwachung des Energieversorgungsnetzes 208
7.3 Veränderungen der Leistungsflüsse in einer Netzmasche 209
7.4 Abfall des Spannungsniveaus entlang eines Leitungsstrangs 211
7.5 Anstieg des Spannungsniveaus entlang eines Leitungsstrangs . . . 211
7.6 Spannungsprofil entlang des Leitungsstrangs bei wechselnden Einspeisekonfigurationen 212
7.7 Keine Konvergenz beim Newton-Raphson-Verfahren 215
7.8 Zulässiges Spannungsband eines Knotens in der komplexen Ebene 218
7.9 Zulässiges Spannungsband eines Knotens im Raum komplexer Knotenleistungen 219
7.10 Zulässige Maximalströme einer Leitung in der komplexen Ebene . 220
7.11 Teilmenge zulässiger Maximalströme als zulässige Spannungsvektoren im Raum komplexer Knotenleistungen 221
7.12 Kombinierte Teilmengen innerhalb des zulässigen Spannungsbandes bei unterschiedlichen Maximalströmen im Raum komplexer Knotenleistungen 223
7.13 Ein $\mathcal{H}$-Polyhedron und ein $\mathcal{V}$-Polytop 226
7.14 QuickHull: von p aus sichtbare Facetten 229
7.15 QuickHull: gemeinsamer Rand der sichtbaren Facetten 229
7.16 QuickHull: neu konstruierte Facetten 230
7.17 Abstand und Identifikation der nächsten Facette 234
7.18 Ein zweidimensionaler k-d-Baum für eine effiziente Suche des nächsten Nachbarn 235
7.19 Ein Extrempunkt des $\mathcal{V}$-Polytops als nächster Punkt der Hülle . . 236

A.1 Lastgangkurve Haushalt 1 249
A.2 Lastgangkurve Haushalt 2 250
A.3 Lastgangkurve Haushalt 3 250
A.4 Lastgangkurve Haushalt 4 251
A.5 Lastgangkurve Haushalt 5 251
A.6 Lastgangkurve Photovoltaik 252
A.7 Normierte Lastgangkurve Windkraft 253