Stefan Kippelt

# Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien

Band 3

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft

**Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien**

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

vorgelegte

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Wirt.-Ing. Stefan Kippelt

Dortmund, 2017

| | |
|---|---|
| Referent: | Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz |
| Korreferent: | Prof. Dr. Christoph Weber |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 15.11.2017 |

Dortmunder Beitäge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz und
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Band 3

**Stefan Kippelt**

# Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2018

**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.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5853-6
ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

# Kurzfassung

Die Flexibilität der elektrischen Leistung ist eine wesentliche Eigenschaft elektrischer Energiesysteme, die zum Ausgleich absehbarer oder unvorhergesehener Schwankungen von Stromerzeugung und -verbrauch benötigt wird. Durch den steigenden Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung entsteht somit auch ein erhöhter Bedarf an betrieblicher Flexibilität. Zeitgleich sorgt der Rückbau konventioneller Kraftwerke zu einem verminderten Flexibilitätsangebot, wodurch zukünftig die Erschließung neuer Quellen betrieblicher Flexibilität notwendig wird. Neben weiteren Technologien stellen dezentrale Flexibilitätsoptionen eine aussichtsreiche Flexibilitätsquelle dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst gezeigt, wie sich die nutzbare Flexibilität dezentraler Technologien ermitteln lässt. Anhand eines Simulationsszenarios für das Energiesystem im Jahr 2035 kann anschließend demonstriert werden, welchen Beitrag diese zum Ausgleich einer zunehmend fluktuierenden Stromerzeugung leisten können. Der flexible Betrieb dieser Anlagen bewirkt jedoch auch eine signifikante Veränderung der Leistungsflüsse im Verteilnetz. Im zweiten Teil dieser Arbeit wird daher untersucht, welche Wechselwirkungen zwischen der Nutzung von Flexibilitätsoptionen und der Belastungssituation der Verteilnetze besteht.

# Abstract

In electrical power systems, operational flexibility is crucial for the balancing of long- and short-term as well as foreseen and unforeseen imbalances between load and generation. Due to the increasing share of fluctuating renewable power generation in the European power system, the demand for flexibility is going to increase in the coming years. At the same time, the dismantling of conventional power plants leads to a shortfall of today's main flexibility providers. Accordingly, new sources of flexibility become necessary. Amongst others, distributed flexibility options represent a promising technology for the future provision of operational flexibility. In this thesis, a novel approach for the analysis of several subtypes of distributed flexibility options is developed. The model implies stochastic varieties in dimensioning and usage of flexibility options and is capable of considering constrained capacities of the distribution grid. A case study of the German power system in 2035 further emphasizes the practical benefit of the developed approach. The change in the operational behavior also affects the planning and operation of distribution grids. However, an analysis of numerous real distribution grids shows that grid restrictions have only minor effects on the flexibility potential of distributed flexibility options.

# Vorwort

Diese Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) an der TU Dortmund. Hier erlebte ich eine ausgesprochen offene, freie und kommunikative Atmosphäre, die zusammen mit der Hilfs- und Diskussionsbereitschaft meiner Kolleginnen und Kollegen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Großer Dank gilt speziell auch Prof. Dr. Christian Rehtanz, sowohl für die Betreuung dieser Arbeit als auch für das große Vertrauen in seine Mitarbeiter.

Herr Prof. Dr. Christoph Weber danke ich für die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit sowie viele Jahre erfolgreicher Zusammenarbeit.

Ebenso möchte ich den Projektpartner des Forschungsprojektes „Die Stadt als Speicher“ danken. Die effiziente und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre sowie der breite Wissensaustausch waren für mich zugleich lehrreich und äußerst motivierend.

Ganz besonders danke ich auch meiner Familie, die mich unentwegt aufforderten, ihnen doch endlich mal die erste Version zur Korrektur vorzulegen und so nicht nur zur Lesbarkeit dieses Dokumentes sondern auch erheblich zur Einhaltung meines Zeitplans beitrugen.

„Wir suchen niemals die Dinge, sondern die Suche nach ihnen.“

Blaise Pascal (1623 - 1662)

# Inhaltsverzeichnis

**Kurzfassung** ..... **III**
**Abstract** ..... **III**
**Inhaltsverzeichnis** ..... **VII**
**1 Einleitung** ..... **1**
1.1 Zielsetzung ..... 3
1.2 Struktur der Arbeit ..... 4
**2 Grundlagen einer flexiblen Energieversorgung** ..... **7**
2.1 Flexibilität und Flexibilitätsoptionen ..... 7
2.1.1 Flexibilitätsbedarf im elektrischen Energiesystem ..... 8
2.1.2 Flexibilitätsoptionen im elektrischen Energiesystem ..... 9
2.1.3 Dezentrale Flexibilitätsoptionen ..... 13
2.1.4 Flexibilität und Flexibilitätspotenzial ..... 16
2.2 Methoden der Untersuchung von Flexibilität ..... 18
2.2.1 Theoretisches und technisches Potenzial ..... 18
2.2.2 Technisch nutzbares Potenzial ..... 18
2.2.3 Flexibilitätseinsatz im Verteilnetz ..... 20
2.3 Untersuchungen zu Flexibilitätsbedarf und -optionen ..... 21
2.3.1 Systemstudien auf nationaler und europäischer Ebene ..... 21
2.3.2 Flexibilitätsoptionen im Verteilnetz ..... 22
2.4 Zusammenfassung und Abgrenzung der Themenstellung ..... 24
**3 Modellierung dezentraler Flexibilitätsoptionen** ..... **27**
3.1 Flexibilität als Einsatzplanungsproblem ..... 27
3.1.1 Optimierungsziel Energiehandel ..... 29
3.1.2 Blockheizkraftwerke ..... 30
3.1.3 Heizkessel ..... 33
3.1.4 Wärmpumpen ..... 33
3.1.5 Thermische Speicher ..... 37
3.1.6 Elektrische Wärmeerzeugung ..... 40
3.1.7 Elektrofahrzeuge ..... 41
3.1.8 Flexible Haushaltslasten ..... 43
3.1.9 Elektrochemische Energiespeicher ..... 44
3.1.10 Elektrische Bilanz ..... 47
3.1.11 Thermische Bilanz ..... 48
3.1.12 Weitere Nebenbedingungen ..... 49

3.2 Berücksichtigung begrenzter Netzkapazitäten ..... 50
3.2.1 Leistungsflussrechnung und Netzsensitivitäten ..... 51
3.2.2 Sensitivitätsbasierte Netzrandbedingungen ..... 53
3.2.3 Quotenbasierte Netzrandbedingungen ..... 54
3.3 Umsetzung und Implementierung ..... 56
3.3.1 Kombination von Anlagentypen ..... 56
3.3.2 Rollierender Optimierungshorizont ..... 57
3.3.3 Implementierung und Lösung ..... 58
**4 Dimensionierung und Nutzung dezentraler Flexibilitätsoptionen ..... 59**
4.1 Nutzung und Auslegung flexibler Heizungssysteme ..... 59
4.1.1 Heizwärmebedarf ..... 60
4.1.2 Wärmebedarfsprofil ..... 61
4.1.3 Nutzung von Trinkwarmwasser ..... 74
4.1.4 Systemparameter von Heizungssystemen ..... 77
4.1.5 Dimensionierung von Heizungssystemen ..... 81
4.2 Simulation des Nutzerverhaltens ..... 92
4.2.1 Nutzungsverhalten von Elektrofahrzeugen ..... 92
4.2.2 Nutzung flexibler Haushaltslasten ..... 95
4.2.3 Dimensionierung von Solarstromspeichern ..... 97
4.3 Bestimmung des ungesteuerten Betriebsverhaltens ..... 99
4.3.1 BHKW und Spitzenlastkessel ..... 100
4.3.2 Wärmepumpen ..... 101
4.3.3 Elektrospeicherheizungen ..... 101
4.3.4 Elektrofahrzeuge ..... 102
4.3.5 Flexible Haushaltslasten ..... 103
4.3.6 Betriebsverhalten von Solarstromspeichern ..... 103
4.4 Zusammenfassung ..... 106
**5 Dezentrale Flexibilitätsoptionen im zukünftigen Energiesystem ..... 109**
5.1 Szenariorahmen für das Jahr 2035 ..... 110
5.1.1 Berücksichtigung lokaler Wetterzeitreihen ..... 111
5.1.2 Zukünftiger Bestand flexibler Anlagen ..... 114
5.2 Das stochastische Simulationsverfahren ..... 117
5.3 Bestimmung des ungesteuerten Betriebsverhaltens ..... 119
5.3.1 Ungesteuertes Betriebsverhalten von Flexibilitätsoptionen ..... 119
5.3.2 Einfluss auf die Residuallast ..... 122
5.4 Beitrag zum Ausgleich fluktuierender Stromerzeugung ..... 124
5.4.1 Vorgehen zur Betriebsoptimierung ..... 124
5.4.2 Simulationsergebnisse ..... 126
5.4.3 Ergebnisse nach Flexibilitätsoptionen ..... 132

5.4.4 Flexibilität und Speicherkapazität ..... 137
5.5 Zusammenfassung ..... 141

**6 Wechselwirkungen mit dem Verteilnetz ..... 145**

6.1 Flexibilitätsoptionen in der Netzplanung ..... 145
6.1.1 Vorgehen zur Bestimmung von Gleichzeitigkeitsfunktionen ..... 147
6.1.2 Gleichzeitigkeit von Flexibilitätsoptionen ..... 148
6.1.3 Berücksichtigung in der Netzplanung ..... 150
6.2 Flexibilitätseinsatz unter Berücksichtigung begrenzter Netzkapazitäten . 151
6.2.1 Untersuchte Verteilnetze ..... 152
6.2.2 Innovative Planungsgrundsätze für Verteilnetze ..... 153
6.2.3 Vorgehen zur Netzanalyse ..... 157
6.2.4 Einfluss auf die nutzbare Flexibilität ..... 162
6.3 Zusammenfassung ..... 164

**7 Zusammenfassung und Ausblick ..... 167**

7.1 Zusammenfassung ..... 167
7.2 Diskussion der verwendeten Methodik ..... 169
7.3 Ausblick ..... 172

**Literaturverzeichnis ..... 175**

**Abkürzungsverzeichnis ..... 189**

**Anhang A: Bereitstellung von Regelleistung ..... 193**

A.1 Prämissen der Modellierung ..... 193
A.2 Leistungsreserve ..... 194
A.3 Arbeitsreserve ..... 195
A.4 Zielfunktion ..... 198

**Anhang B: Sperrzeiten für Wärmepumpen ..... 199**

**Anhang C: Verwendete Simulationsparameter ..... 201**

**Anhang D: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis ..... 203**