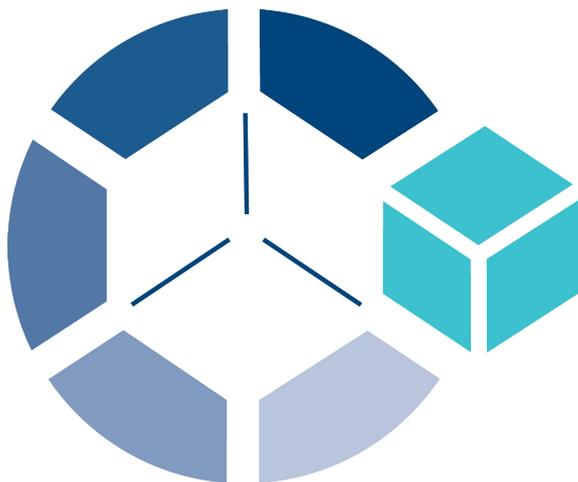


# Technisch-wirtschaftliche Integration Erneuerbarer Energien in den Regelleistungsmarkt

Band 01

Volker Scheffer

Schriftenreihe des Instituts für Elektrische Energietechnik



**TUHH**  
Technische Universität Hamburg

**Technisch-wirtschaftliche Integration Erneuerbarer Energien in den  
Regelleistungsmarkt**

Vom Promotionsausschuss der  
**Technischen Universität Hamburg**  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

**genehmigte Dissertation**

von

Volker Scheffer

aus

Witten

2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. C. Becker

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. D. Schulz

Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 2019

Schriftenreihe des Instituts für Elektrische Energietechnik

Band 1

**Volker Scheffer**

**Technisch-wirtschaftliche Integration Erneuerbarer  
Energien in den Regelleistungsmarkt**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7286-0

ISSN 2700-0273

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energietechnik an der Technischen Universität Hamburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker, dem Leiter des Instituts, möchte ich für die durchgehende Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen bei der Erstellung dieser Arbeit danken. Ich danke Ihn für die Möglichkeit, mich mit anspruchsvollen Forschungsthemen befassen zu dürfen, und die sehr gute persönliche Kooperation. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Detlev Schulz danke ich für die Übernahme des Korreferats, sowie allen kritischen Lesern meiner Arbeit für ihre Korrekturvorschläge und Anregungen.

Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitern und Studierenden des Instituts für die Diskussionsbereitschaft, fachliche Hilfe sowie den Spaß bei der Arbeit. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Stefan Möws und Bendic Ritt, die sich im Lauf dieser Arbeit das Prädikat „Toll, einfach toll“ mehr als verdient haben.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, dass sie mir meine Ausbildung ermöglicht, und mich auf meinem Weg stets unterstützt haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau Jessika von Herzen für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihr Interesse in jeglichen Belangen. Durch ihre Unterstützung und ihre Fähigkeit stets Optimismus zu verbreiten, hat sie entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Hamburg, im Dezember 2019



## **Kurzfassung**

Mit dem fortschreitenden Ausbau der Erneuerbaren Energien werden diese zukünftig auch Systemdienstleistungen bereitstellen müssen. Die Teilnahme am Markt für Regelleistung, welche zur Frequenzhaltung eingesetzt wird, ist für Wind- und Solarkraftanlagen, ausgenommen im Rahmen einer Pilotphase, derzeit nicht möglich. Die Gründe hierfür liegen vorrangig in den hohen Zuverlässigkeitsanforderungen des Regelleistungsmarktes, welche für einzelne dargebotsabhängige Erzeuger nur schwer zu erfüllen sind. Die vorliegende Arbeit bietet Lösungen, wie eine Integration von Erneuerbaren Energien in den Regelleistungsmarkt zukünftig möglich ist. Dazu wird sowohl eine Methodik zur Vermeidung von Konflikten zwischen Einspeisemanagement und Regelleistungsbereitstellung als auch ein Ansatz zur Bestimmung der maximal anbietbaren Regelleistungsmenge eines dargebotsabhängigen Anlagenpools entwickelt. Die Einbettung dieser Methodiken in ein Marktdesign der Zukunft zeigt sehr deutlich die Vorteile des entwickelten Ansatzes.

## **Abstract**

As renewable energies continue to expand, they will also have to provide ancillary services in the future. So far, with the exception of a pilot phase, it is not possible for wind and solar power plants to participate in the control reserve market, which is used to maintain frequency stability. The major obstacle for supply-dependent producers is the high reliability requirements of the control reserve market. In this work solutions are presented to integrate renewable energies into the control reserve market. A methodology to avoid conflicts between feed-in management and the provision of control reserve is developed as well as an approach to determine the maximum amount of control reserve that can be offered with a supply-dependent plant pool. The integration of these methods into a future market design clearly shows the advantages of the developed approach.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit.....	4
<b>2 Frequenzhaltung mit Erneuerbaren Energien .....</b>	<b>8</b>
2.1 Status Quo der Frequenzhaltung.....	8
2.1.1 Regelleistung.....	10
2.1.2 Regelleistungsmarkt .....	11
2.2 Regelleistungserbringung mit Erneuerbaren Energien .....	15
2.2.1 Regelleistungserbringung mit Windkraftanlagen .....	17
2.2.2 Regelleistungserbringung mit Solarkraftanlagen .....	21
2.3 Hindernisse der Marktteilnahme von Wind- und Solarkraftanlagen	27
2.3.1 Zielkonflikte der Regelleistungserbringung im Verteilnetz....	31
2.3.2 Zuverlässigkeit der Regelleistungserbringung.....	38
2.4 Forschungsfragen .....	43
<b>3 Netzzustandsbewertung zur konfliktfreien Erbringung von Regelleistung aus dem Verteilnetz.....</b>	<b>47</b>
3.1 Konzept der Netzzustandsbewertung .....	47
3.2 Verfahren zur Netzzustandsbestimmung.....	51
3.3 Referenznetz und Netznutzung .....	53
3.4 Netzzustandsbewertung für die Planung .....	57
3.4.1 Der Boundary-Load-Flow-Algorithmus.....	59
3.4.2 Exemplarische Anwendung .....	65
3.4.3 Validierung.....	68
3.5 Netzzustandsbewertung für den Betrieb .....	71
3.5.1 Generierung von Pseudo-Messwerten mit Neuronalen Netzen.....	73

3.5.2	State Estimation.....	78
3.5.3	Exemplarische Anwendung .....	81
3.5.4	Validierung.....	85
<b>4</b>	<b>Probabilistische Leistungsprognose von Anlagenpools unter Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeiten.....</b>	<b>91</b>
4.1	Probabilistische Wind- und Strahlungsprognosefehler von Einzelanlagen.....	95
4.1.1	Kerndichteschätzer .....	98
4.1.2	Bedingte Prognosefehlerverteilungen .....	100
4.2	Stochastische Abhängigkeiten zwischen den Prognosefehlern von Einzelanlagen.....	103
4.2.1	Abhängigkeitsmaße.....	103
4.2.2	Abhängigkeiten zwischen Windprognosefehlern .....	107
4.2.3	Abhängigkeiten zwischen Strahlungsprognosefehlern .....	108
4.2.4	Abhängigkeiten zwischen Wind- und Strahlungsprognosefehlern.....	111
4.3	Modellierung der stochastischen Abhängigkeiten der Wetterprognosefehler eines Anlagenpools .....	112
4.3.1	Copula-Theorie.....	114
4.3.2	Parametrische Copulas .....	119
4.3.3	Vine Copulas .....	125
4.3.4	Simulation aus einer Copula.....	129
4.4	Bestimmung der probabilistischen Leistungsprognose eines Anlagenpools.....	131
4.4.1	Windkraftanlagenpools.....	133
4.4.2	Solkraftanlagenpools.....	136
4.4.3	Pools aus steuerbaren Erzeugern .....	138

---

4.4.4 Pools aus Erneuerbaren Energien und steuerbaren Erzeugern .....	140
<b>5 Regelleistungsmarkt 2.0 – Teilnahme von Erneuerbaren Energien mit probabilistischen Leistungsgeboten.....</b>	<b>143</b>
5.1 Marktteilnahme mit risikobasierten Leistungsgeboten.....	144
5.1.1 Berechnungsverfahren für risikobasierte Gebote.....	148
5.1.2 Simulationsumgebung.....	149
5.1.3 Exemplarischer Vergleich der Verfahren.....	150
5.1.4 Untersuchungen zum Zuverlässigkeitsniveau und der Poolzusammensetzung.....	161
5.2 Marktdesign für zukünftige Erzeugungsszenarien .....	166
5.2.1 Optimierte Gebotsauswahl.....	170
5.2.2 Exemplarische Anwendung der Gebotsauswahl .....	181
<b>6 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse.....</b>	<b>187</b>
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>193</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>201</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>223</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>233</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>241</b>
<b>Anhang A: Informationen zu den untersuchten Anlagenpools .....</b>	<b>243</b>
<b>Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis.....</b>	<b>247</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>251</b>