

# Optimierte Bereitstellung von Frequency Containment Reserve mit einem Pool aus Erneuerbaren Energien und Speichern

Band 03

Stefan Möws

Schriftenreihe des Instituts für Elektrische Energietechnik



# Optimierte Bereitstellung von Frequency Containment Reserve mit einem Pool aus Erneuerbaren Energien und Speichern

**Dem Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Stefan Möws

aus

Minden

2023

- 1. Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
- 2. Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

**Tag der mündlichen Prüfung:** 20. Juli 2023

Schriftenreihe des Instituts für Elektrische Energietechnik

Band 3

**Stefan Möws**

**Optimierte Bereitstellung von Frequency  
Containment Reserve mit einem Pool aus  
Erneuerbaren Energien und Speichern**

Shaker Verlag  
Düren 2023

### **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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9277-6

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 Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter ist genial. Du wirst im Grunde fürs Lernen bezahlt!“ Es waren genau diese Worte meines damaligen Masterarbeitsbetreuers Volker Scheffer, die mich endgültig überzeugten, mich auf die Stelle am Institut für Elektrische Energietechnik der Technischen Universität Hamburg zu bewerben. Aus dem Betreuer wurde ein Kollege und guter Freund, der mir nicht nur während, sondern auch nach seiner Zeit am Institut stets mit inhaltlichem sowie persönlichem Rat zur Seite stand. Volker, du hast mit deinen kritischen Anmerkungen und dem ein oder anderen markigen Spruch viel zu der vorliegenden Dissertation beigetragen. Danke dir dafür. Toll, einfach toll!

Das alles wäre selbstverständlich nicht möglich gewesen, wenn Professor Becker mir die Stelle - und die Möglichkeit, diese Dissertation zu schreiben - nicht auch gegeben hätte (trotz meiner hochfrequenten Umwege im Studium). Für diese Chance, für die lehrreiche Zeit sowie für zahlreiche Kommentare und Korrekturvorschläge zu meiner Ausarbeitung möchte ich mich herzlich bedanken. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Gawlik für die Übernahme des Ko-referats, für den sehr angenehmen Begutachtungsprozess und die freundliche Kommunikation auf Augenhöhe.

Die Zeit am Institut wäre natürlich nicht halb so schön gewesen ohne meine Kolleg:innen und die Studierenden des Instituts. Zum einen bedanke ich mich bei euch für die zahlreichen fachlichen Gespräche, die mich stets zum Nachdenken gebracht und mir immer geholfen haben. Zum anderen für Disc-Golf, Mario Kart, eine Herde Luftballons und die vielen weiteren Aktivitäten, die mir noch lange in Erinnerung bleiben werden. Ganz besonders hervorheben möchte ich hierbei Lea, Béla, Christoph und Anna-Lena, die mit ihren Abschlussarbeiten und zum Teil später als Mitarbeitende großen Anteil am Gelingen meiner Arbeit hatten. Vielen Dank Euch für die gemeinsame Zeit.

Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich für die immer präsen-te Unterstützung. Unsere gemeinsamen Urlaube und die Zeit, die wir zusammen verbringen, geben mir die Energie, um Aufgaben wie diese Arbeit zu schaffen.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Khaaro, die immer für eine spontane Diskussion über *Strom* bereit stand und mir während der ganzen Zeit den Rücken freigehalten hat. Danke dir. Du bist die Beste!

Hamburg, im Oktober 2023



## Kurzzusammenfassung

Mit der Zielstellung, elektrische Energie bis zum Jahr 2035 nahezu vollständig aus Erneuerbaren Energien zu gewinnen, müssen diese in Zukunft auch Systemdienstleistungen bereitstellen. Frequency Containment Reserve (FCR) sichert den frequenzstabilen Betrieb des kontinentaleuropäischen Stromnetzes und wird aktuell weder durch Windenergie- noch Photovoltaikanlagen bereitgestellt. Die Herausforderung liegt dabei vor allem in der Dargebotsabhängigkeit der Leistung dieser Anlagen, welche die Einhaltung der hohen geforderten Zuverlässigkeit der Bereitstellung erschwert. Im Rahmen der Arbeit wird eine Methodik entwickelt, die es dargebotsabhängigen Anlagen ermöglicht, mithilfe der Unterstützung eines Speichers an der Bereitstellung von FCR teilzunehmen. Es werden drei Teilmethoden vorgestellt, welche die Herausforderungen von der Dimensionierung des Speichers, über die Gebotsabgabe am Markt bis hin zur koordinierten Steuerung der Anlagen konsistent abdecken.

Für die Dimensionierung des Speichers wird eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, die Zuverlässigkeit der Bereitstellung für beliebige Speichergößen zu berechnen und somit eine Aussage über die benötigte Speichergröße zu treffen. Hierbei wird die Copula-Theorie verwendet, um Szenarien der dargebotsabhängigen Leistung und des FCR-Abrufs zu erstellen, welche sowohl die auftretenden räumlichen als auch zeitlichen Abhängigkeiten abbilden.

Die Gebotsabgabe am Markt erfolgt mithilfe einer Optimierung auf Basis des Genetischen Algorithmus, die unter der Berücksichtigung von Vortagsprognosen die maximal bereitstellbare FCR errechnet. Die Einhaltung der geforderten Zuverlässigkeit auch bei auftretenden Prognosefehlern wird innerhalb der Optimierung sichergestellt.

Die koordinierte Steuerung der Anlagen stellt die Bereitstellung der FCR bei kurzfristigen Schwankungen des Dargebots sicher. Um die Bereitstellung optimal auf die Anlagen zu verteilen, wird eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung entwickelt, welche die Geschwindigkeitsanforderungen einer Echtzeitsteuerung erfüllt. Zusätzlich wird für die Erbringung der FCR eine dezentrale Steuerung an den einzelnen Anlagen implementiert, welche die Ausfallsicherheit erhöht.

Alle drei Teilmethoden werden mithilfe von Prognose- und Analysedaten des Deutschen Wetterdienstes untersucht und validiert. Es wird für verschiedene Kombinationen aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen gezeigt, dass die geforderte Zuverlässigkeit in allen drei Teilbereichen eingehalten werden kann. Insgesamt ergibt sich eine Methode, welche die Bereitstellung von FCR für eine beliebige Anzahl von räumlich verteilten Windenergie- und Photovoltaikanlagen durch die Kombination mit Speichern ermöglicht.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	2
1.2	Ziel und Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Status Quo der Frequency Containment Reserve</b>	<b>7</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	7
2.2	Frequency Containment Reserve mit Erneuerbaren Energien . .	12
2.3	Frequency Containment Reserve mit Batteriespeichern . . . . .	16
2.4	Herausforderungen zukünftiger Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung . . . . .	18
2.5	Forschungsfragen . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Speicherdimensionierung zur Unterstützung eines Pools aus Erneuerbaren Energien</b>	<b>33</b>
3.1	Generierung von Szenarien unter Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeiten . . . . .	35
3.1.1	Datengrundlage der Untersuchungen . . . . .	37
3.1.2	Untersuchung der zeitlichen stochastischen Abhängigkeiten . . . . .	40
3.1.3	Modellierung der zeitlichen Abhängigkeiten mithilfe der Copula-Theorie . . . . .	44
3.1.4	Erzeugungsszenarien unter Einbezug der räumlichen Abhängigkeiten . . . . .	60
3.2	Speicherdimensionierung unter Einbezug der Szenarien . . . . .	66
3.2.1	Szenarien des Ladestands . . . . .	67
3.2.2	Dimensionierung der Speicherkapazität . . . . .	69
3.2.3	Dimensionierung der Speicherleistung . . . . .	73
3.2.4	Verfahren zur Validierung der berechneten Speichergroße . . . . .	74
3.3	Exemplarische Anwendung der Speicherdimensionierung . . . . .	78
3.3.1	Verwendete Anlagenpools . . . . .	79
3.3.2	Validierung der Zuverlässigkeit der Erbringung . . . . .	81
3.3.3	Speicherdimensionierung bei unterschiedlichen FCR-Geboten . . . . .	82

<b>4</b>	<b>Gebotserstellung für die Teilnahme am Frequency-Containment-Reserve-Markt</b>	<b>87</b>
4.1	Poolsteuerung zur Maximierung der Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung . . . . .	88
4.1.1	Erweiterte Poolsteuerung . . . . .	89
4.1.2	Zuverlässigkeitsberechnung der Gebote eines Tages mithilfe des Szenariengenerators . . . . .	95
4.2	Optimierung der Gebote eines Tages unter Einhaltung der geforderten Zuverlässigkeit . . . . .	99
4.2.1	Herleitung eines geeigneten Optimierungsverfahrens . .	100
4.2.2	Optimierung mit dem Genetischen Algorithmus . . . . .	104
4.3	Exemplarische Anwendung der Gebotsoptimierung . . . . .	113
4.3.1	Validierung der Gebotsoptimierung . . . . .	113
4.3.2	Einfluss der Produktzeitscheibenlänge . . . . .	117
<b>5</b>	<b>Fahrplanoptimierung und Steuerung eines Pools zur Erbringung der Frequency Containment Reserve</b>	<b>119</b>
5.1	Optimierung des Pool-Fahrplans unter Einhaltung der Frequency-Containment-Reserve-Bereitstellung . . . . .	120
5.1.1	Methodischer Ansatz . . . . .	121
5.1.2	Mathematische Formulierung der Optimierung . . . . .	131
5.2	Anlagensteuerung zur Erbringung der Frequency Containment Reserve . . . . .	139
5.3	Exemplarische Anwendung der Poolsteuerung . . . . .	145
5.3.1	Datengrundlage und Aufbau des Modells . . . . .	146
5.3.2	Validierung der Zuverlässigkeit der Fahrplanoptimierung	149
5.3.3	Tagessimulation der Fahrplanoptimierung . . . . .	151
5.3.4	Erbringung der FCR in einem kritischen Netzzustand . .	154
<b>6</b>	<b>Diskussion und Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>161</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>187</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>193</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>199</b>
	<b>Anhang A Informationen zu den untersuchten Anlagenpools</b>	<b>201</b>

<b>Anhang B Zusätzliche Ausführungen zur Methode</b>	<b>206</b>
B.1 Berechnung der möglichen Einspeisung der EEA für die Fahrplanoptimierung . . . . .	206
B.2 Erweiterung der Zielfunktion der Fahrplanoptimierung . . . . .	208