
Baubetriebswirtschaftslehre und Infrastrukturmanagement

Herausgegeben von
D. Jacob, Freiberg, Deutschland

Für internationales Zusammenwachsen und Wohlstand spielt gutes Infrastrukturmanagement eine zentrale Rolle. Erkenntnisse der baubetriebswirtschaftlichen Forschung können hierzu wichtige Beiträge leisten, die diese Schriftenreihe einem breiteren Publikum zugänglich machen will.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Dieter Jacob
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/12477>

Michael Kausche

Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen

Wirtschaftlich-technische
Untersuchungen und
Kostensenkungspotenziale

 Springer Gabler

Michael Kausche
Freiberg, Deutschland

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

Baubetriebswirtschaftslehre und Infrastrukturmanagement

ISBN 978-3-658-19580-9 ISBN 978-3-658-19581-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-19581-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baukonstruktion und Massivbau des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg im Rahmen eines Projektes zur Entwicklung eines schwimmenden Gründungskonzeptes für Offshore-Windenergieanlagen. Als Wirtschaftsingenieur beschäftigte ich mich mit den wirtschaftlichen und technischen Aufgabenstellungen in diesem Projekt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Dieter Jacob, der mir überhaupt erst ermöglichte dieses wirtschaftlich-technische Thema zu bearbeiten. Zudem danke ich ihm für das Interesse und seine Bereitschaft zur Übernahme des Erstgutachtens.

In diesem Sinne danke ich meinem betreuenden Hochschullehrer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Dahlhaus, der mich während meiner Tätigkeit an seinem Lehrstuhl sowohl fachlich als auch organisatorisch stets unterstützte. Weiterhin danke ich ihm für das Interesse und seine Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein spezieller Dank gilt ferner den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baukonstruktion und Massivbau sowie den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baubetriebslehre für ihre Unterstützung und fachlich interessanten Diskussionen. Im Speziellen danke ich Herrn Dr.-Ing. habil. S. Ortlepp und Frau M.Sc. B. Jüttner, die mir als Diskussionspartner und wertvolle Ratgeber zur Verfügung standen.

Weiterhin danke ich im Besonderen Herrn Dipl.-Ing. D. Karl, Herrn Dipl. Kfm. T. Lötsch und Herrn D. Mahlik für ihre fachliche Beratung, der Bereitstellung wesentlicher Daten und ihre wichtigen Hinweise zur Lösung bestimmter Fragestellungen.

Den Kollegen der Firma GICON®, speziell Herrn Dr.-Ing. F. Adam, Herrn Dipl.-Ing. K. Köpke und Herrn M. Sc. M. Kuhl, danke ich für die Bereitstellung wirtschaftlicher und technischer Daten aus dem SOF-Projekt und ihrem entgegengebrachten Vertrauen. Die Umsetzung dieses Themas wäre ohne deren Hilfe nicht möglich gewesen.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie für ihre Geduld sowie für ihre organisatorische und ideelle Unterstützung bedanken.

Auszüge dieser Dissertationsschrift sind in Teilen sinngemäß und in englischer Sprache in diversen Publikationen veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Danksagung..... | V |
| Abbildungsverzeichnis..... | XI |
| Tabellenverzeichnis | XV |
| Abkürzungsverzeichnis..... | XIX |
| Symbolverzeichnis..... | XXI |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 1 |
| 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise | 3 |
| 2 Marktübersicht, Potenziale und Politik im Offshore-Bereich..... | 5 |
| 2.1 Marktübersicht und Bestand | 5 |
| 2.1.1 Bestand in Deutschland..... | 5 |
| 2.1.2 Bestand in Europa..... | 7 |
| 2.1.3 Bestand schwimmender Gründungen weltweit | 8 |
| 2.2 Offshore-Potenziale | 8 |
| 2.2.1 Offshore-Potenzial in Deutschland | 9 |
| 2.2.2 Offshore-Potenzial in Europa (ohne Deutschland)..... | 9 |
| 2.2.3 Offshore-Potenzial in Asien..... | 10 |
| 2.2.4 Offshore-Potenzial in Amerika | 11 |
| 2.3 Politik und Industrie im Offshore-Windbereich | 12 |
| 3 Stand der Wissenschaft und Technik..... | 15 |
| 3.1 Allgemeine wirtschaftliche Betrachtungen..... | 15 |
| 3.1.1 Lebenszykluskosten | 15 |
| 3.1.2 Stromgestehungskosten..... | 16 |
| 3.1.3 Investitions- und Betriebskosten..... | 18 |
| 3.1.4 Operation und Maintenance..... | 25 |
| 3.1.5 EEG und Einspeisevergütung | 28 |
| 3.1.6 Grundlastproblematik | 30 |
| 3.2 Stand der Technik zu Offshore-Gründungen | 33 |
| 3.2.1 Aufbau und Prinzip einer Offshore-Windenergieanlage | 33 |
| 3.2.2 Feste Gründungen | 34 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2.3 | Schwimmende Gründungen..... | 36 |
| 3.3 | Technische, geologische und ökologische Betrachtungen..... | 44 |
| 3.3.1 | Lasten auf Offshore-Gründungsstrukturen | 44 |
| 3.3.2 | Werkstoffe für Offshore-Gründungen | 47 |
| 3.3.3 | Geologische und ökologische Betrachtungen..... | 48 |
| 4 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Kostensenkungspotenziale..... | 51 |
| 4.1 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen | 51 |
| 4.1.1 | Statische und dynamische Verfahren..... | 51 |
| 4.1.2 | Kenngrößen der Wirtschaftlichkeit..... | 53 |
| 4.2 | Kostensenkungspotenziale schwimmender Offshore-Windenergieanlagen..... | 53 |
| 4.2.1 | Allgemeine Möglichkeiten der Kostensenkung..... | 54 |
| 4.2.2 | Reduzierung der Investitionskosten..... | 56 |
| 4.2.3 | Reduzierung der Betriebskosten | 61 |
| 4.2.4 | Reduzierung der Kapitalkosten..... | 64 |
| 4.2.5 | Steigerung der Stromerträge | 68 |
| 4.2.6 | Lösungsansatz..... | 69 |
| 5 | Sensitivitätsanalyse..... | 71 |
| 5.1 | Allgemeines | 71 |
| 5.2 | Ansätze und Analysemethoden der Sensitivitätsanalyse | 71 |
| 5.2.1 | Methoden und Techniken der Sensitivitätsanalyse..... | 72 |
| 5.2.2 | Verfahren in der Sensitivitätsanalyse..... | 74 |
| 5.3 | Auswahl des Verfahrens | 77 |
| 6 | Optimierung der Stromgestehungskosten für das GICON®-SOF 2..... | 79 |
| 6.1 | Annahmen und Begrifflichkeiten..... | 80 |
| 6.1.1 | Annahmen und Erläuterungen zur Kostenaufstellung | 80 |
| 6.1.2 | Begrifflichkeiten und Annahmen für die Sensitivitätsanalysen..... | 81 |
| 6.2 | Methodik I - Screening | 83 |
| 6.3 | Methodik II - Lokale Sensitivitätsanalyse | 84 |
| 6.3.1 | Identifikation und Definition der lokalen Modellparameter..... | 85 |
| 6.3.2 | Aufstellen der lokalen Parametermatrix und Berechnung..... | 119 |
| 6.3.3 | Bewertung und Darstellung der lokalen Ergebnismatrix..... | 122 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.3.4 | Schlussfolgerungen und Auswahl der signifikanten Parameter..... | 140 |
| 6.4 | Methodik III - Globale Sensitivitätsanalyse | 144 |
| 6.4.1 | Variablenauswahl und Konstellationsmöglichkeiten..... | 144 |
| 6.4.2 | Aufstellen und Lösen der globalen Parametermatrix..... | 146 |
| 6.4.3 | Bewertung und Darstellung der Ergebnisse der globalen Analyse..... | 147 |
| 6.4.4 | Schlussfolgerungen und weitergehende Betrachtungen | 158 |
| 7 | Auswertung der Analyseergebnisse mit Gründungsempfehlung..... | 161 |
| 7.1 | Auswertung der Optimierung schwimmender Gründungskonzepte..... | 161 |
| 7.2 | Gründungsempfehlung mit Begründung..... | 164 |
| 7.3 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am SOF 2 auf Grundlage des EEG 2014 ... | 166 |
| 7.3.1 | Basismodell am GICON®-SOF 2..... | 166 |
| 7.3.2 | Stauchungsmodell am GICON®-SOF 2..... | 167 |
| 7.3.3 | Basismodell am optimierten GICON®-SOF 2 | 168 |
| 7.3.4 | Stauchungsmodell am optimierten GICON®-SOF 2..... | 169 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 171 |
| 8.1 | Zusammenfassung..... | 171 |
| 8.2 | Ausblick | 173 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 175 |
| 10 | Anhang..... | 187 |
| 10.1 | Anhang 1 | 187 |
| 10.2 | Anhang 2..... | 189 |
| 10.3 | Anhang 3..... | 195 |
| 10.4 | Anhang 4..... | 197 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Kostenvergleich fester und schwimmender Gründungskonzepte (Quelle: HARRIES und GRACE [53])..... | 2 |
| Abbildung 1-2: SGK erneuerbarer Energien und konventioneller Kraftwerke in Deutschland (Quelle: KOST ET AL. [74])..... | 2 |
| Abbildung 2-1: Deutsche Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee (Quelle: LÜERS [87])..... | 6 |
| Abbildung 2-2: Europäische Offshore-Windparks in der Nordsee (Quelle: [132])..... | 7 |
| Abbildung 2-3: Trend: Generatorleistung, Wassertiefe und Entfernung (Quelle: BERGER [17])..... | 8 |
| Abbildung 3-1: Aufgliederung der Investitionskosten..... | 18 |
| Abbildung 3-2: Prozentuale Verteilung der Investitionskosten des SOF 2 in Anlehnung an KUHL [80]..... | 23 |
| Abbildung 3-3: Gliederung der Betriebskosten | 24 |
| Abbildung 3-4: Kostenstruktur der Betriebskosten (in Anlehnung an SVOBODA [108])..... | 26 |
| Abbildung 3-5: Übersicht über die Instandhaltungsmaßnahmen (in Anlehnung an DIN EN 31051[38])..... | 27 |
| Abbildung 3-6: Windparkaufbau mit Turmvorstau und Abschattungsverlusten (Quelle: KUSIAK und SONG [81]; GASCH und TWELE [46])..... | 30 |
| Abbildung 3-7: Schematischer Aufbau einer Offshore-WEA (Eigene Darstellung in Anlehnung an GICON®)..... | 34 |
| Abbildung 3-8: Feste Gründungen: v. l.: Monopile, Tripod, Jacket (Quelle: Anke Meschede [91])..... | 34 |
| Abbildung 3-9: Feste Gründungen: v. l. Tripile, Schwergewichtsgründung, Suction-Bucket (Quelle: KUHL und JENSEN [78]; THIEKEN und ACHMUS [112])..... | 36 |
| Abbildung 3-10: Einordnung der schwimmenden Gründungen im Stabilitätsdreieck (Quelle: in Anlehnung an BUTTERFIELD ET AL. [30])..... | 37 |
| Abbildung 3-11: Schwimmende Offshore-WEA: v. l. Spar Buoy, TLP, Halbttaucher (Quelle: Anke Meschede [91])..... | 37 |
| Abbildung 3-12: Schwimmende Offshore-WEA: v. l.: SparBuoy-Konzept von STATOIL (Quelle: EDER und ODRICH [40]); TLP-Konzept: GICON®-SOF 2 (Quelle: Anke Meschede [91]); TLP-Konzept: GLOSTEN-Pelastar (Quelle: LUNN [88])..... | 38 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 3-13: Schwimmende Offshore-WEA: TLB (Quelle: NYGAARD und MYHR [93]); WINDFLOAT (Quelle: PRINCIPLEPOWER [97]); Barge-IDEOL (Quelle: JAMES und ROS [64])..... | 41 |
| Abbildung 3-14: Schwimmende Offshore-WEA: Fukushima FORWARD-Projekt (Quelle: ISHIHARA und TAKI [60])..... | 41 |
| Abbildung 3-15: Schwimmende Offshore-WEA: Hexicon - Konzept für Mehrfachanlagen (Quellen: OFVERSTROM und JENKENS [95])..... | 42 |
| Abbildung 3-16: Innovative schwimmende Konzepte nach JAMES und ROS [64]..... | 43 |
| Abbildung 3-17: Belastungen einer Offshore-WEA (Quelle: GASCH und TWELE [46])... | 44 |
| Abbildung 4-1: Aufgliederung der IK (links: konventionelle WEA; rechts: schwimmende-WEA - Quelle: [53])..... | 56 |
| Abbildung 4-2: Ansatzpunkte der Kostenoptimierung in den Projektphasen eines Offshore-Windparks | 70 |
| Abbildung 5-1: Darstellung verschiedener Szenarien am Trichtermodell (Quelle: HOBOHM ET AL. [57])..... | 76 |
| Abbildung 6-1: Schematische Darstellung zur Optimierung der Stromgestehungskosten | 79 |
| Abbildung 6-2: Prozentuale Kostenaufgliederung des SOF 2-Projektes | 83 |
| Abbildung 6-3: Prozentuale Kostenaufgliederung des SOF 2 an den SGK | 84 |
| Abbildung 6-4: GICON®-SOF 2/3 (Quelle: in Anlehnung an ADAM [2])..... | 91 |
| Abbildung 6-5: SIEMENS-Datenblatt: SWT-6.0-154-Standard Power Curve (in Anlehnung an [106])..... | 104 |
| Abbildung 6-6: Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit von der Küstenentfernung | 109 |
| Abbildung 6-7: Investitionskosten und Gesamtenergieerträge in Abhängigkeit der Generatorleistung..... | 111 |
| Abbildung 6-8: Standort SOF 2 im Windpark BALTIC1 (Quelle: ADAM [1])..... | 113 |
| Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Verankerungsseile (in Anlehnung an KÖPKE [69])..... | 115 |
| Abbildung 6-10: Variation des SOF 2 in Abhängigkeit der Wellenhöhe (in Anlehnung an KÖPKE [69]) | 117 |
| Abbildung 6-11: SGK in Abhängigkeit der Gesamtinvestitionskosten (Basiswert: 18.000 T€) | 123 |
| Abbildung 6-12: SGK in Abhängigkeit der Projektentwicklungskosten (Basiswert: 375 T€) | 124 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6-13: SGK in Abhängigkeit der Turbineninvestitionskosten (Basiswert: 7.800 T€) | 124 |
| Abbildung 6-14: SGK in Abhängigkeit der Turminvestitionskosten (Basiswert: 786 T€) | 125 |
| Abbildung 6-15: SGK in Abhängigkeit der Verankerungskosten (Basiswert: 830 T€) .. | 125 |
| Abbildung 6-16: SGK in Abhängigkeit der SOF 2-Investitionskosten (Basiswert: 3.480 T€) | 126 |
| Abbildung 6-17: SGK in Abhängigkeit der Installationskosten (Basiswert: 1.700 T€) .. | 126 |
| Abbildung 6-18: SGK in Abhängigkeit der Verkabelungs- und Netzanbindungskosten (Basiswert: 1.400 T€) | 127 |
| Abbildung 6-19: SGK in Abhängigkeit der Betriebskosten (Basiswert: 566 T€) | 128 |
| Abbildung 6-20: SGK in Abhängigkeit der Betriebskostensteigerung (Basiswert: 2 %) .. | 128 |
| Abbildung 6-21: SGK in Abhängigkeit der Kosten für das parkinterne Umspannwerk (Basiswert: 1.392 T€) | 129 |
| Abbildung 6-22: SGK in Abhängigkeit der Rückbaukosten (Basiswert: 215 T€) | 129 |
| Abbildung 6-23: SGK in Abhängigkeit von den Erlösen aus dem Schrottverkauf (Basiswert: 250 T€) | 130 |
| Abbildung 6-24: SGK in Abhängigkeit von den Erlösen aus dem Verkauf der Kabel (Basiswert: 0,00 €) | 130 |
| Abbildung 6-25: SGK in Abhängigkeit von den Verkaufserlösen aus Turm und Turbine (Basiswert: 0,00 €) | 131 |
| Abbildung 6-26: SGK in Abhängigkeit von den Gesamterlösen nach Laufzeitende | 132 |
| Abbildung 6-27: SGK in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Basiswert: 10,1 m/s) | 132 |
| Abbildung 6-28: SGK in Abhängigkeit der Volllaststunden (Basiswert: 4.000 h) | 133 |
| Abbildung 6-29: SGK in Abhängigkeit des Kapitalkostensatzes (Basiswert: 6,17 %) .. | 133 |
| Abbildung 6-30: SGK in Abhängigkeit von der Küstenentfernung für das SOF 2 (Basiswert: 40 km) | 134 |
| Abbildung 6-31: SGK in Abhängigkeit der Generatorleistung (Basiswert: 6.0 MW) | 135 |
| Abbildung 6-32: SGK in Abhängigkeit der risikoabhängigen Investitionskosten (Basiswert: 1.800 T€) | 136 |
| Abbildung 6-33: SGK in Abhängigkeit der Wassertiefe (Basiswert: 30 m) | 137 |
| Abbildung 6-34: SGK in Abhängigkeit der Wellenhöhe (Basiswert: 10,4 m) | 137 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 6-35: SGK in Abhängigkeit der Projektlaufzeit (Ausgangssituation: 20 Jahre) | 140 |
| Abbildung 6-36: Lokale Abhängigkeiten der SGK von den Variablen X_2 bis X_{21} | 141 |
| Abbildung 6-37: Häufigkeitsverteilung der SGK für die Konstellation (K_1) | 147 |
| Abbildung 6-38: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_1) (Räumliche Darstellung) | 149 |
| Abbildung 6-39: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_1) (Darstellung im Grundriss) | 150 |
| Abbildung 6-40: Häufigkeitsverteilung der SGK für die Konstellation (K_2) | 151 |
| Abbildung 6-41: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_2) (Darstellung im Grundriss) | 152 |
| Abbildung 6-42: Häufigkeitsverteilung der SGK für die Konstellation (K_3) | 153 |
| Abbildung 6-43: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_3) (Darstellung im Grundriss) | 154 |
| Abbildung 6-44: Häufigkeitsverteilung der SGK für die Konstellation (K_4) | 155 |
| Abbildung 6-45: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_4) (Darstellung im Grundriss) | 156 |
| Abbildung 6-46: Häufigkeitsverteilung der SGK für die Konstellation (K_5) | 156 |
| Abbildung 6-47: Abhängigkeit der SGK von der Konstellation (K_5) (Darstellung im Grundriss) | 158 |
| Abbildung 7-1: Darstellung des Variationsbereiches für lokale Sensitivitätsanalysen (Teil 1) | 161 |
| Abbildung 7-2: Darstellung des Variationsbereiches für lokale Sensitivitätsanalysen (Teil 2) | 162 |
| Abbildung 7-3: Darstellung der Stromgestehungskosten für lokale Sensitivitätsanalysen (Teil 1) | 162 |
| Abbildung 7-4: Darstellung der Stromgestehungskosten für lokale Sensitivitätsanalysen (Teil 2) | 163 |
| Abbildung 7-5: Ansatzpunkte zur Kostenoptimierung in den Projektphasen eines Offshore-Windparks | 163 |
| Abbildung 7-6: Streubereich der Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Konstellation (K_i) | 164 |
| Abbildung 7-7: Prognose der SGK für schwimmende Gründungen (in Anlehnung an [92]) | 165 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 2-1: | Bestand an Offshore-Windparks in Deutschland - feste Gründungen | 6 |
| Tabelle 2-2: | Bestand an Offshore-Windparks in Europa (ohne Deutschland) - feste Gründungen..... | 7 |
| Tabelle 2-3: | Bestand an Offshore-WEA - schwimmende Gründungen | 8 |
| Tabelle 2-4: | Geplante und genehmigte Offshore-Windparks in Europa (schwimmende Gründungen) | 10 |
| Tabelle 2-5: | Geplante Offshore-Windparks in Japan (schwimmende Gründungen). | 11 |
| Tabelle 2-6: | Geplante Offshore-Windparks in Nordamerika (schwimmende Gründungen)..... | 12 |
| Tabelle 2-7: | SWOT-Analyse für Offshore-WEA | 14 |
| Tabelle 3-1: | Zusammenfassung wirtschaftlicher und technischer Kennzeichen | 43 |
| Tabelle 3-2: | Zusammenfassung wirtschaftlicher und technischer Kennzeichen (Fortsetzung)..... | 44 |
| Tabelle 4-1: | Netzanbindungskosten bezogen auf die Gesamtinvestitionen (in Anlehnung an ERGE [43])..... | 59 |
| Tabelle 4-2: | Verringerung des Kapitalkostensatzes infolge Risikominimierung (Quelle: HOBOMH ET AL. [57])..... | 66 |
| Tabelle 5-1: | Dreifachrechnung am Beispiel einer Investition (in Anlehnung an BIEG [18]) | 75 |
| Tabelle 6-1: | Basiskosten zur Berechnung der SGK für das SOF 2 (In Anlehnung an KUHL [80]) | 80 |
| Tabelle 6-2: | Einführung, Zuordnung und Auswahl der Variablen für die Sensitivitätsanalysen..... | 81 |
| Tabelle 6-3: | Intervall: Variation der Projektentwicklungskosten (grau: GICON®- Basiswert) | 87 |
| Tabelle 6-4: | Intervall: Variation der Investitionskosten für die Turbine (grau: GICON®-Basiswert) | 88 |
| Tabelle 6-5: | Intervall: Variation der Investitionskosten für den Turm (grau: GICON®-Basiswert)..... | 88 |
| Tabelle 6-6: | Intervall: Variation der Investitionskosten für die Verankerung (grau: GICON®-Basiswert)..... | 89 |
| Tabelle 6-7: | Intervall: Variation der Investitionskosten für das SOF 2 (grau: GICON®-Basiswert)..... | 90 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 6-8: | Zusammenstellung der Investitionskosten für das SOF 3 | 91 |
| Tabelle 6-9: | Lohnkosten in Asien am Beispiel Indien (Quelle: in Anlehnung an PASVANTIS [96]) | 92 |
| Tabelle 6-10: | Herstellkosten des SOF 2 für Deutschland und Indien (in Anlehnung an KÖPKE [70]) | 93 |
| Tabelle 6-11: | Zwei Indikationen der Firma DB SCHENKER DEUTSCHLAND AG [89] .. | 94 |
| Tabelle 6-12: | Intervall: Variation der Investitionskosten für das SOF 2/3 (grau: GICON®-Basiswert) | 95 |
| Tabelle 6-13: | Intervall: Variation der Installationskosten für die Verankerung (grau: GICON®-Basiswert) | 96 |
| Tabelle 6-14: | Intervall: Variation der Verkabelungs- und Netzanbindungskosten (grau: GICON®-Basiswert) | 97 |
| Tabelle 6-15: | Intervall: Variation der jährlichen Betriebskosten (grau: GICON®-Basiswert) | 99 |
| Tabelle 6-16: | Intervall: Variation der jährlichen Betriebskostensteigerungsrate (grau: GICON®-Basiswert) | 100 |
| Tabelle 6-17: | Intervall: Variation der Kosten für das parkinterne Umspannwerk (grau: GICON®-Basiswert) | 101 |
| Tabelle 6-18: | Intervall: Variation der Rückbaukosten (grau: GICON®-Basiswert) .. | 102 |
| Tabelle 6-19: | Intervall: Variation der Erlöse aus dem Stahlschrott (grau: GICON®-Basiswert) | 103 |
| Tabelle 6-20: | Intervall: Variation der Erlöse aus dem Kabelschrott (grau: GICON®-Basiswert) | 103 |
| Tabelle 6-21: | Intervall: Variation der Erlöse aus Turm und Turbine (grau: GICON®-Basiswert) | 104 |
| Tabelle 6-22: | Ermittlung der Energieerträge über die Windgeschwindigkeit für eine 6.0 MW-WEA | 105 |
| Tabelle 6-23: | Intervall: Variation der Windgeschwindigkeit (grau: GICON®-Basiswert) | 105 |
| Tabelle 6-24: | Intervall: Variation der Volllaststunden (grau: GICON®-Basiswert) .. | 106 |
| Tabelle 6-25: | Berechnung der nominalen und realen Kapitalkostensätze | 108 |
| Tabelle 6-26: | Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit von der Küstenentfernung (grau: GICON®-Basiswert) | 110 |
| Tabelle 6-27: | Anschaffungskosten und Gesamtenergieerträge in Abhängigkeit der Generatorleistung | 111 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 6-28: | Intervall: Variation der Generatorleistung..... | 112 |
| Tabelle 6-29: | Intervall: Variation der Projektrisikokosten (grau: GICON®-Basiswert)..... | 113 |
| Tabelle 6-30: | Kostenkalkulation der Kabel bei Variation der Wassertiefe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 114 |
| Tabelle 6-31: | Seillängen und Kosten bei Variation der Wassertiefe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 115 |
| Tabelle 6-32: | Intervall: Variation der Gesamtinvestitionskosten über die Wassertiefe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 116 |
| Tabelle 6-33: | Vertikalrohrkosten bei Variation der Wellenhöhe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 117 |
| Tabelle 6-34: | Intervall: Variation der Wellenhöhe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 117 |
| Tabelle 6-35: | Verlängerung der Lebensdauer - Fallsituationen a) bis e)..... | 119 |
| Tabelle 6-36: | Eingabevariablen mit Intervallgrenzen für die lokale Sensitivitätsanalyse..... | 120 |
| Tabelle 6-37: | Berechnung der jährlichen inflationsbedingten Betriebskosten..... | 121 |
| Tabelle 6-38: | Berechnung der Barwerte für $i = 6,17\%$ | 122 |
| Tabelle 6-39: | Intervall: Gesamterlöse aus dem Verkauf (grau: GICON®-Basiswert)..... | 131 |
| Tabelle 6-40: | SGK in Abhängigkeit von der Küstenentfernung für das SOF 2 (grau: GICON®-Basiswert)..... | 134 |
| Tabelle 6-41: | SGK in Abhängigkeit von der Generatorleistung (Basiswert: 6,0 MW)..... | 135 |
| Tabelle 6-42: | Stromgestehungskosten in Abhängigkeit von der Wassertiefe (grau: GICON®-Basiswert)..... | 137 |
| Tabelle 6-43: | SGK in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung - Fall a)..... | 138 |
| Tabelle 6-44: | SGK in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung - Fall b)..... | 138 |
| Tabelle 6-45: | SGK in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung - Fall c)..... | 139 |
| Tabelle 6-46: | SGK in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung - Fall d)..... | 139 |
| Tabelle 6-47: | SGK in Abhängigkeit der Lebensdauerverlängerung - Fall e)..... | 139 |
| Tabelle 6-48: | Ergebniszusammenfassung für die lokalen Sensitivitätsanalysen..... | 142 |
| Tabelle 6-49: | Konstellationsmöglichkeiten K_i für die globalen Sensitivitätsanalysen | 145 |
| Tabelle 6-50: | MS VISUAL BASIC®-Quelltext für globale Sensitivitätsanalysen..... | 146 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 6-51: | Darstellung der Klassen und der Häufigkeiten für die Konstellation (K_1) | 148 |
| Tabelle 6-52: | Darstellung der Klassen und der Häufigkeiten für die Konstellation (K_2) | 151 |
| Tabelle 6-53: | Darstellung der Klassen und der Häufigkeiten für die Konstellation (K_3) | 153 |
| Tabelle 6-54: | Darstellung der Klassen und der Häufigkeiten für die Konstellation (K_4) | 155 |
| Tabelle 6-55: | Darstellung der Klassen und der Häufigkeiten für die Konstellation (K_5) | 157 |
| Tabelle 6-56: | Minimale und maximale SGK für die Konstellationen (K_1) bis (K_5) .. | 159 |
| Tabelle 7-1: | Übersicht: Stand und Prognose der SGK für schwimmende Gründungskonzepte (in Anlehnung an [92]) | 165 |
| Tabelle 7-2: | Kapitalwertmethode am SOF 2 nach dem EEG 2014 Basismodell | 166 |
| Tabelle 7-3: | Kapitalwertmethode am SOF 2 nach dem EEG 2014 Basismodell - Fortsetzung | 167 |
| Tabelle 7-4: | Kapitalwertmethode am SOF 2 nach dem EEG 2014 Stauchungsmodell..... | 167 |
| Tabelle 7-5: | Kapitalwertmethode am SOF 2 nach dem EEG 2014 Stauchungsmodell - Fortsetzung | 168 |
| Tabelle 7-6: | Kapitalwertmethode am optimierten SOF 2 nach dem EEG 2014 Basismodell | 169 |
| Tabelle 7-7: | Kapitalwertmethode am optimierten SOF 2 nach dem EEG 2014 Stauchungsmodell..... | 170 |

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis allgemein

| | |
|------------|--|
| AEP | jährlicher Energieertrag (engl.: Annual Energy Production) |
| ANSYS | Analysis System |
| AWZ | Ausschließliche Wirtschaftszone |
| BK | Betriebskosten |
| CAPEX | Investitionskosten (engl.: CAPital EXpenditure) |
| CFR | Kosten und Fracht (engl.: Cost and FReight) |
| CMS | Überwachungssystem (engl.: Condition Monitoring System) |
| DB | Entwurfsgrundlage (engl.: Design Basis) |
| DDP | Risikoprüfung (engl.: Due-Diligence-Process) |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EEG | Erneuerbare-Energie-Gesetz (Fassungen: 2014/2017) |
| EVU | Energieversorgungsunternehmen |
| FOB | frei an Bord/vereinbarter Verladehafen (engl.: Free On Board) |
| GW | Gigawatt |
| H_D | Bemessungswert der Wellenhöhe (engl.: design wave height) |
| $H_{p,50}$ | Bemessungswert der 50-Jahres-Wellenhöhe (engl.: design wave height) |
| IK | Investitionskosten |
| Incoterms | Internationale Handelsklauseln im konventionellen Schiffsverkehr |
| kW(h) | Kilowatt(stunden) |
| (L)COE | durchschnittliche Stromgestehungskosten (engl.: Levelized Cost Of Electricity) |
| LS-DYNA | Finite-Elemente-Software |
| MW(h) | Megawatt(stunden) |
| NKF | Nettokapazitätsfaktor |
| OAT | One-At-a-Time-Methode |
| O&M | Operation & Maintenance |
| OPEX | Betriebsskosten (engl.: OPERational EXpenditure) |
| OffWEA | Offshore-Windenergieanlage |
| OffWP | Offshore-Windpark |
| OnWP | Onshore-Windpark |
| p. a. | jährlich (engl.: per anno) |
| piUW | parkinternes Umspannwerk |
| SA | Sensitivitätsanalyse |
| SGA | Schwergewichtsanker |
| SGK | Stromgestehungskosten |
| SOF | Schwimmendes Offshore Fundament |
| TLP | zugspannungsverankerte Plattform (engl.: Tension-Leg-Platform) |
| UHPC | ultra hochfester Beton (engl.: Ultra High Performance Concrete) |
| UVP | Umweltverträglichkeitsprüfung (engl.: Environmental Impact Assessment) |
| WACC | Gewichteter durchschnittlicher Kapitalkostensatz (engl.: Weighted Average Cost of Capital) |
| WEA | Windenergieanlage |
| WKA | Windkraftanlage |

Abkürzungsverzeichnis der Unternehmen/Institutionen

| | |
|-----------------|--|
| BMVJ | Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz |
| BMWI | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| BOEM | Bureau of Ocean and Energy Management |
| BSH | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie |
| DOE | Department of Energy |
| ESG | Edelstahl und Umwelttechnik Stralsund GmbH |
| GICON® | Großmann Ingenieur Consult GmbH |
| GLC | Glücksburg Consulting Group |
| HSVA | Hamburgische Schiffsbau-Versuchsanstalt |
| IFREMER | Institut français de Recherche pour l'exploitation de la mer |
| ISE | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme |
| IWR | Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien |
| MARIN | Maritime Research Institute Netherlands (Wageningen) |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| PRINCIPLE POWER | US Technologieunternehmen |
| STATOIL | Börsennotierter norwegischer Öl- und Gaskonzern |
| SVA | Schiffsbau-Versuchsanstalt Potsdam |
| TUBAF | Technische Universität Bergakademie Freiberg |
| URO | Universität Rostock |

Symbolverzeichnis

Finanzmathematische und technische Symbole

| | |
|------------------------------|--|
| A | Diskontierte jährliche Betriebskosten |
| a | Annuität |
| A_{Rotor} | überstrichene Querschnittsfläche des Rotors |
| A_t | Nicht-diskontierte jährliche Betriebskosten |
| ANF | Annuitätenfaktor |
| BK_{\emptyset} | durchschnittliche Betriebskosten |
| Br_{VStd} | Bruttovolllaststunden |
| Br_{WE} | Bruttowindertrag |
| C_0 | Kapitalwert |
| FK | Marktwert des Fremdkapitals |
| G_{Std} | Gesamtjahresstunden |
| EK | Marktwert des Eigenkapitals |
| E_t | Erlös zum Zeitpunkt t |
| i | realer kalkulatorischer Zinssatz (Kapitalkostensatz) |
| I_0 | Investitionsausgaben |
| k_{FK} | Verzinsungsanspruch der Fremdkapitalgeber |
| k_{EK} | Verzinsungsanspruch der Eigenkapitalgeber |
| K_t | Kosten zum Zeitpunkt t |
| L_n | Liquiditäts-/Resterlös der Anlage zum Endzeitpunkt n |
| $l_{\text{neu},l}$ | Erneuerungsinvestition zum Zeitpunkt l |
| M_{el} | jährliche Stromerträge |
| n | Wirtschaftliche Nutzungsdauer/Lebensdauer |
| Ne_{WE} | Nettowindertrag |
| NKF | Nettokapazitätsfaktor |
| P_{WEA} | Generatorleistung der WEA |
| t | Jahr der Nutzungsperiode |
| V | Unternehmensgesamtwert |
| V_{Std} | Volllaststunden |
| $V_{\text{Std},\text{Jahr}}$ | Gesamtjahresstunden |
| VP_n | Vergütungspreis über die Nutzungsdauer |
| VRK | Vertikalrohrkosten |
| VS_{BK} | Betriebskostenverrechnungssatz |
| v_{Wind} | Windgeschwindigkeit am Standort der WEA |
| Z_t | Zahlungsstrom zum Zeitpunkt t (engl.: cashflow) |
| a_t | Verfügbarkeit im Jahr t |
| β_{BK} | Betriebskostensteigerung im Jahr t |
| η | Wirkungsgrad / Verfügbarkeit der WEA |
| ρ_L | Luftdichte |