

# Logistiksznarien für die Errichtung von Offshore-Windparks

Herausforderungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung neuer Logistikkonzepte

Stephan Oelker, Marco Lewandowski, Abderrahim Ait Alla, Jan-Hendrik Ohlendorf, Andreas F. Haselsteiner, Universität Bremen

## Logistics Scenarios for the Construction of Offshore Wind Parks

Wind energy has become an established technology for the generation of electricity from renewable energies. However, suitable sites for the installation of onshore wind turbines are limited or often already developed. Consequently, offshore wind energy will play a key role in the future of renewable energy production. Especially in implementing the turnaround of energy policy. The installation of offshore wind farms is comparatively complex and expensive due to the harsh weather conditions and the limited availability of resources. Therefore, new concepts for the construction of offshore wind parks have to be developed and evaluated. However, classical planning tools reach their limits due to such complex problems. This gap can be closed by means of a process simulation.

### Keywords:

erection of offshore wind turbines, installation concepts, feasibility study, simulation, feeder vessel concept

Die Windenergie hat sich zu einer etablierten Technologie für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien entwickelt. Allerdings sind in Deutschland geeignete Flächen für die Installation von Onshore-Windenergieanlagen beschränkt bzw. häufig schon bebaut. Folglich werden Offshore-Windenergieparks in Zukunft eine Schlüsselrolle für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien darstellen, auch in Hinblick auf eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende. Die Installation eines Offshore-Windparks ist aufgrund der rauen Wetterbedingungen und der begrenzten Verfügbarkeit von Ressourcen jedoch anspruchsvoll und kostenintensiv. Dementsprechend gilt es, neue Konzepte für die Errichtung von Offshore-Windparks zu entwickeln und zu evaluieren, wobei hier die klassischen Werkzeuge zur Bewertung an ihre Grenzen stoßen. Diese Lücke lässt sich mittels einer Ablaufsimulation schließen.

Weltweit haben sich die Industrienationen auf die Reduzierung der Emissionen zur fossilen Energieerzeugung geeinigt, um gegen den globalen Klimawandel zu wirken.

ein wichtiger Faktor für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sein [3].

In diesem Zusammenhang wird der Ausbau nachhaltiger Energieinfrastrukturen forciert, woraus eine stetig steigende Wachstumsrate an erneuerbaren Energien in den letzten Jahren resultiert [1]. Unter den Technologien, die für die Stromerzeugung aus regenerativen Rohstoffen genutzt werden, wird die Windenergie aufgrund der hohen Windverfügbarkeit sowie der technologisch ausgereiften Anlagen häufig eingesetzt [2].

Auch in der deutschen Nord- und Ostsee schreitet der Ausbau der Windenergie voran. Somit scheint das Ziel der Bundesregierung von 6,5 Gigawatt installierter Offshore-Windenergieleistung bis 2020 realistisch [4]. Im ersten Halbjahr 2016 konnte die Anlagenzahl auf insgesamt 835 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 3.552,22 MW erhöht werden und die im Bau oder in der Planung befindlichen Projekte zeigen auf, dass das Ziel bei gleichbleibender Entwicklung der Errichtungszahlen erreicht werden wird [4]. Allerdings sind die Stromgestehungskosten für die Erzeugung von Energie auf dem Wasser im Vergleich zu anderen Technologien, insbesondere im Vergleich zur Onshore-Windenergie, wesentlich höher [5]. Dies ist ein Resultat aus den großen Unsicherheiten auf See, die insbesondere durch die kaum vorhersehbaren Wetterbedingungen hervorgerufen werden. Die Offshore Stiftung geht davon aus, dass eine Kostenreduktion bezogen auf die Stromgestehungskosten von über 3 % im gesamten Installationsprozess

Im Vergleich zu Offshore-Windenergieparks sind die Flächen für die Errichtung neuer Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland häufig bereits bebaut. Zudem können Offshore-Windenergieanlagen aufgrund konstanterer und höherer Windbedingungen auf See deutlich mehr Strom produzieren. Folglich wird die Offshore-Windenergieerzeugung in Zukunft

Dipl.-Wi.-Ing. Stephan Oelker ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer und logistischer Systeme an der Universität Bremen.

Dipl.-Wi.-Ing. Marco Lewandowski ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bremen und leitet das Demonstrations- und Anwendungszentrum LogDynamics Lab.

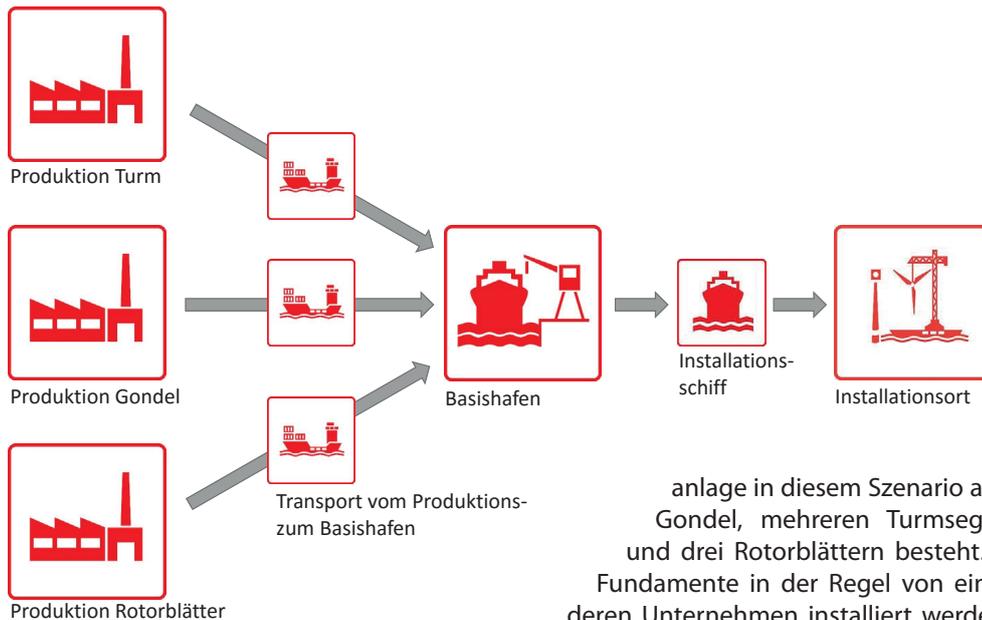
Dipl. Inf. Abderrahim Ait Alla ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen.

Dr.-Ing. Jan-Hendrik Ohlendorf ist Abteilungsleiter am Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK) an der Universität Bremen.

Andreas F. Haselsteiner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIK an der Universität Bremen.

oel@biba.uni-bremen.de  
www.psp.uni-bremen.de

Bild 1: Klassische Transportkette (angelehnt an [8]).



möglich ist [6]. Allerdings sind auch die Installationsprozesse stark von den Wetter- und Seebedingungen abhängig, die zu deutlichen Verzögerungen und erhöhten Kosten im Installationsprozess führen können. Dies macht die Installation von Offshore-Windenergieanlagen zu einem komplexen Planungsproblem.

Vor diesem Hintergrund müssen die verfügbaren Ressourcen möglichst optimal ausgelastet und dementsprechend neue Konzepte für die Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen weiterentwickelt und evaluiert werden. Es gilt jedoch, zu ermitteln, welche Potenziale durch die Installation mit solchen Konzepten gehoben werden können, da die technische Realisierbarkeit weitere Investitions- bzw. Entwicklungskosten verursacht. Für die monetäre Beurteilung stoßen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Form von Investitionsrechnungen oder Kosten- und Leistungsrechnungen aufgrund der Komplexität der Prozesse und den Restriktionen an ihre Grenzen. Um dennoch eine aussagekräftige Bewertung vornehmen zu können, eignen sich Simulationswerkzeuge mit denen risikobehaftete Prozesse als Zufallsvariable identifiziert werden können [7].

### Mögliche Szenarien für die Errichtung von Offshore-Windparks

Bei dem in leichten Abwandlungen derzeit angewendeten Verfahren zur Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen wird jeweils ein Installationsschiff und Basishafen genutzt (Bild 1). Zu Beginn des Installationsprozesses wird der Basishafen mit den Komponenten einer Windenergieanlage in der Regel über den Wasserweg beliefert, wobei eine Windenergie-

anlage in diesem Szenario aus einer Gondel, mehreren Turmsegmenten und drei Rotorblättern besteht. Da die Fundamente in der Regel von einem anderen Unternehmen installiert werden, werden diese hier nicht betrachtet. Anschließend beginnt der eigentliche Installationsprozess. Dafür fährt das Installationsschiff den Basishafen an und wird mit den Komponenten für die Errichtung mehrerer Windenergieanlagen beladen. Danach fährt es zu dem Installationsort, wobei hierbei eine Fahrt zehn und mehr Stunden dauern kann.

Nachdem das Installationsschiff im zu errichtenden Windpark angekommen ist und die Wetterbedingungen günstig sind, werden die Windenergieanlagen nacheinander errichtet. Bei dem Installationsschiff handelt es sich um eine sogenannte „Jack-Up-Barge“, welche sich mit Standbeinen aus dem Wasser „hochjacken“ kann. Hierdurch steht das Installationsschiff sicher über der Wasseroberfläche. Der Installationsprozess findet somit von einer ruhenden Plattform aus statt. Nach Installation der Anlagen kehrt das Installationsschiff wieder zum Basishafen zurück und lädt neue Komponenten für die Errichtung weiterer Windenergieanlagen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Fahrzeiten zwischen Basishafen und Installationsort sowie die Beladung des Installationsschiffs mit neuen Komponenten einen erheblichen Anteil im Gesamtprozess einnehmen. Zudem ist die Charrate für ein Installationsschiff sehr hoch und liegt je nach Fähigkeit zwischen 70.000 und 145.000 € pro Tag [9]. Dementsprechend muss diese Ressource möglichst effizient eingesetzt werden. Daher gilt es, lange Leerfahrten zu vermeiden und das Installationsschiff direkt im Windpark mit Komponenten zu versorgen sowie die Vermeidung einer längeren Lagerung von Komponenten im Basishafen. Weiterhin kann bei einer solchen Versorgungsstrategie auch das Konzept des Basishafens überdacht werden. Beim

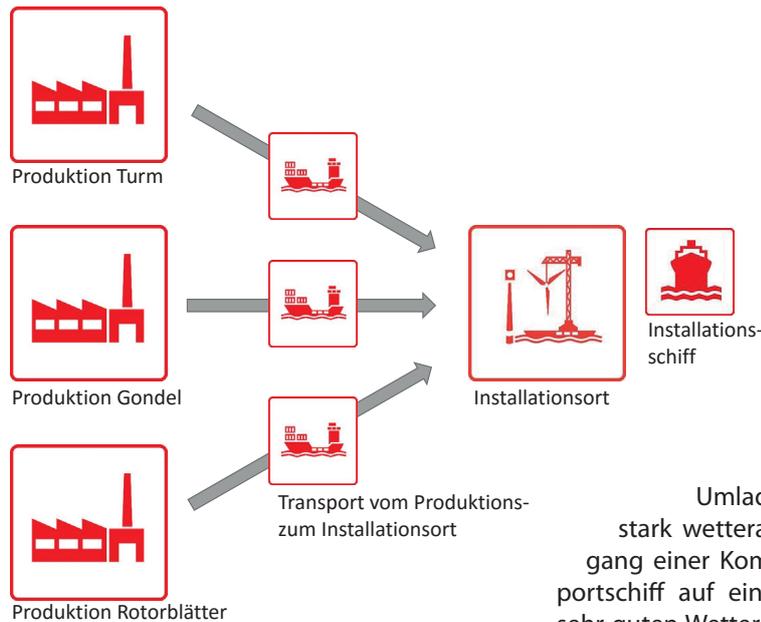


Bild 2: Klassisches Feederschiffkonzept.

derzeitigen Ablauf werden alle Komponenten vom Fertigungsort mit Transportschiffen zum Basishafen gebracht und dort zunächst gelagert, wodurch hohe Kosten für die Lagerhaltung der Komponenten entstehen. Auch hier liegen große Einsparpotenziale vor.

Bei der Installation der Anlagen gilt es, das Installationsschiff möglichst effektiv einzusetzen. Daher bestehen Ansätze, die Leerfahrten des Installationsschiffs zwischen dem Basishafen und dem Windpark zu vermeiden, indem vergleichsweise kostengünstige Transportschiffe – die Charraten liegen derzeit zwischen 10.000 und 20.000 € pro Tag [10] – das Installationsschiff am Installationsort mit den notwendigen Komponenten beliefern. Dieses Konzept wird Feederschiffkonzept genannt und ist in Bild 2 dargestellt. So kann das Installationsschiff effektiver am Installationsort für die Errichtung der Windenergieanlagen genutzt werden. Zudem kann bei solch einem Konzept auf den Einsatz eines Basishafens verzichtet werden, da die Transportschiffe direkt im Produktionshafen beladen werden und von dort aus zum Installationsort fahren könnten. Hierdurch können Kosten für die Dienstleistungen im Basishafen eingespart werden.

Als alternatives Konzept und zur Vereinfachung der Problemstellung des Umladens vom Transportschiff auf das Installationsschiff wäre es zudem denkbar, dass dieser Prozess nicht direkt am Installationsort vorgenommen wird. Stattdessen würden sowohl das Transportschiff als auch das Installationsschiff eine sichere Umladezone anfahren. Diese könnte ein nah gelegener Hafen oder eine geschützte Flussmündung mit relativ stabilen Wetterbedingungen sein. Das Installationsschiff müsste

so zwar auch den Weg vom Installationsort zur Umladezone zurücklegen, jedoch wäre das Risiko beim Umladen aufgrund der deutlich besseren Wetterbedingungen deutlich verringert. Ebenso wäre die Fahrtzeit geringer als bei der Anfahrt des Basishafens.

Allerdings ist insbesondere das Konzept zur Umladung am Installationsort stark wetterabhängig, sodass der Übergang einer Komponente von einem Transportschiff auf ein Installationsschiff nur bei sehr guten Wetterbedingungen möglich wäre. Da die hierfür benötigten Wetterfenster kaum auftreten, existieren bislang noch keine Erfahrungswerte für die Durchführung des beschriebenen Konzepts [11]. Zum einen gilt es daher, Systeme zu entwickeln, die eine Umladung auch bei schlechteren Wetterbedingungen ermöglichen, zum anderen muss grundlegend überprüft werden, ob die Umsetzung eines solchen Konzepts wirtschaftlich ist. Beispielsweise muss analysiert werden, bis zu welchen Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten ein solches System einsetzbar sein müsste, um signifikante Einsparungen zu ermöglichen. Ein weiterer Faktor, der die Komplexität des Problems erhöht, ist, dass verschiedene Schiffstypen mit unterschiedlichen Decklayouts bzw. Ladekapazitäten für den Transport eingesetzt werden können. Das Problem der Synchronisation zwischen verschiedenen Transportprozessen macht das Planungsproblem noch vielschichtiger. Hierbei muss gewährleistet werden, dass die Ressourcen gleichzeitig und synchron die Umschlagoperationen durchführen, um unnötige Wartezeiten zu vermeiden und weitere Einsparungen zu ermöglichen. Aufgrund der beschriebenen Komplexität des Errichtungsprozesses lässt sich dieser nicht oder nur unzulänglich mit den klassischen Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abbilden.

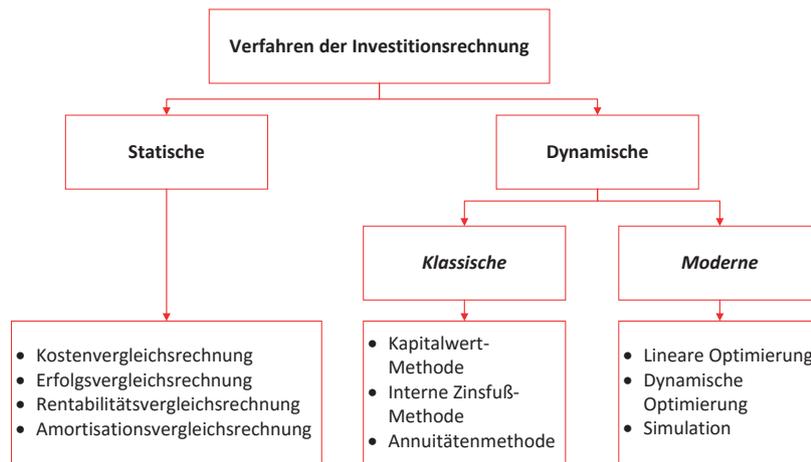
### Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Anwendung

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung handelt es sich um sogenannte Planungsrechnungen, mit deren Hilfe bestimmt werden kann, ob Investitionen langfristig von Vorteil sind [7]. Dabei können Investitionsrechnungen oder Kosten- und Leistungsrechnungen angewendet

werden. Die Kosten- und Leistungsrechnung erfasst die anfallenden Kosten und verteilt diese auf die hergestellten Produkte. Dies ermöglicht eine Kosten- und Preiskalkulation basierend auf einem kurz- bis mittelfristigen Abbildungshorizont. Im vorliegenden komplexen Planungsfall sollen komplette Installationsverfahren über einen langfristigen Planungshorizont betrachtet werden, wodurch die Kosten- und Leistungsrechnung für diesen Anwendungsfall kein geeignetes Verfahren darstellen [12]. Die Methoden, die zur Investitionsrechnung angewendet werden können, lassen sich in statische und dynamische Methoden unterteilen und sind in Bild 3 dargestellt.

Die statischen Verfahren beruhen auf Durchschnittswerten und werden im Allgemeinen zur Betrachtung und Beurteilung eines bestimmten Zeitraums eingesetzt. Da die statische Investitionsrechnung den Zeitfaktor nur unzureichend berücksichtigt, können diese Verfahren für die Problemstellung nicht angewendet werden [7]. Die dynamischen Verfahren lassen sich in klassische und moderne Verfahren kategorisieren. Grundsätzlich berücksichtigen dynamische Verfahren die zeitlichen Unterschiede der mit der Investition zusammenhängenden Ein- und Auszahlungen, da hier die Diskontierung berücksichtigt wird. Allerdings lassen sich keine komplexen Prozesse mit variablen Laufzeiten abbilden. Die modernen Verfahren ermöglichen hingegen die Berücksichtigung mehrerer Investitionsprojekte und betrachten ein Investitionsprogramm, wodurch Finanz-, Kapazitäts- oder Beschaffungsbegrenzungen berücksichtigt werden können. Hierbei rückt vor allem die Simulation in den Fokus, da mit diesem Verfahren risikobehaftete Prozesse und deren Durchlaufzeiten berücksichtigt und als Zufallsvariable betrachtet werden können [7].

Die Simulation ermöglicht virtuelle Experimente, mit welchen die Auswirkungen von Eingriffen in die Struktur oder in den Ablauf von Systemen aufgezeigt werden, ohne dass ein Schaden für das reale System entsteht. Gemäß VDI 3633 kann mittels Simulationen die Dynamik eines realen Systems in einem veränder-



baren Modell abgebildet werden. Dadurch ist es möglich Erkenntnisse zu gewinnen, die auf die Realität übertragen werden können [13]. Die Simulation umfasst somit die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung gezielter Experimente anhand eines Modells, wodurch die Analyse des zeitlichen Ablaufverhaltens vielschichtiger Systeme möglich wird [13]. Angewandt wird die Simulation, wenn die Wirkungszusammenhänge eines Systems zu komplex sind oder Experimente am realen System nicht möglich oder unwirtschaftlich sind. Die Ziele des Einsatzes können hierbei sehr unterschiedlich sein. In der Regel dient die Simulation jedoch der Unterstützung von Entscheidungsprozessen oder der Leistungsbewertung von Systemen [14]. Die grundsätzliche Vorgehensweise zum Aufbau einer Simulation ist in Bild 4 dargestellt, wobei ein System als simulationswürdig angesehen werden kann, wenn die Prozesse sehr komplex sind und eine geringe Transparenz vorliegt.

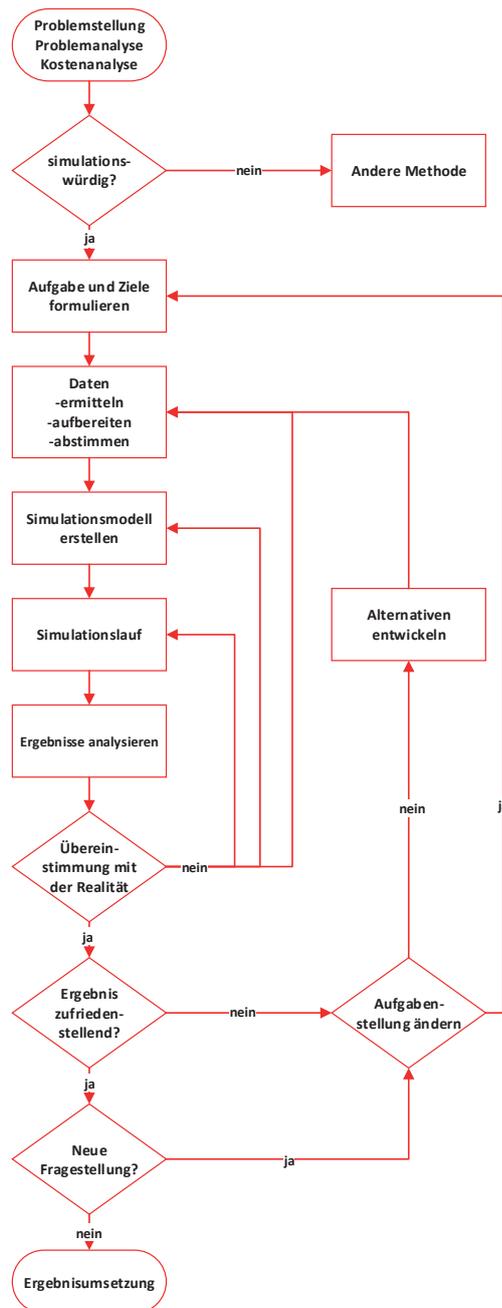
Grundsätzlich lässt sich die Installation eines Offshore-Windparks als simulationswürdig einstufen, da die Errichtung aufgrund der hohen Komplexität und Intransparenz der Prozesse in Kombination mit einer Vielzahl an Einflüssen und Abhängigkeiten als anspruchsvolles System eingestuft werden kann. Weiterhin wird die Durchführung der Installationsprozesse durch Unsicherheiten beeinflusst. Als Ziel kann formuliert werden, dass die vorgestellten unterschiedlichen Installationskonzepte miteinander verglichen werden und insbesondere eine Aussage über die Einsparungspotenziale des Feederschiffkonzepts gegenüber dem bisher eingesetzten Konzept getroffen werden kann. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch die Aufbereitung der für die Simulation benötigten Daten sowie die Entwicklung eines Kostenmodells. Bei den Daten sind dabei nicht nur die Prozessdaten und deren Unsicherheiten von Interesse, sondern auch Basisdaten

**Bild 3: Investitionsrechenverfahren (angelehnt an [7]).**

#### Literatur

- [1] Abdullah, M.; Muttaqi, K.; Agalgaonkar, A.: Sustainable energy systems design with distributed renewable resources considering economic, environmental and uncertainty aspects. In: Renewable Energy 78 (2015), S. 165-172.
- [2] Lynn, P. A.: Onshore and offshore wind energy: an introduction. Chichester UK 2011.
- [3] Rohrig, K.; Richts, C.; Bofinger u. a.: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende. Stiftung Offshore Windenergie. Berlin 2013.
- [4] Deutsche WindGuard: Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland. URL: <https://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/statistiken/factsheet-status-offshore-windenergieausbau-halbjahr-2016.pdf>, Abrufdatum 22.09.2016.
- [5] Kost, C.; Mayer, J.; Thomsen, J. u. a.: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Freiburg 2013.
- [6] Hobohm, J.; Krampe, L.; Peter, F.: Kostensenkungspotenziale der Offshore-Windenergie in Deutschland. Stuttgart Berlin 2013.
- [7] Zimmermann, W.; Fries, H.-P.; Hoch, G.: Betriebliches Rechnungswesen. Bilanz und Erfolgsrechnung; Kosten- und Leistungsrechnung; Wirtschaftlichkeits- und Investitionsrechnung. München 2003.
- [8] Ait Alla, A.; Quandt, M.; Beinke, T.; Freitag, M.: Improving the decision-making process during the installation process of offshore wind farms by means of information sharing. In: Chung, J.S.; Muskulus, M.; Kokkinis, T.; Wang, A. M. (Hrsg): Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE). Renewable Energy (Offshore Wind and Ocean) and Environment, Engineering Index, El Compendex. USA 2016.

**Bild 4: Aufbau einer Simulation (angelehnt an [13]).**



[9] Meyer, M.: Reeder von Offshore-Spezialtonnage müssen spekulativer vorgehen. Interview mit Philippe Schönfeld. In: HANSA International Maritime Journal 151 (2014) 10, S. 54-55.

[10] GLOBAL RENEWABLES SHIPBROKERS: Die letzten 5 Abschlüsse. URL: <http://www.grs-offshore.com/any-vessel-any-time/grs-research-services/>, Abrufdatum 23.09.2016.

[11] Thomsen, K. E.: Chapter Twelve - Vessels and Transport to Offshore Installations, In Offshore Wind, Elsevier, Boston 2012.

[12] Niemann, J.: Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen. Dissertation, Universität Stuttgart 2006.

[13] VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. 2013.

[14] März, L.; Rinne, A.; Haasis, H.-D.: Planning Maritime Logistics Concepts for Offshore Wind Farms: A Newly Developed Decision Support System. ICCL 2012: Computational Logistics, S.142-158.

[15] Eley, M.: Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges „Plant Simulation“. Berlin Heidelberg 2012.

[16] Lange, K.; Rinne, A.; Haasis, H.-D.: Planning Maritime Logistics Concepts for Offshore Wind Farms: A Newly Developed Decision Support System. ICCL 2012: Computational Logistics, S.142-158.

[17] Greiner, S.; Appel, S.; Joschko, P.; Renz, T.; Albers, H.: German Offshore Wind Operation Guide. URL: [http://www.hs-bremen.de/internet/forschung/projekte/detail/systop\\_gowog\\_20150630\\_webseite.pdf](http://www.hs-bremen.de/internet/forschung/projekte/detail/systop_gowog_20150630_webseite.pdf), Abrufdatum 26.09.2016.

in Hinblick auf die eingesetzten Schiffstypen sowie der Aufbau eines realitätsnahen Wettermodells. Zudem wird aus Bild 4 deutlich, dass die Simulation eng mit der Modellierung verbunden ist. Die Modellierung umfasst die Umsetzung eines Systems in ein experimentierfähiges Modell. Hierbei wird ein abstraktes Abbild eines Systems, das heißt einer Ansammlung von Elementen und deren Eigenschaften, die durch Wechselbeziehungen miteinander verbunden sind, geschaffen [15]. Basierend auf den aufbereiteten Daten gilt es dementsprechend, ein Simulationsmodell für die verschiedenen Konzepte zur Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen zu entwickeln, wobei

insbesondere die Konzepte der Umladung am Installationsort und in einem gesicherten Bereich überprüft werden sollen. Hierbei werden unterschiedliche Szenarien, also verschiedene Windparks mit unterschiedlicher Anlagenanzahl und Entfernung zum Hafen, betrachtet. Anschließend können Simulationsläufe durchgeführt werden, wobei die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft und, sofern möglich, mit der Realität verglichen werden müssen. Durch die Hinterlegung eines Kostenmodells, welches in Abhängigkeit zu den Prozesszeiten steht, lässt sich mittels der durchgeführten Simulation eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Konzepte treffen.

Das Werkzeug der Simulation ist natürlich nicht neu und wurde auch bereits im Bereich der Offshore-Windenergie eingesetzt. So gehen beispielsweise Lange et al. 2012 insbesondere auf die bereits genannten Schwierigkeiten, die bei der Errichtung der Anlage entstehen, ein [16] und Greiner et al. 2015 nutzen die Simulation zur Analyse des Betriebs der Anlagen [17].

### Zusammenfassung

Eine detaillierte Bewertung unterschiedlicher Errichtungskonzepte, verbunden mit Investitionen in technische Entwicklung, spielt für die Investitionsentscheidungen eine bedeutende Rolle. Ein erheblicher Teil der Stromgestehungskosten von Offshore-Windenergieanlagen entsteht bei der Errichtung. Die Betrachtung eines solch komplexen Systems führt dazu, dass klassische Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung an ihre Grenzen stoßen. Hinzu kommt, dass dieses auch noch stark von Unsicherheiten beeinflusst wird, welche sich direkt auf die Kosten und Erlöse auswirken. Bei solch vielschichtigen Problemstellungen bietet sich daher eine Simulation für die Bewertung der Alternativen an, da mit diesem Verfahren risikobehaftete Prozesse und deren Durchlaufzeiten als Zufallsvariable betrachtet und zudem Restriktionen berücksichtigt werden können.

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „SKILLS – Entwicklung und Demonstration eines schnellen und kosteneffizienten Errichtungskonzeptes von Offshore Windenergieanlagen“, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen „0325934B“ gefördert wird.*

Schlüsselwörter:

Errichtung Offshore-Windenergieanlagen, Installationskonzepte, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Simulation, Feederschiffkonzept