

# **Tool-basierte Analyse der Risiko-Performance von Offshore-Windenergieprojekten**

## **Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M. Sc.)“  
im Studiengang Wirtschaftswissenschaft der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät  
der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Pathé



Vorname: Philipp



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 30. September 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstrakt</b> .....	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Forschungshintergrund</b> .....	<b>3</b>
2.1. Literaturüberblick, Forschungslücke und -frage .....	4
2.2. Forschungsdesign.....	10
<b>3. Decoupled Net Present Value</b> .....	<b>12</b>
3.1. Synthetic Insurance Premiums.....	12
3.2. Risiko-Neutralitäts-Level.....	15
3.3. Implizierte risiko-adjustierte Diskontierungsrate .....	16
3.4. Finanz- und Risiko-Performance .....	17
<b>4. Modell für die Evaluation eines Offshore-Windenergieprojektes</b> .....	<b>18</b>
4.1. Cashflow-Modell .....	20
4.2. Identifizierung der Projektrisiken .....	32
4.3. Monte-Carlo-Simulation .....	41
4.4. Iman-Conover-Methode.....	42
<b>5. Entscheidungsunterstützungssystem</b> .....	<b>45</b>
5.1. System-Architektur .....	45
5.2. Benutzerhandbuch.....	47
<b>6. Fallstudien</b> .....	<b>53</b>
6.1. Input-Daten .....	53
6.2. Exemplarische Berechnung der SIPs .....	71
6.3. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation .....	75
6.4. Sensitivitätsanalyse .....	83
<b>7. Diskussion und Limitationen</b> .....	<b>86</b>
7.1. Diskussion der Finanz- und Risiko-Performance der Fallstudien .....	87
7.2. Anforderungen und Limitationen des EUS.....	96
<b>8. Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>99</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>102</b>
<b>A Grafische Oberfläche</b> .....	<b>118</b>
<b>B Quellcode</b> .....	<b>138</b>
B.1 Main Application .....	138
B.2 Functions.....	173
B.3 Graphical User Interface .....	189

## **Abstrakt**

Aufgrund ihrer Simplizität ist der „Discounted Cashflow“-Ansatz die weitverbreitetste Methode bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Offshore-Windenergieprojekten. Dabei werden alle Risiken, die mit dem Projekt assoziiert werden, in einer Risikoprämie aggregiert und mit dem risikofreien Zinssatz zu einer konstanten Diskontierungsrate zusammengefasst. Die Synthese aus dem Zeitwert des Geldes und dem Risiko kann insbesondere bei langfristigen Projekten zu insuffizienten Analysen und demnach falschen Investitionsentscheidungen führen. Vor dem Hintergrund sinkender Investitionsbereitschaften seitens der Finanziere stellt dies ein Problem bei der Expansion erneuerbarer Energien dar. Im Kontext von Offshore-Windenergieprojekten werden aufgrund des fehlenden Verständnisses für die komplexe Risikostruktur häufig Investitionen vermieden. Für eine umfassendere Evaluation der Investitionsrisiken wird in dieser Arbeit ein Entscheidungsunterstützungssystem auf Basis der neuartigen Methode des sogenannten „Decoupled Net Present Value“ entwickelt. Bei diesem Ansatz wird der Zeitwert des Geldes von den Risiken eines Projektes entkoppelt, in dem die individuellen Risiken explizit als Kosten quantifiziert werden. Dazu werden die Risiken mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation zu probabilistischen Verteilungen modelliert. Zusätzlich wird der konventionelle Kapitalwert und der mit ihm eng verbundene interne Zinsfuß implementiert. Darüber hinaus werden zur Bewertung der Schuldendienstfähigkeit der Schuldendienstdeckungsgrad, Darlehenszeitdeckungsgrad und Projektlaufzeitdeckungsgrad in das Entscheidungsunterstützungssystem integriert. Dies ermöglicht insgesamt die Gegenüberstellung der Finanz- und Risiko-Performance eines Projektes und bietet somit für Fremd- und Eigenkapitalgeber methodische Unterstützung bei Investitionsentscheidungen. Die Möglichkeiten und Limitationen des Entscheidungsunterstützungssystems werden anhand von Fallstudien mit fiktiven deutschen Offshore-Windparks aufgezeigt, illustriert und diskutiert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Diskrepanz zwischen Finanz- und Risiko-Performance. Durch eine einheitliche Diskontierungsrate können die individuellen periodischen Risiken nicht repräsentiert werden und in der Folge werden sie insgesamt als zu hoch bewertet.

**Schlüsselwörter:** Offshore-Windenergie, Entscheidungsunterstützungssystem, Decoupled Net Present Value, Monte-Carlo-Simulation

## 1. Einleitung

Die Entwicklung und Expansion erneuerbarer Energien ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Bekämpfung des Klimawandels. Der Wandel von öl- und kohlebasierten Energiesystemen hin zu der Stromgewinnung auf Basis erneuerbarer und nachhaltiger Energiequellen hat bereits in vielen Ländern begonnen.<sup>1</sup> Dieser Wandel wird von einigen Regierungen, nicht zuletzt durch die Reaktorkatastrophe in Fukushima und die daraus sinkende Akzeptanz für Atomkraftwerke und weiteren klassischen Energiesystemen, forciert.<sup>2</sup> Auch durch Vereinbarungen über eine beschleunigte Expansion regenerativer Energien sowie das Verbessern der Effizienz von Energiesystemen seitens der G7 und G20 werden diese Entwicklung international unterstützt. Darüber hinaus haben sich eine Vielzahl der Länder auf der UN-Klimakonferenz in Paris 2015 zu einer Fokussierung des Ausbaus erneuerbarer Energien verpflichtet.<sup>3</sup>

Die bekanntesten Arten regenerativer Energien sind die Bereitstellung des Stroms aus Wasserkraft, Photovoltaik und Windenergie. Letztere bietet als Einzige die Möglichkeit, auch auf dem Meer Strom zu produzieren. Seit Ende des Jahres 2015 sind im Kontext der Offshore-Windenergie weltweit über 12 GW Kapazität installiert – davon sind alleine 91 % in den Küstenregionen europäischer Staaten angesiedelt. Aus globaler Sicht sind in Bezug auf die installierte Leistung mit über 40 % das Vereinigte Königreich von Großbritannien und Nordirland, gefolgt von Deutschland mit etwa 27 % sowie Dänemark mit 10,5 % und als nicht-europäischer Staat China mit 8,4 % zu nennen.<sup>4</sup>

Ein Vorteil der Offshore-Windenergie gegenüber der Onshore-Energie sind die konstanten und höheren Windgeschwindigkeiten. In der Folge operieren die Windkraftanlagen zu einem höheren Prozentsatz an ihrer maximalen Nennleistung.<sup>5</sup> Gleichzeitig ist die komplexe Installation mit diversen Risiken und die höheren relativen Kosten eine der größten Herausforderung für die Offshore-Windenergie.<sup>6</sup> Aufgrund der großen Investitionsvolumina ist eine hohe Anzahl an Fremd- und Eigenkapitalgebern notwendig, um ein Offshore-Windprojekt zu realisieren.<sup>7</sup> Das Erreichen der umweltpolitischen Ziele erfordert einen kontinuierlichen Ausbau der Offshore-Windenergie.<sup>8</sup> Jedoch sind die Finanziers in der Regel risikoavers, weshalb sich die Suche nach

---

<sup>1</sup> Vgl. Biegel et al. (2014), S. 354.

<sup>2</sup> Vgl. Köcher (2011).

<sup>3</sup> Vgl. Zervos (2016), S. 17.

<sup>4</sup> Vgl. GWEC (2016), S. 47.

<sup>5</sup> Vgl. Snyder und Kaiser (2009a), S. 1569.

<sup>6</sup> Vgl. GWEC (2016), S. 47.

<sup>7</sup> Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016a).

<sup>8</sup> Vgl. Montes et al. (2011), S. 4746.

ihnen häufig als schwierig erweist.<sup>9</sup> Aus den risikoaversen Fremd- und Eigenkapitalgebern einerseits und den Zielvorgaben verschiedener Institutionen für den Ausbau einer nachhaltigen Offshore-Windenergie andererseits droht eine Finanzierungslücke zu entstehen.<sup>10</sup>

Bei großen Infrastrukturprojekten, wie Offshore-Windparks, werden Investitionsentscheidungen vielfach mithilfe der traditionellen Methode der abgezinnten Cashflows (DCF = *discounted cash flows*) getroffen.<sup>11</sup> Dabei führt häufig das Missverständnis der individuellen Risikostruktur eines Offshore-Windenergieprojektes und der Interaktion einzelner Risiken sowie der Verwendung eines gemischten Kapitalkostensatzes zu insuffizienten Analysen und kann somit zu falschen Investitionsentscheidungen führen.<sup>12</sup>

Um den Finanziers eine Möglichkeit zu geben, die Potenziale und Risiken im Voraus zu evaluieren, wird in dieser Arbeit auf Basis des von Espinoza (2014) neuartig kreierten Ansatzes des *Decoupled Net Present Value* (DNPV) ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) entwickelt. Durch das explizite Quantifizieren der Risiken mit dieser Methode und der Implementierung etablierter Kennzahlen, welche die Rentabilität und die Schuldendienstfähigkeit des Projektes analysieren, kann die Risiko- und Finanz-Performance gegenübergestellt werden. Das EUS ist mit MATLAB programmiert und basiert auf einem deterministischen Cashflow-Modell, in das probabilistische Verteilungen integriert sind, welche anhand von identifizierten Risiken und unter Berücksichtigung von Periodenkorrelationen erstellt werden.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: Zunächst erfolgt in Kapitel 2 ein Überblick über die relevante Literatur, aus der die Forschungsfrage abgeleitet wird und anschließend die Charakterisierung des Forschungsdesigns entwickelt wird. In Kapitel 3 wird der theoretische Ansatz des DNPV nach Espinoza (2014) ausführlich dargestellt und erläutert. In dem folgenden Kapitel 4 wird ein Modell zur Evaluierung von Offshore-Windkraftanlagen entwickelt, welches insbesondere ein umfassendes Cashflow-Modell beinhaltet. Zudem werden Risiken identifiziert sowie deren Umsetzung mit der Monte-Carlo-Simulation (MCS) und die Korrelationen mit der Methode nach Iman-Conover (IC) erklärt. In Kapitel 5 wird die dem EUS zugrundeliegende System-Architektur dargestellt sowie mittels eines Benutzerhandbuchs durch die grafische Oberfläche (GUI = *graphical user interface*) geführt. Anschließend werden in Kapitel 6 Fallstudien entwickelt, welche mit dem EUS angewendet und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit analysiert werden. In Kapitel 7 erfolgt die Diskussion der Ergebnisse sowie etwaige Limitationen des EUS. Die Arbeit schließt mit den Schlussfolgerungen und einem Ausblick.

---

<sup>9</sup> Vgl. Handelsblatt (2012).

<sup>10</sup> Vgl. Rubel et al. (2013), S. 10 ff.

<sup>11</sup> Vgl. Espinoza und Rojo (2015), S. 44.

<sup>12</sup> Vgl. Montes et al. (2011), S. 4746 f.

mit einer großen Anzahl an Parallelisierungs-Tools, die mithilfe von Mehrkernprozessoren die Rechenzeit für datenintensive Probleme verringern.<sup>344</sup>

In Hinblick auf das EUS können durch das Programmieren des Tools mit MATLAB Akzeptanzprobleme entstehen. Zwar wird MATLAB auf den gängigen Betriebssystemen (Microsoft Windows, Max OS X und Linux) unterstützt, jedoch erfordert die Benutzung des EUS eine kostenpflichtige MATLAB-Lizenz. Zusätzlich müssen die ebenfalls gebührenpflichtigen Add-ons „Financial Toolbox“, „Optimization Toolbox“ und „Statistics and Machine Learning Toolbox“ erworben und installiert werden. Eine Lösung des Akzeptanzproblems kann die Erstellung einer Webanwendung sein. Dabei wird das EUS direkt von einem Server ausgeführt, so dass eine dezentrale Installation von MATLAB nicht mehr notwendig ist. Die Nutzer können somit direkt mit ihrem Browser auf die Webanwendung zugreifen. Hierfür eignet sich bspw. die *Open-Source-Software* Ruby on Rails, die eine Schnittstelle für das Integrieren des MATLAB-Programmiercodes bietet.

## 8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Interesse der Öffentlichkeit an einer nachhaltigen und ökologischen Energieversorgung hat im letzten Jahrzehnt stark zugenommen. Die Expansion und Entwicklung der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ist gleichzeitig die wichtigste Herausforderung im Kampf gegen den Klimawandel. Die Offshore-Windenergie kann dabei einen erheblichen Beitrag leisten, jedoch nimmt die Investitionsbereitschaft seitens der Finanziere tendenziell ab. Ein Grund hierfür ist das unzureichende Verständnis über die Risiken von Offshore-Windenergieprojekten und deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit. Konventionelle Wirtschaftlichkeitsanalysen für die Evaluierung von Infrastrukturprojekten basieren i. d. R. auf der DCF-Methode. Diese führt jedoch zu keiner adäquaten Berücksichtigung der individuellen, temporär auftretenden Risiken aufgrund der Vermischung des Zeitwertes des Geldes und des Risikos von einem Projekt in einer konstanten Diskontierungsrate. Um eine drohende Finanzierungslücke abzuwenden, wurde mit MATLAB ein EUS entwickelt, das die Wirtschaftlichkeit von Offshore-Windenergieprojekten evaluiert und dabei explizit den Fokus auf die Analyse der individuellen Risikostruktur legt.

Das EUS basiert auf der konventionellen DCF-Methode und ist erweitert um den neuartigen Ansatz des *Decoupled Net Present Value*. Mit diesem wird der Zeitwert des Geldes und das Risiko entkoppelt, indem die Risiken als Kosten in Form von sogenannter *Synthetic Insurance Premiums* quantifiziert werden. Für die Entwicklung des EUS wurde zunächst ein umfassendes Cashflow-Modell implementiert. In dieses sind mit dem NPV und IRR finanzielle Kennzahlen zur Analyse der Wirtschaftlichkeit integriert. Darüber hinaus wurden für die Bewertung der

---

<sup>344</sup> MathWorks (2016).

finanziellen Machbarkeit mit der DSCR, LLCR und PLCR Kennzahlen zur Schuldendienstfähigkeit eines Projektes implementiert. Der DNPV wurde mit dem probabilistischen Ansatz umgesetzt. Für die Berechnung der SIPs wurden zunächst risikobehaftete Parameter identifiziert und mittels der MCS als betaPERT-Verteilungen mit Zufallszahlen realisiert. Darüber hinaus wurde für die Berücksichtigung von Periodenkorrelationen die IC-Methode auf die Verteilungen angewendet. Insgesamt erlaubt das EUS somit die Bewertung eines Projektes aus zwei Perspektiven: der Risiko- und Finanzperformance. Somit bietet es sowohl für Fremd- als auch Eigenkapitalgeber methodische Unterstützung. Die benutzerfreundliche grafische Oberfläche ermöglicht es zudem, die Ergebnisse detailliert zu analysieren und visualisieren.

Für die Demonstration des EUS wurden realistische Fallstudien in der deutschen Nordsee entwickelt. Die Ergebnisse haben eine deutliche Diskrepanz zwischen Finanz- und Risiko-Performance offengelegt. Insgesamt waren die DNPVs in jeder Fallstudie explizit höher als die NPVs. Aus der Risikoperspektive impliziert dies, dass die Risiken bei der konventionellen DCF-Methode insgesamt überbewertet werden. Detailliert betrachtet erfolgt durch die DCF-Methode für Phasen vor der Inbetriebnahme, d. h. für die Entwicklung und Genehmigung sowie die Installation, und für die Phase der Stilllegung eine Unterbewertung der Risiken. Demgegenüber werden während des Betriebes des Windkraftparks die Risiken überbewertet. Als ein möglicher Grund wurden erhöhte Eigenkapitalanforderungen eruiert, die infolge einer unpräzisen und in Hinblick auf die Risiken undifferenzierten Herleitung des Betas im CAPM entstehen. Insgesamt ist eine Investition aus Eigenkapitalgeberperspektive aufgrund der positiven NPVs und DNPVs aller Fallstudien plausibel. Aus Sicht der Fremdkapitalgeber sprechen für eine Negation der Investition die DSCRs aller Fallstudien, die auch bei Verlängerung der Kreditperioden teilweise knapp unter den Mindestanforderungen liegen. Jedoch zeigen die LLCR und PLCR, dass über die Kreditlaufzeit respektive Projektlaufzeit eine Zurückzahlung der Darlehen sichergestellt ist. Folglich kann auch aus Sicht der finanziellen Machbarkeit das Bereitstellen von Darlehen seitens der Finanziers als realistisch betrachtet werden. Freilich kann auf Grundlage der Fallstudien keine allgemeingültige Aussage zur Risiko-Performance von Offshore-Windenergieprojekten getätigt werden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass aufgrund unterschiedlicher Quellen die Konsistenz der Daten nicht abschließend beurteilt werden kann.

Jedoch bestätigte sich bei der Berechnung der SIPs der aus der Literatur konstatierte hohe Einfluss des Wetters auf die Wirtschaftlichkeit eines Offshore-Windenergieprojektes. Neben dem Einfluss auf die Dauer und Kosten der Installation der Windkraftanlagen wurde insbesondere das Risiko aus der volatilen Windgeschwindigkeit als eines der höchsten Risiken quantifiziert. Folglich kann im Prozess des Risikomanagements und –controllings eine Versicherung gegen Wind als sinnvoll erachtet werden.

Bei einer Weiterentwicklung des EUS sollte für eine höhere Exaktheit eine Anpassung der länderspezifischen Parameter unter anderem im steuerrechtlichen Bereich erfolgen. Auch sollte eine Selektion verschiedener Verteilungsformen implementiert werden, um die Präzision der

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zu erhöhen. In diesem Kontext sollte bei weiteren Untersuchungen der Fokus auf die Exaktheit und Zuverlässigkeit der Ausgangsdaten gelegt werden, da die Qualität der Ergebnisse mit der Güte der Input-Daten kohärieren.

Für eine möglichst genaue Approximation der Verteilungen ist eine hohe Anzahl an Iterationen notwendig. Dies ist jedoch mit einer langen Rechenzeit verbunden, welche sich exponentiell mit einer Vergrößerung der Anzahl der Iterationen erhöht. Daher sollten für eine Verbesserung der Akzeptanz des EUS mögliche Parallelisierungsmethoden implementiert werden. Diese führen bei Mehrkernprozessoren zu einer Verringerung der Rechenzeit. Auch sollte für eine höhere Akzeptanz eine Webapplikation bspw. mit Ruby on Rails erstellt werden, sodass das EUS von den Nutzern über einen Server ausgeführt werden kann. Somit muss MATLAB nicht dezentral auf jedem Computer installiert werden, wodurch die Zugangsmöglichkeiten erhöht werden.

Insgesamt konnte aufgezeigt werden, dass innerhalb der Finanz- und Risiko-Performance eines Offshore-Windenergieprojektes deutliche Unterschiede bestehen. Durch das Quantifizieren der Risiken als Kosten mit der neuartigen Methode des DNPV werden für Fremd- und Eigenkapitalgeber die Risiken greifbarer und besser vergleichbar. Ergo kann insbesondere die individuelle und komplexe Risikostruktur eines Offshore-Windenergieprojektes verständlicher dargestellt werden. Auf diese Weise kann der DNPV-Ansatz dazu beitragen, potenzielle Fremd- und Eigenkapitalgeber zu gewinnen und einer Finanzierungslücke im Offshore-Wind vorzubeugen. Folglich kann das EUS einen wertvollen Beitrag im Risikomanagement- und Controlling und bei der Transformation der weltweiten Energiesysteme leisten.