

Realloptionsanalyse von Windenergieinvestments unter Berücksichtigung von
Unsicherheiten

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im
Studiengang Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik,
Fakultät für Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der
Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Velásquez Weiß



Vorname: Leo Sebastián



Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Michael H. Breitner

Hannover, den 30.09.2020

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Allgemeines zur Windenergie	7
2.1.	Historische Entwicklung der Windenergiegewinnung in Deutschland	7
2.2.	Grundlagen	9
2.2.1.	Aufbau einer Windenergieanlage.....	9
2.2.2.	Physikalische Grundlagen.....	11
3.	Stand der Wissenschaft	15
3.1.	Eingrenzung der Literatur.....	15
3.2.	Literaturanalyse.....	16
3.3.	Bewertungsmethoden in der Literatur	20
3.3.1.	Statische Investitionsrechenverfahren	20
3.3.2.	Dynamische Investitionsrechenverfahren	21
3.3.3.	Realloptionsanalyse.....	22
3.3.3.1.	Geometrischer Ereignisbaum.....	22
3.3.3.2.	Entscheidungsbaumverfahren	25
4.	Faktoren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit	29
4.1.	Energieertrag einer Windenergieanlage	29
4.1.1.	Standortspezifische Windverhältnisse	29
4.1.2.	Anlagenspezifische Leistungskennlinie	32
4.1.3.	Standortspezifischer Energieertrag.....	34
4.2.	Kosten einer Windenergieanlage	35
4.2.1.	Investitionskosten.....	36
4.2.2.	Betriebskosten	38
4.3.	Förderungsstrukturen gemäß EEG	39
4.3.1.	EEG 2000, 2004, 2009.....	40
4.3.2.	EEG 2012, 2014.....	42
4.3.3.	EEG 2017.....	45

5.	Wirtschaftlichkeitsanalyse	49
5.1.	Entwicklungsumgebung	49
5.2.	Datenquellen	50
5.2.1.	Marktstammdatenregister	50
5.2.2.	Deutscher Wetterdienst.....	50
5.3.	Auswahl der Standorte.....	51
5.4.	Faktoren zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit	54
5.4.1.	Weiterbetrieb.....	54
5.4.1.1.	Standortspezifische Windverhältnisse	55
5.4.1.2.	Anlagenspezifische Leistungskennlinie	57
5.4.1.3.	Jahresenergieertrag	59
5.4.1.2.	Ermittlung der Absatzpreiskomponente	60
5.4.2.	Repowering	61
5.4.2.1	Standortspezifische Windverhältnisse	61
5.4.2.2.	Anlagenspezifische Leistungskennlinie	61
5.4.2.3.	Jahresenergieertrag	63
5.4.2.4	Ermittlung der Investitionskosten	64
5.4.2.5.	Ermittlung der Absatzpreiskomponente	65
5.5.	Betriebskosten	68
5.6.	Kapitalwertmethode	69
5.7.	Realloptionsanalyse.....	74
6.	Fazit und Ausblick	82
7.	Literatur- und Quellenverzeichnis	83
8.	Abbildungsverzeichnis	90
9.	Tabellenverzeichnis	92
10.	Anhang	93
11.	Ehrenwörtliche Erklärung	109

1. Einleitung

Der Klimawandel ist zurzeit eines der am meisten diskutierten Themen in Deutschland sowie weltweit. Im Fokus der Diskussion steht die menschliche Einwirkung auf die Klimaänderung. Nahezu alle wissenschaftlichen Arbeiten sowie öffentliche akademische Institutionen im Bereich der Klimaforschung weisen auf die massive menschliche Beeinflussung und deren weitreichenden Folgen und Risiken hin. Den größten Einfluss hat dabei der Ausstoß von Treibhausgasen, welcher hauptsächlich durch die Nutzung fossiler Brennstoffe entsteht. Viele Länder haben daher in den letzten Jahren und Jahrzehnten Maßnahmen ergriffen und Gesetze erlassen, um dem entgegenzuwirken. Laut Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung wird zur Erreichung der Klimaziele „zu allererst eine Transformation hin zu einer kohlestoffarmen Wirtschaft“ (BMZ, 2016, p.10) benötigt. Hierbei spielt die flächendeckende Energieversorgung mit erneuerbaren Energien eine tragende Rolle. Um die Erzeugung erneuerbarer Energien zu fördern, wurde bereits Anfang der 90er Jahre in Deutschland das „Stromeinspeisungsgesetz“ (StromEinspG) erlassen. Dieses garantiert die sichere Abnahme und Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien, um somit Investments in ein - bis dato - unbekanntes Wirtschaftsfeld attraktiver zu gestalten. Das StromEinspG ist der Vorläufer des im Jahre 2000 in Kraft getretenen „Erneuerbare Energie Gesetz“ (EEG), welches mehrmals novelliert wurde und in diesem Jahr (2020) sein 20-Jähriges-Jubiläum feiert. Neben der geregelten Vergütung für verschiedene erneuerbare Energiequellen wird ebenfalls die Zielsetzung festgehalten. So soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis 2025 auf 40-45% und bis 2035 auf 55-60% erhöht werden. Nach Angaben des Fraunhofer Instituts wurde im ersten Halbjahr 2020 mehr Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt und ins Stromnetz eingespeist als aus konventionellen Energieträgern. Der Anteil beträgt demnach 55% des gesamten eingespeisten Stromes (Burger, 2020).

Den größten Beitrag der erneuerbaren Energien liefert dabei die Stromerzeugung aus Windenergie (Onshore und Offshore) mit knapp 30% der gesamten Netto-Stromproduktion. Damit ist die Windenergie abermals der wichtigste Energieträger in Deutschland. Ein genauere Blick in die Daten lässt den Optimismus etwas trüben, denn knapp ein Drittel aller installierten Windkraftanlagen verlassen zwischen 2021 und 2025 die vom EEG geregelte und auf 20 Jahre ausgelegte Einspeisevergütung.

Hinzukommt, dass mit steigendem Anlagenalter die Betriebskosten immer weiter zunehmen, wodurch der wirtschaftliche Betrieb nur eine Frage der Zeit ist. Betreiber betroffener Anlagen sehen sich daher zunehmend mit der Frage einer geeigneten Nachnutzungsstrategie für ihren Windpark konfrontiert. Generell stehen den Eigentümern nach Ablauf der EEG-Einspeisevergütung drei Optionen zur Verfügung:

1. Weiterbetrieb des Windparks
2. Schließung des Standortes
3. Repowering der Anlagen

Der Weiterbetrieb ist wie bereits erwähnt durch geringere Einnahmen aufgrund des Wegfallens der EEG-Einspeisevergütung sowie durch steigende Betriebskosten für Reparatur und Wartung der jeweiligen Anlagen gekennzeichnet. Falls die Betriebskosten die generierten Erlöse übersteigen ist eine Schließung des jeweiligen Standortes die einzig ökonomisch sinnvolle Entscheidung. Doch auch in diesem Fall bieten sich Betreibern von Windenergieanlagen Lösungsansätze durch das sogenannte „Repowering“. Repowering bezeichnet dabei die Installation einer neuen, leistungsfähigeren Anlage zugunsten einer oder mehrerer älterer Modelle, wobei der letztere Fall üblich ist.

Die Nachnutzungsstrategie ist dabei von Fall zu Fall unterschiedlich. Neben dem Vorhandensein eines geeigneten Windprofils, der Höhe der zu erwartenden Einnahmen und Kosten und dem technologischen Fortschritt spielen immer mehr regulatorische Maßnahmen eine wichtige Rolle bei der ökonomischen Bewertung von Windenergieinvestments. Die optimale Nachnutzungsstrategie ist daher nicht (nur) eine Frage des guten Willens, sondern beruht vielmehr auf geologischen, technischen, wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Aspekten.

Die folgende Arbeit hat daher die Intention, die Unsicherheiten, die sich aus den genannten Aspekten ergeben, zu modellieren und mit in die Entscheidungsfindung zur optimalen Nachnutzungsstrategie sowie zur Bestimmung des optimalen Zeitpunkts zur Ausübung der jeweiligen Option mit einzubeziehen. Um ebenfalls Leser und auch potenzielle Investoren, die sich neu im Bereich der Windenergie wiederfinden, einen guten Einstieg in die Thematik zu ermöglichen, werden im

anschließenden Kapitel allgemeine Grundlagen der Windenergie und von Windenergieanlagen erläutert. Darauf aufbauend wird im dritten Kapitel ein Einblick in den Stand der Wissenschaft bzgl. der Nachnutzungsstrategie von Windenergieanlagen gegeben, wobei die Erkenntnisse und Resultate der wissenschaftlichen Arbeiten gegenübergestellt werden. Da diese Arbeit eine möglichst ganzheitliche Bewertung von Windenergieinvestments zum Ziel hat, werden in diesem Kapitel die zu berücksichtigenden Faktoren erläutert. Dabei wird der Leser ausgehend von verschiedenen Bewertungsmethoden immer näher an die wirtschaftliche Bewertung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten herangeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen im Endeffekt anhand eines Windparks evaluiert werden. Zu diesem Zweck werden im vierten Kapitel die benötigten Faktoren zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Windenergieanlagen erläutert. Die diskutierten Modelle und Faktoren, die in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Windenergieinvestments einfließen, sollen anschließend in der Programmiersprache Python implementiert werden. Daher wird im fünften Kapitel zu Beginn kurz das verwendete Setup und die Entwicklungsumgebung, in der die Modelle entwickelt wurden, skizziert. Darauf aufbauend werden die zur Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigten Faktoren, anhand öffentlicher und frei zugänglicher Datenquellen für reale Anlagen berechnet. In Kapitel sechs werden die Ergebnisse abschließend kurz zusammenfassend dargestellt.

6. Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Wirtschaftlichkeit von Windenergieinvestments unter Berücksichtigung von Unsicherheiten mittels der Kapitalwertmethode sowie der Realloptionsanalyse untersucht. Wie in sämtlichen Wirtschaftlichkeitsanalysen von Windenergieinvestments ist die Kenntnis einiger elementarer Parameter, wie z.B. des Energieertrags oder auch den zu erwartenden zukünftigen Erlösen notwendig. Die meisten wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit dieser Thematik beschäftigen, legen diese Werte daher pauschal fest und führen ihre Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand dieser durch. Aufgrund der zukünftigen Bedeutung der Windenergie im Kontext der Energiewende, sind in den letzten Jahren viele Projekte, wie z.B. das Marktstammdatenregister sowie das Klimaberatungsmodul des Deutschen Wetterdienstes, ins Leben gerufen worden, die eine statistische Auswertung realer Datensätze ermöglichen. Dadurch besteht die Chance - für außenstehende Person und Institutionen - die Wirtschaftlichkeit von erneuerbaren Energieprojekten und im speziellen von Windenergieprojekten bereits vor der Konkretisierung von Maßnahmen relativ genau abzuschätzen zu können.

In dieser Arbeit wurde daher die Wirtschaftlichkeitsanalyse anhand von realen und öffentlich frei zugänglichen Datensätzen vollzogen. Zu diesem Zweck wurden drei Standorte mit verschiedenen Windgegebenheiten, unterschiedlichen Anlagentypen sowie variierenden Inbetriebnahme-Zeitpunkten evaluiert. Die Betreiber von Windenergieanlagen sind mit fortschreitendem Anlagenalter grundsätzlich zwei fundamentalen Problemen ausgesetzt: Zum einen steigen die Betriebskosten mit zunehmendem Anlagenalter an, zum anderen müssen die Betreiber betroffener Anlagen nach Ablauf der Förderansprüche ihren Strom selbst vermarkten, was zwangsläufig mit unsicheren Erlösen aufgrund des stark schwankenden Strommarktpreises verbunden ist. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Weiterbetrieb der untersuchten Windparks über die gesetzlich festgeschriebene Förderdauer von 20 Jahren unter den heutigen Marktbedingungen nur schwer zu realisieren ist. Die Resultate zeigen vielmehr, dass der Weiterbetrieb der betrachteten Standorte unter optimalen Bedingungen - im besten Fall - lediglich zwei Jahre über die Förderansprüche hinaus möglich ist. Viele Studien erwarten zwar, dass mit dem Atomausstieg 2022 die Strommarktpreise ansteigen werden, unvorhergesehene Ereignisse wie z.B. die aktuelle Corona-Pandemie können aber zu einem Einbruch der Marktpreise führen, wodurch für viele ältere Anlagen der wirtschaftliche Betrieb nicht mehr gewährleistet ist. Anlagenbetreiber müssen sich daher frühzeitig mit geeigneten Nachnutzungsstrategien auseinandersetzen. Eine Option die in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat ist das sogenannte Repowering. Dabei werden ältere Anlagen zugunsten neuer, leistungsstärkerer

Anlagen ersetzt. Daher wurde die Möglichkeit des Repowering ebenfalls in die Wirtschaftlichkeitsanalyse einbezogen. Das Repowering weist generell einen deutlichen Mehrwert auf. Zum einen wird die Anzahl der installierten Anlagen reduziert. Zum anderen ist aufgrund des technologischen Fortschrittes, trotz verminderter Anlagenanzahl, mit einer deutlichen Steigerung hinsichtlich der erzeugten Strommenge zu rechnen. Darüber hinaus weist das Repowering Neubaucharakter auf, was mit einer erneuten Förderung durch das EEG verbunden ist, wodurch Unsicherheiten bzgl. zukünftiger Erlöse, die sich aufgrund des schwankenden Strommarktpreises ergeben, reduziert aber nicht eliminiert werden. Da die Vergütung des Repowering-Projektes und somit der Kapitalwert aufgrund der marktorientierten Auslegung des EEGs zum großen Maße von den Monatsstrommarktwerten abhängt, wurden diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels einer BetaPERT-Verteilung zufällig bestimmt. Die möglichen Ausprägungen der resultierenden Kapitalwerte werden anhand einer Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Wiederholungen ermittelt. Die Ergebnisse der Kapitalwertmethode in Kombination mit der Monte-Carlo-Simulation zeigen, dass die Vorteilhaftigkeit bzgl. des Repowering für den „ältesten“ Windpark bereits vor dem Erreichen der erwarteten Lebensdauer gegeben ist. Im Falle der anderen beiden Standorte wird die Möglichkeit des Repowering, unter der Bezugnahme des Kapitalwertes als Entscheidungskalkül, abgelehnt, da sich die Windparks aufgrund ihres „mittleren“ Alters sich aktuell in einer profitablen Phase befinden. Die Ergebnisse ändern sich jedoch, wenn anstatt der Kapitalwertmethode die Realoptionsanalyse angewendet wird. Der Vorteil der Realoptionsanalyse liegt in der Berücksichtigung von Unsicherheiten, wie z.B. den schwankenden Strommarktpreisen, die sich in unterschiedlichen Projektverläufen für das Repowering-Projekt widerspiegeln. Die Realoptionsanalyse, deren Entscheidungskalkül durch den erweiterten Kapitalwert gegeben ist, erlaubt es somit, diese unsicheren Verläufe - die sowohl Chance als auch Risiken mit sich ziehen - in die Entscheidungsfindung einzubinden. Die Ergebnisse der Realoptionsanalyse zeigen, dass in allen drei Fällen dies zu einer erhöhten Projektbewertung führt. Am Standort des Windparks mit „mittlerem“ Alter wäre dem Anlagenbetreiber anzuraten sich - unter Berücksichtigung des erweiterten Kapitalwertes - zugunsten des Repowering-Projektes zu entscheiden. Im Falle des Standortes mit den „ältesten“ Anlagen war die Vorteilhaftigkeit durch die Verwendung des Kapitalwertes als Entscheidungskalkül bereits vorher gegeben und konnte im Rahmen der Realoptionsanalyse bestätigt werden. Lediglich am Standort mit den „jüngsten“ Anlagen hat der erweiterte Kapitalwert keinen Einfluss auf die Entscheidungsfindung.

Im Zuge dieser Arbeit wurden sämtliche zur Kalkulation der Energieerträge benötigten Rechnungen sowie die beide genannten Bewertungsmethoden in Python implementiert. Anhand der erstellten Skripte und der vorgestellten Methodik können

die Anwendung der Kapitalwertmethode und der Realloptionsanalyse mit relativ wenig Aufwand auf weitere Standorte übertragen werden. Hierzu werden lediglich die Daten des Deutschen Wetterdienstes sowie die Kenndaten des Marktstammdatenregisters benötigt und die entsprechenden Parameter an die Skripte angepasst werden. Die Daten des Marktstammdatenregister können anhand der interaktiven Map, die im digitalen Anhang zu dieser Arbeit vorhanden ist, leicht bestimmt werden.

Alles in allem lässt sich festhalten, dass die Realloptionsanalyse ein geeignetes Instrument zur Investitionsbewertung darstellt und vor allem Projekten, die großer Unsicherheit unterliegen, einen höheren Mehrwert zuweist. Zu beachten ist aber, dass die Realloptionsanalyse eine komplexere Bewertungsmethode darstellt als die Kapitalwertmethode und vielleicht nicht auf den ersten Blick intuitiv verständlich ist. Vor allem wenn mehrere Optionen im Projektverlauf entstehen, wie z.B. Erweiterungsoptionen, Abbruchoptionen, Warteoptionen etc, kann die Komplexität der Bewertung sehr schnell zunehmen, weshalb sie bis heute vermutlich die Kapitalwertmethode als Entscheidungskalkül nicht ablösen konnte. Weitere Studien sollten folgen.