

Stromversorgung einer Kleinstadt mit Onshore-Windenergie unter Berücksichtigung von Power-to-Gas Systemen

Bachelorarbeit

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

vorgelegt von

Name: Kleinholz



Vorname: Nora



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Ort, den*: Hannover, den 01.11.2013

*(Datum der Beendigung der Arbeit)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Variablenverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	3
2.1 Aktueller Zustand der Stromerzeugung in Deutschland	3
2.2 Abgrenzung Onshore- und Offshore-Windenergie.....	4
2.3 Abgrenzung Power-to-Gas und Redox-Flow-Batterie	6
3 Modellentwicklung.....	8
3.1 Strombedarf einer Kleinstadt.....	8
3.1.1 Berechnung des Strombedarfs.....	8
3.1.2 Zusammensetzung des Strombedarfs.....	9
3.1.3 Zeitlicher Verlauf des Strombedarfs.....	10
3.2 Energieproduktion einer Windenergieanlage.....	11
3.2.1 Auswahl von Standort und Windenergieanlage.....	12
3.2.2 Statistische Beschreibung von Windgeschwindigkeiten	14
3.2.2.1 Weibull-Dichte.....	15
3.2.2.2 Weibull-Verteilung.....	16
3.2.3 Leistungskurve einer Windenergieanlage.....	17
3.2.4 Bestimmung der Leistung-Dauer-Kurve	18
3.2.5 Bestimmung der Klassenerträge.....	20
3.2.6 Bestimmung des Jahresenergieertrages und der Volllaststunden.....	21
3.3 Kosten einer Windenergieanlage	22
3.3.1 Anschaffungskosten	23
3.3.2 Betriebskosten	26
3.4 Auslegung eines Power-to-Gas Systems	27
3.4.1 Technische Parameter.....	28
3.4.1.1 Kapazität.....	28
3.4.1.2 Leistung.....	28
3.4.1.3 Entladezeit	29

Inhaltsverzeichnis

3.4.2	Nutzungsmöglichkeiten	30
3.4.2.1	Wiederverstromung.....	30
3.4.2.2	Direkte Nutzung.....	31
3.5	Kosten eines Power-to-Gas Systems	32
3.5.1	Anschaffungskosten	33
3.5.2	Betriebskosten	34
3.6	Auslegung und Kosten einer Redox-Flow-Batterie	35
3.6.1	Technische Parameter.....	35
3.6.1.1	Kapazität.....	35
3.6.1.2	Leistung.....	36
3.6.1.3	Entladezeit	36
3.6.2	Kosten.....	37
3.6.2.1	Anschaffungskosten.....	37
3.6.2.2	Betriebskosten.....	37
3.7	Verknüpfung von Windenergieanlagen und Speichern.....	37
3.7.1	Leistungssimulation einer Windenergieanlage.....	38
3.7.2	Anzahl der Windenergieanlagen.....	39
3.7.3	Einsatz eines Energiespeichers	39
4	Szenarioanalyse.....	40
4.1	Modellanwendung.....	40
4.2	Auswertung der Ergebnisse.....	43
4.2.1	Energieproduktion einer Windenergieanlage	43
4.2.2	Leistungssimulation einer Windenergieanlage.....	46
4.2.3	Anzahl der Windenergieanlagen.....	48
4.2.4	Einsatz eines Energiespeichers	50
4.2.5	Speicherauslegung.....	52
4.2.6	Kosten.....	54
5	Fazit und Ausblick	56
	Literaturverzeichnis.....	60
	Anhang.....	65
	Ehrenwörtliche Erklärung	73

1 Einleitung

Das heutige Energiesystem befindet sich in einem umfassenden Umgestaltungsprozess. Die Gründe dafür liegen in der Endlichkeit und der Knappheit fossiler sowie atomarer Energieträger, während gleichzeitig die weltweite Energienachfrage vor allem in den Schwellenländern steigt. Nachteile fossiler Energieträger wie Braun- und Steinkohle bestehen im Ausstoß von Kohlenstoffdioxid während des Verbrennungsvorgangs. Zusätzlich besteht in Deutschland eine Importabhängigkeit von Steinkohle, Erdöl und Erdgas.¹ Langfristig wird die Bevölkerung mit externen Effekten der Energiebereitstellung durch fossile Energieträger kämpfen müssen. Kernenergie birgt Gefahren durch mögliche Unfälle, Umwelt- und Gesundheitsrisiken sowie das Risiko, zur Verbreitung von Technologie und Material zur Herstellung von Atomwaffen beizutragen. Nach dem Zwischenfall in Fukushima im Jahr 2011 hat die Bundesregierung den Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 beschlossen. Aufgrund dessen werden die Anstrengungen erhöht, den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromversorgung weiter zu steigern. Die konkreten Ziele sind im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgehalten. So soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2020 mindestens auf 35 Prozent, bis 2030 auf 50 Prozent und bis 2050 auf 80 Prozent erhöht werden.² Folgen derart hoher Anteile erneuerbarer Energieträger werden Erzeugungsschwankungen sein, welche zu vermehrten Stromüberschüssen führen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher verschiedene Stromversorgungsszenarien aus Windenergie kombiniert mit Energiespeichern analysiert. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob die Stromversorgung einer fiktiven Kleinstadt in der Region Hannover zu einem bestimmten Prozentsatz an Onshore-Windenergie möglich ist. Ziele sind die Bestimmung der Anforderungen an die Windenergieanlagen sowie die Untersuchung, inwiefern der Einsatz von Energiespeichern unter besonderer Berücksichtigung der Power-to-Gas-Technologie zur Stromversorgung mit einem bestimmten Prozentsatz beiträgt. Die mit diesen Zielen einhergehenden Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

- Wie groß ist der jährliche Strombedarf einer fiktiven Kleinstadt?
- Wie hoch ist der jährliche Energieertrag einer Windenergieanlage am anvisierten Standort?

¹ Vgl. Gesamtverband Steinkohle e.V. 2012.

² Vgl. Deutscher Bundestag 2012.

Einleitung

- Wie viele Windenergieanlagen werden je nach Szenario benötigt?
- Für welches Szenario ist ein Einsatz von Energiespeichern sinnvoll und ab wann ist er notwendig?
- Wie wird der Energiespeicher je nach Szenario ausgelegt?
- Was kosten die verschiedenen Stromversorgungsszenarien?

Diese Fragen werden anhand eines Kalkulationsmodells beantwortet. Schwerpunkte werden in dieser Arbeit auf einen wirklichkeitsgetreuen Standortbezug gesetzt. Dadurch ist eine exakte Berechnung des Energieertrages möglich, womit sich realistische Schlüsse auf die notwendige Anzahl an Windenergieanlagen und einen sinnvollen Speichereinsatz ziehen lassen. Werden die Windenergieanlagen in Zukunft hinsichtlich ihrer Technik und den damit einhergehenden Kosten weiterentwickelt, können erneut realistische Modellberechnungen durchgeführt werden.

Im Anschluss an diesen einleitenden Teil der Arbeit folgen in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen für die spätere Modellentwicklung. Nachdem in Kapitel 3 die Entwicklung und der Aufbau des Modells vorgenommen werden, schließt sich in Kapitel 4 eine Szenarioanalyse an. Diese besteht aus einer Modellanwendung sowie einer Auswertung der Berechnungsergebnisse. Das Fazit in Kapitel 5 umfasst eine Zusammenfassung sowie Handlungsempfehlungen mit einem Ausblick. In der nachfolgenden Abbildung wird der Aufbau dieser Arbeit grafisch dargestellt.

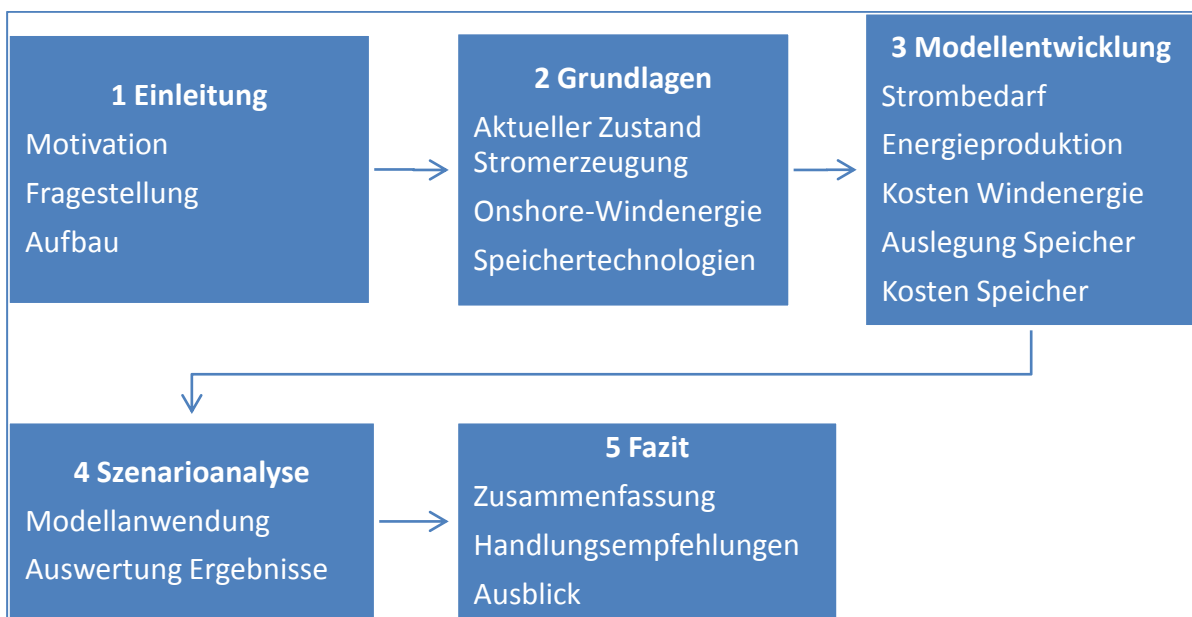


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit
Quelle: Eigene Darstellung

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde vor dem Hintergrund der notwendigen Veränderung des heutigen Energiesystems und dem damit verbundenen massiven Ausbau erneuerbarer Energien die Stromversorgung einer Kleinstadt mit Onshore-Windenergie erörtert. Die Versorgung durch Windenergie wurde mit der Verwendung von Energiespeichersystemen kombiniert und anhand eines selbstentwickelten Modells wurden verschiedene Szenarien untersucht.

Die Auswertung der Szenarioanalyse zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, mit Windenergieanlagen des Modells E-92/2,3 MW am Standort Langenhagen eine Kleinstadt zu verschiedenen Prozentsätzen mit Strom zu versorgen. Im weiteren Verlauf werden die in der Einleitung formulierten Forschungsfragen beantwortet.

Zunächst sollten der jährliche Strombedarf einer Kleinstadt sowie der jährliche Energieertrag einer WEA ermittelt werden. Der jährliche Strombedarf einer fiktiven Stadt mit 20.000 Einwohnern in ca. 9.900 Haushalten ergibt sich zu 31.089 MWh. Der Jahresenergieertrag des betrachteten Anlagenmodells E-92/2,3 MW berechnet sich mithilfe von Weibull-Parametern des Standortes Langenhagen zu 6.163 MWh (siehe Abb. 21). Da dieser Wert für den gewählten Standort durch das Expertengespräch mit Enercon (siehe Anhang 4) bestätigt wird, ist er als realistisch einzuschätzen. Die Anlage erzielt am Standort Langenhagen 2.623 Volllaststunden im Jahr, was ein sehr gutes Ergebnis für einen Binnenstandort darstellt. Aus dem selbstentwickelten mathematischen Modell, das mittels einer grafischen Oberfläche in Microsoft Excel bedient wird, lassen sich weitere Informationen zur WEA und zum Standort ableiten. So erhält man detaillierte Auskünfte über die Häufigkeiten und Richtungen der Windgeschwindigkeiten sowie über die Dauer in Jahresstunden der jeweiligen Windgeschwindigkeit. Außerdem wird neben der Dauer der Flächenleistung, der Beitrag jeder Windgeschwindigkeitsklasse zum Jahresenergieertrag der Anlage ermittelt. Dabei stellt man fest, dass die Klasse 9 m/s den größten Beitrag zum Energieertrag leistet, obwohl die Klassen 5 m/s und 6 m/s die am häufigsten in Langenhagen vorherrschenden Windgeschwindigkeiten sind (siehe Abb. 18).

Die sich daran anschließende Forschungsfrage zielt auf die für verschiedene Szenarien benötigte Anzahl an WEA. Mithilfe einer Windsimulation mittels der Statistik-Software R lässt sich eine Leistungssimulation der betrachteten WEA am Standort Langenhagen

Fazit und Ausblick

erstellen. Dadurch lassen sich für verschiedene Windstrom-Anteile an der Stromversorgung die benötigte Anzahl an WEA und Speichereinheiten berechnen. Zudem wird der sinnvolle Einsatz-Zeitpunkt eines Energiespeichers sowie die Auslegung des Speichersystems bezüglich der Leistung ermittelt. Bei der Kalkulation der benötigten WEA wird deutlich, dass deren Anzahl ab einem bestimmten Windstrom-Anteil stark davon abhängt, ob Energiespeicher verwendet werden oder nicht. Beispielsweise werden beim 20 %-Szenario ohne Speichereinsatz zwei Anlagen errichtet, während bei der Verwendung von Speichern eine Anlage ausreicht. Beim 50 %-Szenario stehen vier Anlagen dreien gegenüber, beim 80 %-Szenario müssen fünfundzwanzig statt sechs Anlagen gebaut werden (siehe Tabelle 5). Ein 100 %-Szenario ist nur mit Speicherverwendung realisierbar. Die Zahl der tatsächlich zu errichtenden Anlagen ergibt sich durch Aufrunden der theoretisch benötigten Zahl. Dies ist zweckmäßig, da der tatsächliche Jahresenergieertrag aufgrund von technischen Verfügbarkeitsdefiziten einzelner WEA und Parkeffekten beim Bau mehrerer WEA geringer ist als der ursprünglich berechnete Energieertrag. Wenn durch das Aufrunden der erreichte prozentuale Anteil an Windstrom höher ist als gewünscht, können die Überschüsse in Power-to-Gas Systemen zur Erdgaserzeugung mit anschließender Erdgasnutzung verwendet werden.

Des Weiteren sollte ein sinnvoller Einsatzzeitpunkt für einen Energiespeicher ermittelt werden. Dieser Zeitpunkt hängt davon ab, welches Entscheidungskriterium angewandt wird. Bestimmt man im Zuge einer technischen Optimierung den Zeitpunkt, ab dem der prozentuale mittlere Zuwachs des Windstrom-Anteils mit Speicherverwendung höher ist als ohne Speichereinsatz, ist ein Einsatz ab dem 20 %-Szenario sinnvoll. Bei einer ökonomischen Optimierung ist der Einsatz von Speichern erst ab dem 75 %-Szenario empfehlenswert, da die Stromversorgung ab diesem Punkt kostengünstiger ist.

An die Bestimmung eines sinnvollen Einsatzzeitpunktes schließt sich die Frage nach der Auslegung der beiden Speichersysteme Power-to-Gas und Redox-Flow-Batterien an. Bei der Bestimmung der benötigten Anschlussleistung fällt auf, dass die Leistung bei PtG-Anlagen stets größer sein muss. Je höher der gewünschte Windstrom-Anteil ist, desto größer wird die Differenz in der nötigen Leistung. Die Einführung der Kennzahl des Direkteinspeisungsfaktors zeigt, dass bei der Verwendung von PtG-Anlagen stets ein prozentual geringerer Stromanteil direkt in das Übertragungsnetz der Stadt eingespeist werden kann. Diese Beobachtungen werden durch die unterschiedlichen Wirkungsgrade von 35 % (PtG) und 75 % (RF-Batterie) erklärt.

Fazit und Ausblick

Die abschließende Forschungsfrage zielt auf die Kostenberechnung der verschiedenen Stromversorgungsszenarien ab. Ohne Speicherverwendung nehmen die Kosten exponentiell zu, mit Speichern steigen die Kosten unabhängig vom betrachteten Energiespeicher dagegen annähernd linear (siehe Abb. 29). Aus der Überlagerung der drei Kostenverläufe lässt sich ableiten, dass die Stromversorgung der Kleinstadt bis zum 75 %-Szenario ausschließlich mit WEA günstiger ist. Mit dem Modell E-92/2,3 MW am Standort Langenhagen kosten das 20 %-Szenario und das 50 %-Szenario 6,3 bzw. 23,7 Millionen Euro. Bis zum 90 %-Szenario ist es wirtschaftlicher, WEA in Kombination mit PtG-Speichern zu betreiben. Das 80 %-Szenario weist Kosten in Höhe von 98,4 Millionen Euro auf. Bei Szenarien mit einem Windstrom-Anteil über 90 % sollten PtG-Speicher durch RF-Batterien ersetzt werden.

Ziel dieser Arbeit war es, bei einer Stromversorgung durch Windenergie die Anforderungen an Windenergieanlagen festzustellen und zu analysieren. Gleichzeitig war zu untersuchen, inwiefern Energiespeicher die Versorgung zu einem bestimmten Prozentsatz ermöglichen. Insgesamt betrachtet haben die Untersuchungsergebnisse der Arbeit positiv zur Klärung dieser Problematik beigetragen. Eine Stromversorgung durch Windenergie ist am Standort Langenhagen möglich. Für aktuell realistische Szenarien mit einem Windstrom-Anteil von 10 bis 30 % ist der Verzicht auf Energiespeicher kostengünstiger. Ab einem Anteil von 20 % entstehen jedoch ungenutzte Stromüberschüsse, sodass ein Speichereinsatz technisch sinnvoll wäre. Unter der Voraussetzung geringer Kosten der PtG-Technologie ist diese Speichertechnik aufgrund großer Speicherkapazitäten und in Pilotanlagen bereits realisierter hoher Leistungen dafür geeignet, diese Stromüberschüsse zu speichern.

Abschließend wird ein Ausblick bezüglich der Methodik dieser Arbeit und der zukünftigen Entwicklungen in der Forschung gegeben.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die verwendete Methodik zu erweitern. Zum Beispiel kann untersucht werden, ob eine Differenzierung der Energieträger den Speicherbedarf reduziert. Konkret kommt die Kombination aus Wind- und Solarenergie in Betracht, da deren Energieangebot im jahreszeitlichen Verlauf gegenläufig auftritt. Außerdem ist eine Reduzierung des Speicherbedarfs mittels Kombination verschiedener WEA-Modelle mit unterschiedlichen Leistungsprofilen denkbar. Im Bezug auf die Speichersysteme kann eine effizientere Erdgasnutzung bei einer Kopplung von PtG-Speichern mit KWK-Anlagen erforscht werden. Ebenso sind alternative

Fazit und Ausblick

Wiederverstromungsmöglichkeiten zu Gasturbinen möglich, um den Wirkungsgrad zu verbessern.

Das im EEG gesetzte Ziel der Bundesregierung, den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromversorgung bis zum Jahr 2050 auf 80 Prozent zu erhöhen, wird allein mit fluktuierenden Energiequellen wie Windenergie nicht wirtschaftlich sein. Deshalb müssen die Schwankungen in der Erzeugung langfristig durch Energiespeicher ausgeglichen werden. Dafür wird es notwendig sein, die Anschaffungs- und Betriebskosten sowohl von Power-to-Gas Systemen als auch von Redox-Flow-Batterien zu senken. Gleichzeitig muss weiterhin an der Erhöhung der Leistung von Flow-Batterien geforscht werden. Können die Kosten von Speichersystemen gesenkt werden, wird der Speichereinsatz auch bei Szenarien mit geringen Windstrom-Anteilen nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch sinnvoll sein. Auf lange Sicht wird es dadurch möglich sein, Windenergieanlagen in Kombination mit Energiespeichern planbarer als zum aktuellen Zeitpunkt einzusetzen, sodass sie einen wirtschaftlich sinnvollen Beitrag zur Sicherung der Grundlast leisten können.