

Entwicklung eines webbasierten Investment Entscheidungsunterstützungssystems für  
Photovoltaikanlagen

**Masterarbeit**

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

vorgelegt von

Name: Brune

■■■■■■ ■■■■■■

Vorname: Jonas

■ ■■■■■■

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den 28.09.2016

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
Symbolverzeichnis	viii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Forschungshintergrund</b>	<b>3</b>
2.1 Mikro-Photovoltaik . . . . .	3
2.2 Literaturüberblick . . . . .	6
2.3 Forschungsdesign . . . . .	12
<b>3 EUS zur Bewertung von Investitionen in Mikro-PV-Anlagen</b>	<b>14</b>
3.1 Discounted Cash Flow Modell . . . . .	14
3.2 Speicher und Eigenverbrauchsquote . . . . .	19
3.3 Monte Carlo Simulation . . . . .	22
3.4 System Architektur des EUS . . . . .	26
3.5 Entwicklung der Web-Applikation . . . . .	27
3.5.1 Datenbank und Datenqualität . . . . .	29
3.5.2 Schnittstellen . . . . .	33
3.5.3 Graphical User Interface . . . . .	36
<b>4 Fallstudie: Investitionen in Mikro-Photovoltaikanlagen auf drei Inseln</b>	<b>38</b>
4.1 Darstellung der Szenarien: Einflussparameter und Annahmen . . . . .	38
4.2 Analyse der Wirtschaftlichkeit von Mikro-PV-Anlagen ohne Speicher . . . . .	42
4.2.1 Kreta . . . . .	42
4.2.2 Kanarische Inseln . . . . .	46
4.2.3 Ostfriesische Inseln . . . . .	49
4.3 Analyse der Wirtschaftlichkeit von Mikro-PV-Anlagen mit Speicher . . . . .	52
4.3.1 Kreta . . . . .	52
4.3.2 Kanarische Inseln . . . . .	55
4.3.3 Ostfriesische Inseln . . . . .	58
4.4 Sensitivitätsanalyse . . . . .	61
<b>5 Diskussion, Limitationen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>69</b>
5.1 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	69
5.2 Diskussion der Web-Applikation und des EUS . . . . .	72

5.3	Limitationen und Handlungsempfehlungen . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>81</b>
	<b>Literatur</b>	<b>84</b>
<b>A</b>	<b>Erläuterung des Workflows bei der Applikations-Benutzung anhand eines Beispielszenarios</b>	<b>92</b>
A.1	Vorstellung des zugrundeliegenden Szenarios . . . . .	92
A.2	Initialisierung der Datenbank . . . . .	94
A.3	Anlegen eines Benutzers und Zugriff auf das EUS . . . . .	94
A.4	Anlegen und Editieren von Daten . . . . .	97
A.5	Durchführen der Monte Carlo Simulation und Einlesen der Ergebnisse . . . . .	102
<b>B</b>	<b>MATLAB-Modell</b>	<b>106</b>
B.1	Simulationsablauf . . . . .	106
B.2	BetaPert-Verteilung . . . . .	107
B.3	Monte Carlo Simulation . . . . .	108
B.4	Discounted Cash-Flow Modell . . . . .	111
B.5	Erzeugung der Verteilungen der risikobehafteten Parameter . . . . .	116
B.6	Erzeugung der Outputdateien . . . . .	119
<b>C</b>	<b>/pvapp</b>	<b>123</b>
C.1	/app . . . . .	123
	C.1.1 /controllers . . . . .	123
	C.1.2 /models . . . . .	187
	C.1.3 /views . . . . .	206
C.2	/config . . . . .	351
C.3	/db . . . . .	353

## **Abstrakt**

Ein derzeit stark diskutiertes Thema der Politik sind die Herausforderungen zur Umsetzung der Energiewende. Die Energie soll nicht nur effizienter genutzt werden, sondern auch aus anderen Quellen entstehen. Längst hat sich gezeigt, dass die Stromproduktion aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe negative Auswirkungen auf die Umwelt hat. Zudem sind die Ressourcen wie Erdöl und Kohle nur begrenzt verfügbar. Eine Alternative bieten die erneuerbaren Energien. Eine Möglichkeit des einzelnen Bürgers die Energiewende dabei voranzutreiben, liefern Photovoltaik-Anlagen. Da für den Bürger allerdings eher ökonomische als ökologische Aspekte für die Installation einer Photovoltaik-Anlage entscheidend sein werden, befasst sich die vorliegende Masterarbeit mit der Bestimmung der Profitabilität von Photovoltaik-Anlagen. Dazu wird in der Arbeit ein webbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für Investments in Photovoltaik-Anlagen entwickelt. Mit diesem soll es einem potentiellen Investor möglich sein, den wirtschaftlichen Erfolg einer Photovoltaik Anlage einfach zu kalkulieren. Dabei soll das dafür zugrunde liegende mathematische Modell probabilistisch sein, um mögliche Risiken abzudecken und Aussagen treffen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Potenzial erzielt werden kann. Zur Messung der Profitabilität werden der Projektwert, interne Zinsfuß und Amortisationszeitpunkt herangezogen. Zudem wird in der Arbeit eine Fallstudie auf drei verschiedenen Inseln durchgeführt, die das Potenzial einer Mikro-Photovoltaik-Anlage mit und ohne Batterie dokumentiert. Des Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse vollzogen, um den Einfluss kritischer Eingangsparameter des Modells zu bestimmen.

**Schlüsselwörter:** webbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem, Photovoltaik, probabilistische Kosten-Nutzen-Analyse, Sensitivitätsanalyse, Szenarioanalyse, Risikoanalyse, Eigenverbrauch

# 1 Einleitung

Für die meisten Menschen ist eine im alltäglichen Leben ausreichende Energieversorgung zur Selbstverständlichkeit geworden. Gerade mit der Entwicklung elektronischer Geräte und wachsender Weltbevölkerung steigt der Energieverbrauch. In Deutschland lag der jährliche Stromverbrauch pro Kopf im Jahr 2013 bei 7019 kWh, was einem Energieverbrauch von 3868 kg Öl entspricht.<sup>1</sup> Die Stromerzeugung erfolgt derzeit größtenteils noch durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Diese Art der Energiegewinnung ist allerdings nicht nur durch die Knappheit der Ressourcen begrenzt realisierbar, sondern auch umweltschädlich. Die ökonomischen Folgen sind steigende Preise für Öl und Gas, als ökologische Auswirkungen resultieren der Klimawandel mit Wetterextremen und der Anstieg des Meeresspiegels.<sup>2</sup>

Die Lösung für dieses Problem soll die Energiewende bieten. Sie beschreibt die Distanzierung der Stromerzeugung durch die Verbrennung fossiler Ressourcen und ist mit ihren Vorsätzen in Deutschland im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegt. Zu den erneuerbaren Energien gehören die Wasserkraft, die Photovoltaik (PV), die Biomasse und die Windkraft, sowohl Onshore- als auch Offshore-Anlagen. Als unerschöpfliche Rohstoffquellen bieten diese eine emissionsfreie Stromerzeugung. Allein Wind- und Solarenergieanlagen generierten 2015 122 TWh und produzierten somit mehr Energie als durch den Einsatz von Steinkohle und der Atomenergie. Insgesamt wurde 2015 Strom in Höhe von 190 TWh aus erneuerbaren Energien produziert, was ungefähr einer Steigerung von 20% zum Vorjahr und 35% der öffentlichen Nettostromerzeugung ausmacht.<sup>3</sup>

Gerade in Deutschland gewann der Ausbau von Photovoltaikanlagen aufgrund hoher Vergütungssätze in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Im Jahr 2015 ist die Erzeugung von Strom aus Sonnenlicht um 4,8% gewachsen und mit 38,5 TWh ein Anteil von 7,5% der gesamten Stromerzeugung erreicht worden. Damit hat die PV einen Anteil von ca. 20% an der gegenwärtigen Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen.<sup>4</sup>

Seit 2013 hat sich die Anzahl an Installationen von Photovoltaik-Dachanlagen jedoch verringert. Dies hängt mit der im August 2012 veröffentlichten Novellierung des EEG zusammen, in der die staatliche Förderung gekürzt wurde.<sup>5</sup> Auch innerhalb der letzten beiden Jahren "befindet sich die Photovoltaik-Nachfrage weiter im Sinkflug".<sup>6</sup> Die Abnahme der Nachfrage bezieht sich jedoch hauptsächlich auf größere Photovoltaikanlagen. Im Gegensatz dazu ist die Nachfrage nach PV-Kleinanlagen von einer Leistung von 30 Kilowatt Peak (kWp) ist ge-

---

<sup>1</sup>Vgl. The World Bank (2016).

<sup>2</sup>Vgl. Mertens (2013), S. 17ff.

<sup>3</sup>Vgl. Burger (2016).

<sup>4</sup>Vgl. Wirth (2016).

<sup>5</sup>Vgl. Enkhardt (2014).

<sup>6</sup>Enkhardt (2015).

stiegen.<sup>7</sup> Zu diesen PV-Anlagen gehören auch die Mikro-PV-Anlagen. Beim Betreiben einer Mikro-PV-Anlage steht nicht die Einspeisung von Solarenergie in das öffentliche Stromnetz und den damit verbundenen Fördermitteln des EEG im Vordergrund, sondern die Verringerung der Stromkosten. Ziel dabei ist es, bei Sonnenschein eigenen Strom zu produzieren und somit gleichzeitig den Strombezug vom Netzbetreiber durch eigen generierten Strom zu substituieren.<sup>8</sup> Charakteristisch für die Mikro-PV-Anlage ist die einfache Installation der Anlage und die leicht verständliche Handhabung Strom zu produzieren. Bei Sonnenschein kann der Betreiber die Anlage mittels Schukostecker als Negativverbraucher an das Stromnetz anschließen und so aktiv die Energiewende vorantreiben.<sup>9</sup>

Aufgrund dieser sauberen Energiegewinnungstechnik aus Sonnenlicht, bieten Mikro-PV-Anlagen eine ökologisch passende Ergänzungsmöglichkeit für das Vorantreiben der Energiewende. Es muss aber bezweifelt werden, dass der Großteil der Mikro-PV-Anlagen Betreiber in diese aus rein ökologischen Gründen investiert. Für die Mehrheit der Investoren werden die ökonomischen Aspekte entscheidend sein, in eine Anlage zu investieren oder nicht. In einem probabilistischen Modell zur Analyse der Wirtschaftlichkeit von Mikro-PV-Anlagen konnten durch Piel (2014) erste Aussagen zum Potenzial dieser Anlagen getroffen werden. Mittels der Monte Carlo Simulation werden für dieses Modell Zufallszahlen in einem bestimmten Intervall für die risikobehafteten Eingangsparameter erzeugt und basierend auf einem Discounted Cash-Flow Modell Rentabilitätskennzahlen ermittelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Modell von Piel (2014) um Eingangsparameter, wie bspw. Ersatzinvestitionen und Inflation erweitert und eine webbasierte Benutzeroberfläche für dieses entwickelt. Dabei soll das Modell nicht nur das Potenzial von kleinen Anlagen bewerten können, sondern auch Aussagen über die Wirtschaftlichkeit größerer PV-Anlagen aufzeigen. Insbesondere wird hierbei auf die Diskussion und Beantwortung der folgenden Forschungsfragen eingegangen:

- (1) *Kann eine Web-Applikation nach der Eingabe individueller Rahmenbedingungen einem möglichen Investor aussagekräftige Kennzahlen über PV-Anlagen-Projekte liefern und damit allgemein als transparente Entscheidungshilfe eingesetzt werden?*
- (2) *Wie wirken sich kritische Eingangsparameter auf die Profitabilität einer PV-Anlage aus?*

Zur Beantwortung dieser Fragen wird ein webbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) entwickelt und eine Fallstudie auf drei verschiedenen Inseln durchgeführt, sowie eine Sensitivitätsanalyse bestimmter Eingangsparameter vollzogen.

Dazu wird im Folgenden zunächst auf den Forschungshintergrund eingegangen, welcher den Betrieb und die Chancen einer Mirko-PV-Anlage beschreibt, einen Überblick themenbezogener Literatur gibt und das Forschungsdesign schildert. Im Anschluss daran wird das

---

<sup>7</sup>Vgl. Märtel (2013b).

<sup>8</sup>Vgl. Windeck (2013).

<sup>9</sup>Vgl. Märtel (2013a).

EUS vorgestellt. Dabei wird nicht nur das Discounted Cash-Flow Modell (DCF) erläutert, sondern auch die die Systemarchitektur des EUS und die Entwicklung der Web-Applikation dargestellt. Hauptaugenmerk des Kapitel 4 wird die Fallstudie sein. Hier wird eine Potenzialbetrachtung der Mikro-PV-Anlagen, insbesondere unter Berücksichtigung der anfallenden Ersatzinvestitionen auf drei verschiedenen Inseln angestellt. Zudem erfolgt hier eine Sensitivitätsanalyse, um den Einfluss kritischer Eingangsparameter auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen aufzuzeigen. Auf dieser Grundlage werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse der Fallstudie und Sensitivitätsanalyse diskutiert, Möglichkeiten und Limitationen der EUS und der Web-Applikation gegenübergestellt und Handlungsempfehlungen gegeben. Im abschließenden Fazit werden die Aussagen der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

## 2 Forschungshintergrund

Der folgende Kapitel verweist auf themenbezogene Literatur und beschreibt das Vorgehen der weiteren Modellentwicklung durch den Design Science Research-Ansatz. Dazu wird zunächst die Funktionsweise und der Aufbau einer Mikro-PV-Anlage erklärt, sowie Chancen, Herausforderungen und die Marktentwicklung der Photovoltaik aufgezeigt.

### 2.1 Mikro-Photovoltaik

Mikro-PV-Anlagen sind unter mehreren Synonymen bekannt. In der Literatur sind die Begriffe Mikro-PV, Guerilla-PV, PV-Kleinanlagen, Plug & Play Module, Plug & Save Module und Balkon PV-Anlagen gängig. Von diesen hat sich bisher jedoch noch keiner als eindeutiger Fachbegriff etabliert. Die Installation dieser erweist sich als relativ unproblematisch. Die Module lassen sich als komplettes Set erwerben und beinhalten außer dem PV-Modul einen Mikro-Wechselrichter und die benötigten Kabel, um die Anlage als Negativverbraucher mit dem Stromnetz zu verbinden.<sup>10</sup> Dabei kann die Anlage platzsparend aufgebaut werden. Durch unterschiedliche Anbringungsmöglichkeiten wie bspw. die Montage an der Fassade, am Balkongeländer oder aufgestellt im Garten lässt sich die Mikro-PV-Anlage platzsparend unterbringen.<sup>11</sup> Auf Grundlage dieser sauberen, lautlosen und nicht sichtbeeinträchtigenden Alternative Strom zu produzieren, könnte sich die Mikro-PV-Anlage einer hohen Benutzerakzeptanz erfreuen. Dies scheint möglich, da eine Umfrage des Magazins für Wind-, Solar- und Bioenergie ergeben hat, dass sich Bürger schon von großen Photovoltaikparks nicht beeinträchtigt fühlen.<sup>12</sup>

Die Funktionsweise dieser Anlagen entspricht dabei der gleichen Art der Stromerzeugung großer Photovoltaikanlagen. Fallen Sonnenstrahlen auf die Oberfläche des PV-Moduls, wer-

---

<sup>10</sup>Vgl. Haselhuhn et al. (2014).

<sup>11</sup>Vgl. Märkel (2013a).

<sup>12</sup>Vgl. Ullrich (2015).

dings Fördermittel und Zuschüsse durch den Staat eine wichtigere Rolle spielen. Somit ist die Investition in eine Mikro-PV-Anlage im untersuchten europäischen Raum und gerade an den untersuchten Standorten wirtschaftlich gesehen zu empfehlen. Ökonomisch ermöglichen Mikro-PV-Anlagen ihren Investoren einen beachtlichen Gewinn und bieten ökologisch gleichzeitig einen Weg, emissionsfrei Strom dezentral zu produzieren und die Energiewende voranzutreiben. Von der Integration eines Speichers sollte zunächst abgesehen werden. Der im Haushalt nutzbare Solarstrom wird durch die Option der Speicherung nicht genügend erhöht, um die zusätzliche Investition in die Solarbatterie zu decken.

## 6 Fazit und Ausblick

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass die Entwicklung eines webbasierten Investment EUS für PV-Anlagen sehr komplex ist. Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es, eine benutzerfreundliche Web-Applikation zu erstellen, die probabilistische Aussagen über das Potenzial von PV-Anlagen an verschiedenen Standort ermöglicht. Zudem sollten kritische Eingangsparameter in dem zugrundeliegenden DCF-Modell auf Sensitivitäten untersucht werden. Für diese Problematik wurde zunächst ein umfassender Forschungshintergrund präsentiert. Dieser beschreibt insbesondere die Marktentwicklung, Herausforderungen und Chancen von PV und Mikro-PV-Anlagen. Außerdem zeigt der Forschungshintergrund einen umfangreichen Literaturüberblick auf. In diesem konnten Kosten-Nutzen-Analysen von PV-Anlagen und Sensitivitätsanalysen der Eingangsparameter der einzelnen Modelle ausfindig gemacht werden. Allerdings konnte kein webbasiertes und probabilistisches EUS für Investitionen in PV-Anlagen und PV-Kleinanlagen gefunden werden. Aus dieser Forschungslücke ergab sich weiterer Handlungsbedarf. Mit diesem wurde sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschäftigt. Deshalb wurde auf dem Forschungshintergrund aufbauend das DCF-Modell von Piel (2014) weiterentwickelt. In dieses konnten zusätzliche Eingangsparameter und Formeln integriert werden, sodass eine exaktere Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Mikro-PV-Anlagen stattfinden kann. Zudem wurden weitere Parameter, wie bspw. die Projektlaufzeit als risikobehaftet definiert, weshalb die Wirtschaftlichkeitsrechnung mehr Risiko abdeckt als zuvor. Anschließend wurde die Gestaltung der System Architektur dargestellt und umgesetzt. Das DCF-Modell konnte, verknüpft mit der Monte Carlo Simulation, in MATLAB implementiert und eine grafische Darstellung der Ergebnisse erreicht werden. Ein geeignetes GUI wurde mit Ruby on Rails erstellt und die darüber getätigten Eingaben in einer SQL-Datenbank gespeichert. Damit die Wirtschaftlichkeitsrechnung von der Eingabe der Eingangsparameter bis zu Ausgabe der Ergebnisparameter reibungsfrei abläuft, mussten passende Schnittstellen zwischen den Programmen ermittelt werden. Nachdem der flüssige Ablauf der Wirtschaftlichkeitsrechnung gewährleistet wurde, konnte mittels einer durchgeführten Fallstudie auf drei verschiedenen europäischen Inseln das Potenzial einer Mikro-PV-Anlage mit und ohne Speicher bestimmt werden. Anhand eines der Szenarien



wurde daraufhin eine Sensitivitätsanalyse vollzogen. Zu diesem Zweck fand die CtV-Methode Anwendung. Des Weiteren wurden kritische Eingangsparameter ausgewählt und deren Einfluss auf den Ergebnisparameter NPV näher betrachtet.

Die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass eine Mikro-PV-Anlage unter den gewählten Rahmenbedingungen ein rentables Projekt sein kann. An allen drei Standorten sind die ermittelten Projektwerte der Anlagen ohne Speicher positiv und versprechen dem Investor einen Gewinn. Anhand der Analysen einer Anlage in Kombination mit einem Speicher kann festgehalten werden, dass die Projektwerte geringer ausfallen und sich die Installation eines Speichers folglich nicht rentiert. Am Standort Norderney führt die Integration eines Speicher sogar dazu, dass der Großteil der prognostizierten NPV negativ sind. Somit ist die Verwendung eines Speicher an den Standort nicht zu empfehlen. In diesem Zusammenhang muss allerdings vermerkt werden, dass sämtliche Ergebnisse nur für die bestimmten Szenarien mit den getroffenen Annahmen gelten. In einem anderen Kontext einer PV-Anlage mit größeren Solarpanel und einem größeren Speicher kann die Interpretation der Ergebnisse abweichen. Mit Hilfe von 3D-Grafiken konnten anschließend Einflüsse ausgewählter Parameter auf den NPV einer Investition in eine Mikro-PV-Anlage ohne Speicher auf Norderney veranschaulicht werden. Die CtV ergab, dass Strompreis, Moduleffizienz, Wirkungsgrad des Wechselrichters und Projektlaufzeit einen ausschlaggebenden Beitrag zum Gesamtrisiko des NPV leisten. Deshalb kann auch die Empfehlung ausgesprochen werden, dass ein Investor bei der Investition stark auf die Qualität der verbauten Teile achten sollte.

In Bezug auf die entwickelte Web-Applikation kann abschließend die Bilanz gezogen werden, dass sich diese durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit auszeichnet. Im Laufe der Masterarbeit wurde eine Web-Applikation geschaffen, die den Nutzer übersichtlich durch die Wirtschaftlichkeitsrechnung führt und dem Nutzer anschließend die ermittelten Ergebnisparameter verständlich vor Augen führt. Zudem konnten eine Verwaltung der Szenarien und eine Mandantenfähigkeit mit Benutzerrollen in das EUS programmiert werden. Wie sich in den Limitationen der Web-Applikation und des EUS heraus gestellt hat, sind aktuell noch alle verwendeten Programme für das webbasierte EUS lokal auf dem Rechner notwendig. Damit zukünftige Nutzer nicht Lizenzen für die erforderlichen Programme erwerben müssen, sollte im weiteren Umgang mit der Web-Applikation, MATLAB und Ruby on Rails auf einem Server verwaltet und das GUI der Wirtschaftlichkeitsrechnung über eine geeignete Client-Server-Architektur zur Verfügung gestellt werden. Dementsprechend wäre die Applikation online verwendbar. Die komplexe Wirtschaftlichkeitsrechnung würde auf dem Computer stattfinden und somit der ubiquitäre Zugriff auf die Web-Applikation gewährleistet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der vorliegenden Masterarbeit ein webbasiertes Investment EUS für PV-Anlagen, die innerhalb eines Jahres installiert werden und für die keine Fremdfinanzierung erforderlich ist, entwickelt werden konnte. Einem möglichen In-

vestor liefert es aussagekräftige Informationen und lässt sich als Entscheidungshilfe einsetzen.

Es bleibt zu hoffen, dass Informationen über die ökonomischen Aspekte für den Investor und ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt infolge der Installation von PV-Anlagen breit gestreut werden. Gelingt dies, besteht eine große Chance, die gesetzten Ziele der Energiewende in der Zukunft zu verwirklichen.