



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Symbolverzeichnis	viii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Forschungshintergrund</b>	<b>3</b>
2.1 Methodik . . . . .	3
2.2 Literaturüberblick . . . . .	6
<b>3 Theoretische Grundlagen</b>	<b>12</b>
3.1 Photovoltaikanlagen: Hintergründe und Funktionsweise . . . . .	12
3.2 Energiespeichersysteme . . . . .	15
3.2.1 Elektrischer Speicher . . . . .	15
3.2.2 Alternative Speichersysteme . . . . .	17
3.3 Photovoltaikanlagen in hybriden Konfigurationen . . . . .	18
3.4 Sonneneinstrahlung und Klima in verschiedenen Erdregionen . . . . .	21
3.4.1 Europa, Nordamerika und Asien . . . . .	21
3.4.2 Afrika, Südamerika und Australien/Ozeanien . . . . .	22
3.4.3 Inseln . . . . .	24
<b>4 Beschreibung des mathematischen Modells</b>	<b>25</b>
4.1 Benötigte Inputdaten . . . . .	25
4.2 Realitätsausschnitt und allgemeine Modellannahmen . . . . .	27
4.3 Modellformulierung . . . . .	33
4.3.1 Energetische Modellierung . . . . .	33
4.3.1.1 Leistung der Photovoltaikanlage . . . . .	33
4.3.1.2 Batteriespeicher . . . . .	36
4.3.2 Ökonomische Modellierung . . . . .	40
4.3.2.1 Net Present Value . . . . .	40
4.3.2.2 Life Cycle Cost . . . . .	44
4.3.3 Ökologische Modellierung . . . . .	45
<b>5 Entwicklung des Simulationstools</b>	<b>47</b>
5.1 Anforderungsanalyse . . . . .	47
5.2 Implementierung des Modells in MATLAB . . . . .	49

<b>6</b>	<b>Fallstudie: Anwendung des Simulationstools in der Region Hannover</b>	<b>63</b>
6.1	Spezifische Gegebenheiten der Region . . . . .	63
6.1.1	Klimatische Bedingungen . . . . .	63
6.1.2	Flächenpotential für Photovoltaik-Installationen . . . . .	67
6.2	Szenario 1: Zentrale Erzeugung von Photovoltaik-Strom in der Region Hannover . . . . .	69
6.2.1	Szenariospezifische Annahmen . . . . .	69
6.2.2	Ergebnisse . . . . .	71
6.2.3	Sensitivitätsanalyse . . . . .	73
6.3	Szenario 2: Dezentrale Erzeugung von Photovoltaik-Strom in der Region Hannover bei Betrachtung verschiedener Gebäudetypen . . . . .	74
6.3.1	Szenariospezifische Annahmen . . . . .	74
6.3.2	Ergebnisse . . . . .	76
6.3.2.1	Szenario 2a: Kein Speichereinsatz . . . . .	76
6.3.2.2	Szenario 2b: Einsatz eines Lithium-Ionen-Speichers . . . . .	79
6.3.2.3	Szenario 2c: Einsatz eines Blei-Säure-Speichers . . . . .	83
6.3.3	Sensitivitätsanalysen . . . . .	84
6.4	Potentiale für die Region Hannover . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Kritische Würdigung</b>	<b>96</b>
7.1	Diskussion und Limitationen . . . . .	96
7.2	Handlungsempfehlungen für das Tool und die Politik . . . . .	100
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>105</b>
	<b>Literatur</b>	<b>108</b>
	<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>116</b>
	<b>Anhang A: MATLAB-Implementierung</b>	<b>117</b>
	<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>161</b>

# Abstrakt

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Simulationssoftware, mit deren Hilfe verschiedene Potentiale von Photovoltaikanlagen in einer festgelegten Region ermittelt werden sollen. Konkret beziehen sich diese Potentiale auf den wirtschaftlichen Einsatz, den Autarkiegrad vom Stromnetz sowie den regionalen Beitrag zum Klimaschutz. Hierzu wird ein mathematisches Modell präsentiert, welches in MATLAB implementiert und anschließend mit den vorhandenen Daten der Region Hannover anhand einer Fallstudie angewendet wird. Es zeigt sich, dass Speichersysteme für größere Gebäude als Zweifamilienhäuser nicht lohnenswert sind, da ihre Eigenverbräuche ohnehin schon sehr groß sind. Speicher werden daher lediglich für Ein- und Zweifamilienhäuser simuliert. Hier ergeben sich in den unterschiedlichen Szenarien uneinheitliche Ergebnisse. Es kann jedoch die Tendenz festgehalten werden, dass Speicher in Zweifamilienhäusern aktuell vorteilhafter sind. Ermittelt wird weiterhin das theoretische, technische, wirtschaftliche sowie erschließbare Potential von Photovoltaikanlagen in der Region Hannover, wobei sich das erschließbare Potential in Folge von Speichersubventionen in einzelnen Fällen größer darstellt als das wirtschaftliche Potential. Das beste Ergebnis hinsichtlich Autarkie wird erreicht, wenn sämtliche Gebäudetypen auf einen Speicher verzichten. In diesem Fall arbeiten alle Anlagen wirtschaftlich. Auch das Einsparpotential von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ist hier maximal, da dieses letztendlich vom erschließbaren Potential abhängig ist.

**Schlagwörter:** Erneuerbare Energien, Photovoltaik, Speicher, Potential, Klimaschutz, Stromnetzautarkie, Simulation, Transformation des Energiesystems

## 1 Einleitung

Für die Notwendigkeit einer Transformation des Energiesystems existieren vielschichtige Gründe. So entfallen z.B. durch den beschlossenen Atomausstieg zukünftig mit den noch aktiven Kernkraftwerken in Deutschland wichtige Stromproduzenten, deren gesamte Nennleistung im Jahr 2016 11,357 Gigawatt (GW) beträgt.<sup>1</sup> Weiterhin gehen die fossilen Energieträger immer weiter zurück, da die entsprechenden Ressourcen nicht unbegrenzt vorhanden sind. Problematisch ist außerdem, dass sich in Folge des Treibhauseffekts das Klima auf der Erde zunehmend erwärmt, was unter anderem für die Polkappen auf Dauer fatale Folgen hat.<sup>2</sup> Das ewige Eis beginnt zu schmelzen und der Meeresspiegel steigt, was wiederum dazu führen kann, dass ganze Inseln in Zukunft im Meer versinken. Es ist also unbedingt erforderlich, den Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben, um eine nachhaltige Energieversorgung zu gewährleisten und den Rückgang fossiler Energieres-

---

<sup>1</sup> Vgl. Deutsches Atomforum (2016)

<sup>2</sup> Vgl. Alsema (2000), S. 17

sources zumindest abzufedern.<sup>3</sup> In Bezug auf das Thema der vorliegenden Arbeit sind Photovoltaik (PV)-Anlagen also von großer Bedeutung, da sie die unberent vorhandene Sonnenenergie in Strom umwandeln können und außerdem die Nutzung des Solarstroms deutlich umweltschonender ist als die herkömmlich erzeugten Stroms. Die gesamte Nennleistung aller in Deutschland installierten PV-Anlagen betrug Ende des Jahres 2015 bereits ca. 40 GW und übertraf damit bereits die aller anderen Kraftwerkstypen.<sup>4</sup> So beträgt sie bspw. ca. das Dreieinhalbfache der gesamten Nennleistung aller aktiven Kernkraftwerke in Deutschland. Daraus lässt sich bereits abschätzen, über welches großes Potential die PV verfügt.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit besteht somit darin, die unterschiedlichen Potentiale auf regionaler Ebene durch den Einsatz eines Simulationstools möglichst genau zu bestimmen. Die Arbeit ist dabei eingebunden in das übergeordnete Projekt „LiFE 2050 Energiesystemsimulator (LESSI)“ der Leibniz Universität Hannover. Dessen Ziel ist es, die Auswirkungen verschiedener Transformationspfade unter Berücksichtigung von Versorgungssicherheit, Rentabilität und Klimaschutz zu analysieren. Hierzu wird im LESSI eine Software geschrieben, die ein regionales Energiesystem simulieren kann. Die PV, die das Thema der vorliegenden Arbeit ist, bildet somit einen Teil dieser Gesamtsimulation. Dies führt schließlich zu der folgenden Forschungsfrage, die dieser Abhandlung zugrunde liegt.

***Forschungsfrage:*** *Über welche Potentiale verfügt die Photovoltaik im Rahmen der Transformation eines regionalen Energiesystems hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Autarkie und Klimaschutz?*

Der Aufbau dieser Arbeit ist wie folgt gegliedert. Im Anschluss an diese kurze Einleitung in das Thema folgt der Forschungshintergrund, in dem die methodischen Vorgehensweisen dargelegt werden und eine Analyse der relevanten Literatur vorgenommen wird. Darauf folgen die theoretischen Grundlagen, die sich mit der Funktionsweise der PV, verschiedenen Speichersystemen, Hybridkonfigurationen in Kombination mit solarthermischen Modulen und Windturbinen sowie den klimatischen Bedingungen auf der Erde befassen. Kapitel 4 behandelt anschließend das mathematische Modell, auf dem die Simulation beruht. Nach Beschreibung der Inputdaten sowie des gewählten Realitätsausschnitts erfolgt die Modellierung, die in eine energetische, ökonomische sowie ökologische Modellierung aufgeteilt ist. Im fünften Kapitel wird die Implementierung in MATLAB präsentiert, ehe das Tool in Kapitel 6 anhand einer Fallstudie in der Region Hannover angewendet wird. In ihr werden drei Szenarien betrachtet, wobei das abschließende Szenario in drei Subszenarien

---

<sup>3</sup> Vgl. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (2014), § 1, Abs. 1, S. 6

<sup>4</sup> Vgl. Wirth (2016), S. 5

untergliedert wurde. Es werden einige Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss ausgewählter Variablen auf die Resultate zu untersuchen. Den Abschluss des Fallstudienkapitels bilden die Potentiale, die in der Region Hannover für die PV vorhanden sind. Im siebten Kapitel erfolgt die kritische Würdigung der Arbeit, in der die Ergebnisse diskutiert und hinterfragt werden. Außerdem werden Handlungsempfehlungen gegeben, die sowohl die Auflösung etwaiger Limitationen dieser Arbeit als auch konkret die Region Hannover betreffen. Das Fazit und ein kurzer Ausblick auf künftige Forschungsmöglichkeiten bilden in Kapitel 8 den Abschluss der vorliegenden Arbeit.

## 2 Forschungshintergrund

### 2.1 Methodik

Bevor die theoretischen Grundlagen und Einführungen in die Materie der PV erfolgen, soll es in diesem Kapitel zunächst darum gehen, die Hintergründe der vorliegenden Arbeit näher zu beleuchten. Hierzu werden zunächst die methodischen Vorgehensweisen der Abhandlung vorgestellt, d.h. es werden Definitionen und Erläuterungen zu den einzelnen Werkzeugen dargelegt, die in dieser Arbeit Anwendung finden. Anschließend folgt in Abschnitt 2.2 ein Literaturüberblick über bereits existierende Ansätze.

Der wichtigste Teil der Methodik, der gleichzeitig auch den Rahmen der gesamten Vorgehensweise dieser Arbeit bildet, ist der sogenannte „Design Science Research (DSR)“-Ansatz. Bei diesem geht es darum, neue Artefakte wie bspw. IT-Anwendungen zu entwickeln, die von Relevanz für eine betrachtete Umwelt sind und dort aufgedeckte Probleme lösen können.<sup>5</sup> DSR kann als iterativer Algorithmus bezeichnet werden, der aus drei Bereichen besteht. Im ersten Bereich wird die betrachtete Umwelt genau analysiert und die eben schon erwähnten relevanten Probleme werden identifiziert. Der zweite Bereich besteht aus der gründlichen Analyse bestehender Literatur, die für die Entwicklung des neuen Artefakts als Grundlage dienen kann. Mit Hilfe der bestehenden Ansätze und der identifizierten Bedürfnisse der Umwelt besteht dann der dritte Bereich des DSR aus der eigentlichen Hauptarbeit, namentlich der Entwicklung des neuen Artefakts.<sup>6</sup> Entscheidend beim DSR ist nun, dass das erzielte Ergebnis einer Feldstudie unterzogen wird. In dieser wird getestet, ob das entwickelte Artefakt die ermittelten Bedürfnisse der Umwelt auch adäquat bedienen kann. Sollte dies nicht der Fall sein, so wird im Rahmen einer Evaluation festgestellt, wie das Artefakt in zukünftigen Iterationen verbessert werden kann.<sup>7</sup> Aufgrund dieses iterativen Charakters des DSR stellt Hevner (2007) die drei Bereiche als

---

<sup>5</sup> Vgl. Hevner et al. (2004), S. 77

<sup>6</sup> Vgl. Hevner et al. (2004), S. 79-81; Hevner (2007), S. 88-91

<sup>7</sup> Vgl. Hevner (2007), S. 89

Laufzeiten über mehrere Dekaden ausgelegt, wodurch sich eine erneute Bindung an eine schadstoffreiche Stromproduktion ergibt, was jedoch gerade vermieden werden soll.<sup>199</sup>

Für die Erfüllung der allgemeinen Klimaschutzziele Deutschlands ist es außerdem notwendig, dass für die regionale Ebene ausreichend Geldmittel zur Verfügung gestellt werden, sodass z.B. in der Region Hannover die natürlichen Ressourcen mit größtmöglicher Effizienz genutzt werden können. Dies ist für eine Substitution fossiler Energieträger unabdingbar.<sup>200</sup> Außerdem ist eine kontinuierliche Investition in die Forschung und Entwicklung von PV-Modulen von großer Bedeutung, um den Wirkungsgrad bzw. die Energieumwandlungseffizienz weiter zu verbessern und dementsprechend die Anlagenerträge steigern zu können. An dieser Stelle ist jedoch fraglich, ob dies auf regionaler Ebene geschehen kann oder ob dies nicht eher das gesamte Bundesgebiet betrifft.

## 8 Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Tools, mit dessen Hilfe eine simulationsbasierte Ermittlung der Potentiale von PV-Anlagen durchgeführt werden kann. Es handelt sich zwar um eine eigenständige Abhandlung, jedoch ist sie außerdem Teil des Projekts LESSI, das sich mit verschiedenen Transformationspfaden des Energiesystems auseinandersetzt. Besonders hervorzuheben ist, dass zwei unterschiedliche Arten der simulierten Speicheralterung modelliert und ausgewertet wurden, wobei sich in diesem Zuge mitunter große Unterschiede in der Ergebnisqualität gezeigt haben. Außerdem wurde die Modellierung in einen energetischen, ökonomischen und ökologischen Abschnitt aufgeteilt, sodass sowohl die Anlagenleistung und sämtliche Speicherberechnungen, aber auch wirtschaftliche Belange sowie Berechnungen zur Ökobilanz von PV-Anlagen ermöglicht wurden. Mit dem NPV und den LCC wurden zwei bedeutende wirtschaftliche Kennzahlen modelliert und simuliert, die für eine Investitionsentscheidung von großer Relevanz sind. Die Arbeit war dabei wie folgt gegliedert. Nach einer kurzen Einleitung, die die Forschungsfrage sowie die Motivation hinter der Abhandlung darlegte, erfolgte die Darstellung des Forschungshintergrunds, in dem die Methodik sowie ein kurzer Überblick über die identifizierte relevante Literatur präsentiert wurden. Im Anschluss wurden in den theoretischen Grundlagen einige Hintergrundinformationen gegeben, die die PV sowie dazugehörige Speicher betreffen. Die Präsentation des Modells erfolgte in Kapitel 4, hier wurden die benötigten Formeln ausführlich hergeleitet und erläutert. Nach der Darstellung der Modellimplementierung in MATLAB wurde das Simulationstool in Kapitel 6 anhand der Region Hannover angewendet. Einzelne Variablen wurden in diesem Zuge sensitiv analysiert. Im siebten Kapitel erfolgte schließlich die kritische Würdigung der Ar-

---

<sup>199</sup> Vgl. Klaus et al. (2010), S. 128

<sup>200</sup> Vgl. Klaus et al. (2010), S. 125

beit, in der die Ergebnisse diskutiert und Limitationen beschrieben wurden. Außerdem wurden Handlungsempfehlungen gegeben, die einerseits den Ansatz und das Tool sowie andererseits die Politik der Region Hannover betreffen.

Wie eingangs in Abschnitt 2.1 beschrieben, liegt dieser Arbeit mit dem DSR ein anerkannter methodischer Ansatz zugrunde. Der Atomausstieg Deutschlands sowie der Rückgang fossiler Energieträger machen eine Transformation des Energiesystems unumgänglich. Zusätzlich wird dem Klimaschutz eine immer größere Bedeutung beigemessen. Es existiert also eine große Relevanz des Themas, wodurch sich die Rechtfertigung für die vorliegende Forschungsarbeit ergibt. Im Rahmen des Rigorzyklus des DSR wurde relevante Literatur identifiziert und zu einem Gesamtmodell kombiniert. Unterstützt wurde die Modellierung außerdem durch eigene Ansätze. Durch die Fallstudie in der Region Hannover wurde das anschließend entwickelte IT-Artefakt praktisch angewendet. Wie sich gezeigt hat, wurden größtenteils zufriedenstellende und realistische Ergebnisse erzielt, wohlgermerkt auf stark approximativer Ebene. Es existieren große Potentiale in der Region, da bereits zum jetzigen Zeitpunkt die entsprechenden Anlagengrößen auf allen betrachteten Gebäudetypen Erträge erwirtschaften, solange kein Speicher eingesetzt wird. Aber auch mit Speicher können bis zu 6,83% des gesamten Stromverbrauchs der Region durch die PV gedeckt werden. Bei Einbeziehung einer Subventionierung sind es sogar bis zu 7,12%. Das bedeutet, dass alleine durch den Einsatz von PV-Anlagen bereits ein bedeutender Autarkiegrad erreicht werden kann. Ergänzt um weitere erneuerbare Energiequellen im LESSI kann erwartet werden, dass sich die Autarkie noch deutlich verbessert. Auch in ökologischer Hinsicht sind große regionale Einsparpotentiale von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten vorhanden. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das entwickelte IT-Artefakt also adäquat funktioniert.

Die zukünftigen Forschungsansätze lassen sich aus den Limitationen ableiten. Da dem DSR wie beschrieben ein iterativer Charakter zugrunde liegt, besteht hier demnach die Möglichkeit, im Rahmen einer Weiterentwicklung die nächste Iteration durchzuführen und das Tool zu verbessern. Hier sei bspw. an den Umstand erinnert, dass im LESSI zum jetzigen Zeitpunkt der Speicher sowie die wirtschaftlichen und ökologischen Simulationen noch nicht funktionieren würden. Außerdem sind bislang keine zentralen Speicher für die gesamte Region berücksichtigt worden. Weiterhin sollte es das Ziel sein, die beschriebenen Abstraktionsfehler nach und nach auszubessern, um noch genauere Ergebnisse zu erhalten. Sollte das Tool um schwankende Strompreise und die geförderte Direktvermarktung erweitert werden, wäre es außerdem sinnvoll, im Zuge der folgenden Iteration „intelligente“ Speicher zu modellieren, um auf diese Weise eine realistischere Speicherstrategie zu ermöglichen. Wichtig wäre es außerdem, den Ansatz der perfekten Kenntnis über den zukünftigen Stromverbrauch abzuschwächen. Hieraus ergeben sich höchstwahrscheinlich Interpretationsfehler in Bezug auf die wirtschaftlichen Kennzahlen. So könnte zukünftig

durch den Einsatz stochastischer Verfahren gewissermaßen eine Schwankung im Verbrauch realisiert werden, die die Ergebnisse der Potentialanalysen noch weiter verbessert. Denkbar wäre es zusätzlich, neben der bisherigen Simulation auch eine Optimierung in das Tool einzubauen, die z.B. die individuell beste Anlagenkonfiguration ermitteln könnte. Auch eine Erweiterung der Flächenpotentiale um die Gebäudefassaden könnte möglicherweise Berücksichtigung finden, hier müsste jedoch sehr genau auf die Standorte der Gebäude geachtet werden, da in Folge gegenseitiger Verschattungen deutlich weniger Sonnenlicht eingefangen werden kann als auf Dächern.

Es lässt sich also festhalten, dass in der vorliegenden Arbeit ein für die Umwelt relevantes und neues Artefakt entwickelt wurde, das jedoch noch einige Schwachstellen aufweist. Gleichwohl ist dies im DSR durchaus üblich, da entwickelte Artefakte in iterativer Weise weiterentwickelt werden können. Eine Verbesserung ist demnach nicht nur möglich, sondern sicherlich auch sinnvoll. Es wurde gezeigt, dass auf der Ebene einer abgeschlossenen Region durchaus große Potentiale von PV-Anlagen existieren. Wenn diese nach und nach ausgeschöpft werden, so kann die Region Hannover eine beachtliche Autarkie erreichen. Der ökologische Fußabdruck wird sich ebenfalls kontinuierlich verbessern, was in Zeiten globaler Probleme wie dem Klimawandel von eminenter Wichtigkeit ist.