

Toolbasierte Potentialanalysen von Solarthermieanlagen

Masterarbeit

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

vorgelegt von

Name: Krüger

Vorname: Niclas



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 27. September 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Methodik und Vorgehensweise	2
2 Literaturüberblick	5
3 Theoretische Grundlagen zur Solarthermie	9
3.1 Aufbau und Funktionsweisen von Solarthermieanlagen	9
3.1.1 Technologien von Solarkollektoren	9
3.1.2 Klassifizierung von Solarthermiesystemen	12
3.1.3 Verschiedene Anwendungen und Systemkonfigurationen	14
3.2 Vorteile und Herausforderungen	16
3.3 Solarthermie weltweit und in Deutschland - Marktdaten und Entwicklungen	18
4 Mathematische Modellierung von Solarthermieanlagen	22
4.1 Beschreibung der Inputdaten	22
4.2 Erläuterung des Realitätsausschnittes	22
4.3 Herleitung eines mathematischen Modells	26
4.3.1 Energetische Modellierung	26
4.3.1.1 Berechnung der Sonneneinstrahlung	26
4.3.1.2 Gewinnung von Wärmeenergie durch Solarkollektoren . . .	27
4.3.1.3 Temperaturveränderungen innerhalb eines Wärmespeichers	31
4.3.2 Bewertung der Wirtschaftlichkeit	34
4.3.3 Ökologischer Einfluss durch Substitution fossiler Brennstoffe	38
4.4 Implementierung der Modellierung in Matlab und Toolentwicklung	40
4.4.1 Anforderungen und Schnittstellen innerhalb des Projekts	40
4.4.2 Objekt-Orientierte Programmierung und struktureller Aufbau . . .	42
5 Praktische Simulation des Tools am Fallbeispiel der Region Hannover	43
5.1 Datengrundlage und spezifische Gegebenheiten	43
5.1.1 Klimatische Bedingungen	43
5.1.2 Gebäudedaten, Wärmebedarf und Parametereinstellungen	44

5.2	Darstellung der Simulationsergebnisse	47
5.2.1	Energetische Ergebnisse	47
5.2.2	Wirtschaftliche Ergebnisse	53
5.2.3	Ökologische Ergebnisse	56
5.3	Sensitivitätsanalysen	58
5.4	Quantifizierung des Potentials von Solarthermieanlagen	63
5.4.1	Theoretisches und technisches Potential	63
5.4.2	Wirtschaftliches und ökologisches Potential	66
5.4.3	Erwartungspotential	71
6	Implikationen und Handlungsempfehlungen	76
6.1	Für Endverbraucher	76
6.2	Für politische Entscheidungsträger	77
7	Schlussbetrachtung	80
7.1	Diskussion und Limitationen	80
7.2	Zukünftige Forschungsfelder	82
7.3	Fazit	83
	Literatur	85
	Quellcodeverzeichnis	92
A	Entwicklerhandbuch	93
A.1	Überblick	93
A.2	Use Case für die Region Hannover	95
A.3	Skripte	97
A.4	Klassen	123
A.5	Funktionen	138
A.6	Sonstige Dateien	142
A.7	Änderungsprotokoll für den LESSI	144
B	Ergebnistabellen	147
	Ehrenwörtliche Erklärung	152

Abstrakt

Ziel dieser Arbeit ist die Abschätzung des Potentials von Solarthermieanlagen. Hierfür wird zunächst ein mathematisches Modell gemäß Design Science Research aufgestellt und implementiert, das eine Vielzahl von Ansätzen aus der Fachliteratur vereint. Vor dem Hintergrund der Ziele der Energiewende und der Transformation des Energiesystems wird ein besonderer Fokus auf Faktoren wie Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit gelegt. Mit einem auf Basis von Matlab entwickelten Tool, das gleichzeitig ein Teilmodul des Forschungsprojekts „LiFE 2050 Energiesystemsimulator“ darstellt, kann eine Fallstudie für die Region Hannover durchgeführt werden. Die Ergebnisse in Verbindung mit Sensitivitätsanalysen lassen darauf schließen, dass Solarthermieanlagen in der Region Hannover durchaus mit positivem Potential verbunden sind. Durch die Herleitung unterschiedlicher Potentialbegriffe kann ein detailliertes Bild des Potentials von Solarthermieanlagen in der Region Hannover gezeichnet werden. Am Ende dieser Arbeit steht ein Tool, mit dem auch für andere Regionen Potentialanalysen vorgenommen werden können.

Schlagwörter: Solarthermie, Potentialanalyse, Matlab-Tool, Transformation des Energiesystems, Erneuerbare Energien, LiFE 2050 Energiesystemsimulator, Region Hannover

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Im Jahr 2010 formulierte die Bundesregierung die zentralen Ziele der Energiewende in ihrem Energiekonzept. Durch eine Transformation des Energiesystems soll der Ausstoß von Treibhausgasen demnach bis zum Jahr 2050 um mindestens 80% im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden.¹ Neben der Umweltverträglichkeit werden der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit der Energieversorgung dabei besondere Bedeutung beigemessen. Teilstrategie der Energiewende ist die Gebäudestrategie, die den Ausbau erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung und eine Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden vorsieht. Bis zum Jahr 2050 ist so die Realisierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands intendiert.² Die Solarthermie (ST) kann zu dieser Gebäudestrategie und somit auch zur gesamten Energiewende einen wesentlichen Beitrag leisten. Bereits 2015 konnten ST-Anlagen mit einer in Deutschland installierten Gesamtleistung von 13,4 GW etwa 1% des gesamten Wärmebedarfs deutscher Haushalte decken.³ Vor dem Hintergrund der

¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010), S. 5

² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015a)

³ Vgl. Bundesverband Solarwirtschaft (2016a); Bundesverband Solarwirtschaft (2016b)

Verknappung fossiler Energieträger und den Zielsetzungen der Energiewende ist damit zu rechnen, dass der ST auch in Zukunft hohe Relevanz beigemessen wird.

Das Ziel der vorliegenden Abhandlung ist die Analyse des Potentials von ST-Anlagen. Hierzu soll sowohl eine mathematische Modellierung hergeleitet als auch ein Tool auf Basis von Matlab entwickelt werden. Dabei soll das entwickelte Tool später ein Teilmodul des LiFE 2050 Energiesystemsimulator (LESSI)-Projekts der Leibniz Universität Hannover darstellen. Ziel dieses Projekts ist die Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Transformationspfade des Energiesystems in Bezug auf die Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit der Energieversorgung. Am Ende des Projekts soll eine skalierbare Simulationssoftware stehen, mit der zunächst ein regionales Energiesystem untersucht werden kann. Das hier entwickelte Tool stellt in dieser Simulationssoftware die Energieerzeugung von ST-Anlagen dar. Gemäß den formulierten Zielen der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit unterteilt sich die Analyse in dieser Arbeit in einen energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Teil. Durch eine Simulation am Fallbeispiel der Region Hannover sollen Ergebnisse generiert werden, aus denen das Potential von ST-Anlagen hergeleitet werden kann. Hierfür werden mehrere Potentialbegriffe ermittelt, die eine vielschichtige Quantifizierung des Potentials von ST-Anlagen möglich machen. So kann abgeschätzt werden, welchen Stellenwert die ST bei der zukünftigen Energieversorgung einnimmt. In dieser Abhandlung stellt sich demnach folgende Forschungsfrage:

Wie kann das Potential von Solarthermieanlagen durch den Einsatz toolbasierter Analysen bestimmt werden und als wie groß ist dieses letztlich unter energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten einzuschätzen?

1.2 Methodik und Vorgehensweise

Bei der Entwicklung und Implementierung des Tools zur Potentialanalyse von ST-Anlagen wurde sich am Design Science Research (DSR)-Ansatz von Hevner (2007) orientiert. Demnach besteht diese Methode aus drei eng verbundenen Zyklen von Aktivitäten, namentlich dem Relevanz-, dem Rigor- und dem Designzyklus. Ziel des DSR-Ansatzes ist die Generierung eines oder mehrerer Artefakte, welche einen Erkenntnisgewinn liefern sollen.⁴ In dieser Arbeit stellen ein mathematisches Modell und ein aus diesem entwickeltes Tool zur Potentialanalyse von ST-Anlagen diese Artefakte dar. Innerhalb dieses Abschnittes sollen daher die Funktionen bzw. Aktivitäten der jeweiligen Zyklen erläutert werden. Anschließend soll kurz das Vorgehen bei der Modellierung und der Ermittlung des Potentials

⁴ Vgl. Hevner (2007), S. 87

auch Nahwärmenetze. Kombinationen mit Wärmepumpen oder Geothermieanlagen könnten sich darüber hinaus als interessant erweisen. Neben den Verbesserungen an der Modellierung kann auch die Simulation in zukünftigen Arbeiten ausgeweitet werden. Der Einsatz von VRKs oder auch Schwimmbadabsorbern ist hier denkbar. Gleichmaßen könnte sich die Einbeziehung von Nicht-Wohngebäuden lohnen. Ferner sollten weitere Regionen untersucht werden. In einer zukünftigen Simulation ist dann auch die Berücksichtigung von Unsicherheit denkbar. Diese könnte beispielsweise durch stochastische Verfahren einfließen, die das Wetter beeinflussen.

Letztendlich sollte auch das Tool in Zukunft weiter überarbeitet werden. Alleine durch die Entwicklung einer Benutzeroberfläche könnten hier vielfältige Verbesserungen erreicht werden. So könnte die Benutzbarkeit durch eine Erleichterung der Dateneingabe verbessert werden. Ebenso ist eine Automatisierung bei der Erstellung von Grafiken denkbar. Weitere Vorteile bietet eine Benutzeroberfläche im Hinblick auf die Fehlertoleranz und die Stabilität des Tools. Durch individuelle Fehlermeldungen können fehlerhafte Eingaben vermieden werden. Auch die Performance kann verbessert werden, da über eine Benutzeroberfläche der genaue Umfang des Tools besser festgelegt werden kann. Als Benutzeroberfläche käme hier beispielsweise eine Web-Applikation auf Basis von Ruby on Rails infrage. Außerdem wäre es möglich, das Tool um die Möglichkeit einer Optimierung zu erweitern. So könnte für ein festgelegtes Gebäude etwa die Dimensionierung der Anlage oder deren Ausrichtung unter gegebenen Parametern optimiert werden. Das Tool könnte so gleichzeitig als Entscheidungsunterstützungssystem dienen.

7.3 Fazit

Mittels des DSR-Ansatzes konnte in dieser Arbeit ein Tool entwickelt werden, mit dessen Hilfe das Potential von ST-Anlagen bestimmt werden konnte. Eine Besonderheit stellte hierbei die enge Anlehnung an das Energiekonzept der Bundesregierung dar, die durch die Berücksichtigung energetischer, wirtschaftlicher und ökologischer Faktoren erreicht wurde. Hierzu wurde zunächst im Rahmen des Relevanzzyklus in der Einleitung die Bedeutsamkeit der ST herausgestellt. Angeschlossen hieran wurde der Rigorzyklus mit einem Überblick über die vorhandene Fachliteratur. Dabei wurden mehrere Ansätze nach verschiedenen Kriterien innerhalb einer Tabelle kategorisiert. Ausführliche theoretische Grundlagen zum Thema der ST bildeten dann das Fundament für weitere Untersuchungen. Der Designzyklus begann mit der Herleitung einer mathematischen Modellierung, die sich aus einer Vielzahl bereits validierter Ansätze zusammensetzt, wodurch sie den spezifischen Anforderungen angepasst werden konnte. Hierdurch konnten zahlreiche Einflussfaktoren einbezogen werden, die eine realitätsnahe Modellierung ermöglichen. Als der größte Fehlerterm stellte sich die fehlende Temperaturschichtung heraus.

Im Anschluss daran konnte durch eine Implementierung auf Basis von Matlab ein Tool entwickelt werden. Durch die umfassende Dokumentation der Entwicklung des Tools werden eine gute Benutzbarkeit und Übertragbarkeit gewährleistet. Innerhalb dieser Arbeit konnten also sowohl eine mathematische Modellierung als auch ein Matlab-Tool als Artefakte konstruiert werden. Es folgte eine umfassende Simulation am Fallbeispiel der Region Hannover und die Präsentation der Ergebnisse aus ebendieser. Der Einfluss einzelner Parameter auf die Ergebnisse wurde dann durch Sensitivitätsanalysen untersucht. Auf Basis der Simulationsergebnisse, die für eine Vielzahl von verschiedenen Gebäuden und Systemkonfigurationen erhoben wurden, folgte die Quantifizierung des Potentials von ST-Anlagen. Dabei stellte sich heraus, dass insbesondere auf größeren Gebäuden ein relativ hohes wirtschaftliches Potential besteht. Hingegen konnte für alle untersuchten ST-Anlagen ein ökologisches Potential nachgewiesen werden. Nach Untersuchung von Treibern und Hemmnissen der ST konnte das kurzfristige Erwartungspotential auf 2%, das mittelfristige auf 6% und das langfristige auf 10% des gesamten Wärmebedarfs von Haushalten geschätzt werden. Daraufhin wurden Handlungsempfehlungen sowohl für einzelne Endverbraucher als auch für die Politik gegeben. Besonders Planer von Neubauten sollten sich demnach mit der Möglichkeit einer ST-Anlage auseinandersetzen. Hingegen sollte die Politik vor allem ihre Fördermaßnahmen verstetigen und neue Maßnahmen für den Gebäudebestand entwickeln. Letztendlich wurden die präsentierten Untersuchungen ausführlich evaluiert und Limitationen aufgezeigt. Weitere Iterationen innerhalb des Designzyklus sollten in zukünftigen Forschungen durchgeführt werden.

Die anfangs gestellte Forschungsfrage kann wie folgt beantwortet werden: Das Potential von ST-Anlagen kann durch den kombinierten Einsatz des hier entwickelten Tools in Verbindung mit einer individuellen Datenerhebung für die jeweilige Region ermittelt werden. Weiterhin sind die betrachteten Potentialbegriffe genauestens zu definieren. Für die Region Hannover stellte sich dabei heraus, dass ST-Anlagen in allen betrachteten Konstellationen die Versorgungssicherheit der Energieversorgung verbessern können. Durch Substitution fossiler Brennstoffe kann die Abhängigkeit von diesen verringert werden. Ebenso erweist sich die ST als sehr umweltverträglich. Die Emissionen, die durch den Betrieb eingespart werden, übersteigen den Treibhausgasausstoß bei der Herstellung um ein Vielfaches. Ein wirtschaftlicher Betrieb von ST-Anlagen ist in der Region Hannover dagegen fast ausschließlich nur bei größeren Gebäuden möglich. Trotzdem kann die Installation auf Neubauten vor dem Hintergrund der Nutzungspflicht im EEWärmeG unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchaus sinnvoll sein. In Zukunft ist mit einem schleppenden Ausbau der ST im Gebäudebestand und einer wachsenden Verbreitung auf Neubauten zu rechnen.