

Analyse, Modellierung und Simulation energieautarker Gebäude

Masterarbeit

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

vorgelegt von

Name: Osterwold



Vorname: Marvin



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 01.04.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis.....	vi
Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Aufbau und Zielsetzung.....	2
2 Simulation von Gebäuden und Kreislaufsystemen	4
2.1 Systeme und Modellansätze in der Gebäudesimulation	4
2.2 Zum Stand der Forschung von energetischen Kreislaufsystemen.....	8
2.3 Methodik im Rahmen des Design Science Research	13
3 Grundlagen der dezentralen Gebäudeenergieversorgung	15
3.1 Zusammensetzung der Solarstrahlung.....	15
3.2 Berechnung des Sonnenstandes und der Einstrahlung auf eine geneigte Ebene	16
3.3 Funktionsweise und Modellierung von PV-Anlagen als Stand-Alone System	19
3.4 Funktionsweise und Modellierung einer solarthermischen Wärmeversorgung	25
3.5 Energiesystem Gebäude	30
4 Formulierung des energetischen Kreislaufmodells	36
4.1 Annahmen.....	36
4.2 Modellformulierung.....	39
5 Entwicklung und Dokumentation des Simulationstools	44
5.1 Logischer und struktureller Aufbau im Rahmen der Programmiersprache Matlab	44
5.2 Initiation Instanz	46
5.3 Main Instanz	47
5.5 Photovoltaics und SolarCollector Klasse	49
5.4 Irradiance Klasse	51

5.5 Electrical Demand Klasse.....	52
5.6 Energy_Demand Klasse	53
5.7 Energy Storage Klasse.....	54
6 Szenario-Analyse	57
6.1 Datengrundlage und spezifische Standortbesonderheiten	57
6.1.1 Analyse der Klimadaten	59
6.1.2 Definition der Baustruktur des betrachteten Wohngebäudes.....	63
6.1.3 Verbrauchsprofile	67
6.2 Szenario 1	69
6.3 Szenario 2	82
7 Kritische Würdigung	89
7.1 Diskussion und Implikationen für die Praxis	89
7.2 Grenzen und Empfehlungen für zukünftige Simulationserweiterungen	90
8 Fazit und Ausblick	94
Literaturverzeichnis.....	96
Anhang	viii
A. Matlab Code.....	viii

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die nachhaltige Sicherung des Wohlstandes zukünftiger Generationen, wird nicht allein durch die Bereitstellung von Nahrungsmitteln und sauberem Trinkwasser gesichert, sondern in einem ganz erheblichen Maße durch die Sicherung der Energieversorgung unter Berücksichtigung von Klima- und Umweltfragen. Eine nachhaltige Energiewirtschaft definiert sich hierbei durch den Einbezug gesellschaftlicher, ökonomischer und ökologischer Aspekte. Dies impliziert den sparsameren und effizienteren Einsatz fossiler Energieträger und deren schrittweise Substitution durch regenerative Energiequellen.¹ Die damit verbundenen Prozesse sind nicht als reines technologisches Problem zu sehen. Die Nutzbarmachung und der Einbezug von Energiequellen erfolgt in einem umfassenderen gesellschaftlichen Kontext, welcher auch wirtschaftliche, philosophische und politische Hierarchien aufweist. Energiesysteme beschreiben hier die Rahmenbedingungen in denen die Energienutzung erfolgen kann. Hierzu zählt unter anderem der Zugang zu einer spezifischen Energiequelle, die Nutzung durch geeignete Energiewandler als auch deren entsprechenden Wirkungsgrade.² Die technologische Verbesserung der Wirkungsgrade sowie der Trend stetig steigender Energiekosten, erzeugen Anreize einer umfassenderen Einbindung regenerativer Energien. So werden in einem durchschnittlichen europäischen Haushalt über 90% der eingesetzten Energie für den Heiz- und Warmwasserbedarf verwendet, welche wiederum vorrangig durch zunehmend preisintensivere fossile Energieträger wie beispielsweise Öl und Gas gedeckt werden.³ Der Einsatz regenerativer Energiequellen ist neben etablierten Kraftwerkstechnologien und gesetzlichen Energieeinsparmaßnahmen im Rahmen der eingeleiteten Energiewende in Deutschland wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Energiewirtschaft geworden. Die dezentrale Einspeisung von Strom aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen nimmt weltweit rapide zu.⁴ Mit zunehmender Differenzierung von PV-Einspeisetarifen und den Preisen für Netzstrom, wird der Anreiz zum Eigenverbrauch von vor Ort produziertem Strom auf Ebene der privaten Haushalte immer attraktiver im Verhältnis zur Einspeisung in das öffentliche Stromnetz. Das Potential der gleichzeitigen Erzeugung und Verwendung ist in Privathaushalten jedoch beschränkt. Ebenso eine Verschiebung von Verbräuchen auf Perioden mit

¹ Vgl. Reich, et al., 2013 S. 21.

² Vgl. Wesselak, et al., 2013 S. 1-2.

³ Vgl. Usemann, 2005 S. 32.

⁴ Vgl. Reich, et al., 2013 S. 5.

Erzeugungüberschüssen durch gezielte Nachfragesteuerung.⁵ Um eine hinreichende Gleichschaltung von Erzeugung und Verbrauch zu ermöglichen, ist die Einbindung von komplexen Speichersystemen unumgänglich. Vor diesem Hintergrund werden verstärkt Wohnkonzepte entwickelt, die den fossilen Energieverbrauch nachhaltig zu begrenzen oder selbst zu decken versuchen. Die Energiebereitstellung aus Solaranlagen impliziert ein hohes Produktionspotential für den privaten Sektor, auf Basis überschaubarer Investitionen und Flächenbedarfe und z.T. staatlicher Förderung. Die Auslegung der Energiespeicher kann je nach Zielvorstellung differenziert erfolgen, beispielsweise einer möglichst ökonomischen Auslegung. Im weiteren Verständnis kann eine optimierte Eigenverbrauchsquote genannt werden, als auch die Erreichung einer hohen Autarkiequote. Im Gegensatz zur bilanziellen Autarkie von modernen Energieplushäusern, müssen Nullemissionsgebäuden bzw. energieautarke Wohngebäude zu jedem Zeitpunkt im Jahr sowohl ausreichend Elektro-, als auch Wärmeenergie vorhalten, um die Differenz zwischen Verbrauch und asymmetrischer Produktion aus erneuerbaren Energien auszugleichen. Dies erfordert genaue Kenntnis über individuelle Erzeugungs- und Verbrauchskennlinien sowie eine ökonomisch sinnvolle Auslegung der Erzeuger- und Speicherkapazitäten.⁶

1.2 Aufbau und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines mathematischen Modells zur realitätsnahen Simulation eines vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystems eines Einfamilienhauses. Die Implementierung erfolgt in der Software Matlab 2013b. Alle kontinuierlichen Prozesse der Erzeugung, Speicherung und des Verbrauchs sollen hierbei einbezogen werden um eine optimale Dimensionierung der zu verwendenden Gebäudetechnik und -energetik zu ermitteln. Dabei soll das zugrundeliegende mathematische Modell anhand zweier Simulationsstandorte auf seine Validität getestet werden. Betrachtet wird dabei ein Simulationszeitraum von zwei Jahren. Das Programm soll hierbei verschiedene Zielgrößen bestimmen können, um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit, den Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad treffen zu können. Es soll hierbei der Frage nachgegangen werden, inwieweit eine autarke regenerative Selbstversorgung technisch und ökonomisch umsetzbar ist.

Die Arbeit untergliedert sich in 8 Kapitel. Nachdem in der Einleitung die Problematik und Zielvorstellung dieser Arbeit formuliert wurde, gibt das Kapitel 2.1 eine Einführung in die Grundlagen der Modellierung und Simulation und zeigt etablierte Softwarelösungen auf. Bestehende

⁵ Vgl. Castillo-Cagigal, et al., 2011 S. 2338-2348.

⁶ Vgl. Schmidt, 2013 S. 334-335.

Simulationsstudien werden im Rahmen eines Literatur Überblicks im Kapitel 2.2 analysiert und Anforderungen an die Modellierung im Rahmen der Primärenergie autarken Gebäudeversorgung abgeleitet. Im Unterkapitel 2.3 wird das methodische Vorgehen im Kontext des Design Science Research, zur Modellentwicklung und -implementierung detailliert erläutert. Als Voraussetzung der umfassenden Konzipierung eines Gebäudemodells werden in Kapitel 3 physikalische Grundlagen der dezentralen Gebäudeenergieversorgung von Wohngebäuden sowie Besonderheiten beim Einsatz regenerativer Energien herausgearbeitet. Die Versorgung erfolgt in dieser Arbeit durch die Integration einer solaren Trinkwarmwasser- und Heizungsanlage. Der Elektrizitätsbedarf wird gedeckt durch eine PV-Anlage. Es erfolgt dabei die detaillierte Betrachtung der einbezogenen Produktions-, Speicherungs- und Verbrauchskomponenten im Hinblick auf deren Funktionsweise und Modellierung. Das Kapitel 3 schließt mit der spezifischen Analyse der in einem Wohngebäude auftretenden Wärme- bzw. Kältebedarfe. Sowohl die Energiebedarfsbilanzierung als auch die Energieertragsrechnung erfolgt dabei auf Grundlage der vorgeschriebenen Vorgaben des Deutschen Institutes für Normung (DIN) im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014, unter Einbindung empfohlener Normverbräuche und Verbrauchsprofile. Auf Basis der beschriebenen kausalen Wirkzusammenhänge, wird in Kapitel 4, unter Berücksichtigung von definierten Annahmen, ein kontinuierliches Erzeugungs-/Verbrauchsmodell entwickelt, welches den Wärme- und Elektrokreislauf eines als energieautark konzipierten Wohngebäudes mathematisch abbildet. Dabei werden die Kreislaufkomponenten und Zusammenhänge aus Kapitel 3 einbezogen und im Rahmen von Kapitel 5 in die Software Matlab 2013b implementiert. Es erfolgt hier die detaillierte Beschreibung der verwendeten Simulationsstruktur und Erläuterung des spezifischen Codes. Die Validierung des Modells wird im Rahmen der Szenario Analyse im Kapitel 6 vorgenommen. Zunächst erfolgt hier die genaue Spezifizierung der Datengrundlage und Standortbesonderheiten. Diese umfasst die Charakterisierung der verwendeten Klimadaten und Verbrauchs- bzw. Bedarfsprofile, als auch von Gebäude- und Leistungsparametern. Im Rahmen der nachfolgenden Simulationen werden die errechneten Ergebnisse analysiert auf ihre Validität überprüft. Im Anschluss an Kapitel 6 werden die Simulationsergebnisse als auch das zugrundeliegende Modell hinsichtlich abzuleitender Implikationen und Weiterentwicklungsmöglichkeiten kritisch diskutiert und evaluiert. Das Fazit in Kapitel 8 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit und schließt mit einem Ausblick ab.

8 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Implementierung eines mathematischen Modells zur realitätsnahen Abbildung eines vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiespeichersystems eines Einfamilienhauses im Rahmen der Programmiersprache Matlab. Durch die detaillierte Analyse der Gebäudeenergetik hinsichtlich der jährlichen Wärme- und Strombedarfe, als auch der eingebundenen Energieträger Photovoltaik und Solarthermie, konnten wichtige Modellfaktoren in ihrer Wirkungsweise und generischen Modellierung in Form von Modulen definiert und dem jeweiligen Energiekreislauf zugeordnet werden. Darauf basierend wurde ein stetiges Modell entwickelt, welches die Wetter und Nutzer bedingten Ausprägungen der Bedarfs- und Erzeugermodule in einem autarken Energiespeichersystem abbildet. Die Methode erlaubt den Vergleich der Wirtschaftlichkeit, Autarkiequote und des Eigenverbrauchsanteils von verschiedenen Kombinationen aus Speichersystem und eingebundenen Kreislaufkomponenten, bei einem hohen Detaillierungsgrad der Modellierung.

Durch die diskrete Implementierung in der Programmiersprache Matlab konnte unter Einbezug von Wetterdaten und Nutzerprofilen die Funktionalität des Modells in minütlicher Auflösung für einen Zwei-Jahres-Zeitraum im Rahmen einer Szenario Analyse an zwei Standorten umfassend demonstriert werden. Die kurze Rechenzeit erlaubte darüber hinaus eine große Anzahl an Simulationsläufen, um relevante Eingangsparameter mit größerem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit zu identifizieren. Dabei konnte anhand der Analyse der kritischen Wintermonate gezeigt werden, dass bei einer solaren Energieerzeugung die Last- und Erzeugungsprofile um bis zu drei Wochen auseinanderfallen können, welches für beide Energiekreisläufe die umfassende Einbindung von Speichereinheiten impliziert. Durch schrittweise Vergrößerung der Erzeuger- bzw. Speicherkapazität erfolgte die Dimensionierung anhand der kritischen Ertragszeiträume, wobei unter Einschränkung der verfügbaren Dachfläche von Einfamilienhäusern an beiden Standorten keine 100%ige Selbstversorgung mit Heizwärme simuliert werden konnte. Unter Berücksichtigung von zukünftig steigenden Energiepreisen stehen hier alternative Speichermöglichkeiten von Wärmeenergie im Mittelpunkt, welche unter vertretbaren Mehrinvestitionen bzw. Platzbedarfen einen höheren Autarkiegrad ermöglichen würden.

Im Gegensatz dazu konnte eine autarke Versorgung für die Elektrokreisläufe an beiden Szenario Standorten ermittelt werden. Die benötigte Speicher- bzw. Ertragskapazität wich hierbei bereits zwischen den relativ nah zueinander liegenden Szenario Standorten stark ab. Die angefallenen Stromüberschüsse konnten nur bedingt in den Wärmekreislauf überführt werden, mit

einer entsprechend geringeren Eigenverbrauchsquote und Wirtschaftlichkeit. Dies führt jedoch zu der Annahme, dass in Regionen mit weitaus höherem Kühlbedarf bzw. geringeren jahreszeitlichen Einstrahlungsschwankungen, ein wirtschaftlicherer Betrieb durch die Überschussverwendung möglich sein könnte, welches es zu untersuchen gilt. Ein vielversprechendes Forschungsgebiet ist hierbei auch differenzierte die Abbildung des individuellen Nutzerverhaltens sowie mögliche Lastverschiebungen. Im Rahmen der energieautarken Simulation stellt hierbei auch die Simulation von mehreren Gebäudeeinheiten einen wichtigen Forschungsschwerpunkt dar. Hier können insbesondere verschiedene Dachausrichtungen zu einem gleichmäßigeren Ertrag und Verbrauch führen und gleichzeitig differenziertere regenerative Energieträger zusammen wirken.

Literaturverzeichnis

- Becker, Jörg und Pfeiffer, Daniel. 2006.** *Fortschritt in den Wirtschaftswissenschaften - Beziehungen zwischen behavioristischer und konstruktionsorientierter Forschung in der Wirtschaftsinformatik.* Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- Bichler, Martin. 2006.** Design Science in Information Systems Research - Referat. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK 48 (2006) 2.* TU München Fakultät für Informatik Lehrstuhl für Internetbasierte Geschäftssysteme (IBIS) : WI – Literatur, 2006, S. 133–142.
- Bollin, Elmar. 2009.** *Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden - Komponenten, Systeme, Anlagenbeispiele.* Wiesbaden : GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Bortolini, Marco, Gamberi, Mauro und Graziani, Alessandro. 2014.** *Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system.* s.l. : Erschienen in: Energy Conversion and Management, Volume 86, October 2014, Seite 81-92, 2014.
- Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 6.** *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung.* s.l. : Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67, ausgegeben zu Bonn am 21. November 2013.
- Bürger, Franz-Josef G. und Nagel, Tobias. 2012.** *Energieeffizientes Bauen - Solarthermie und Photovoltaik, Erste Auflage.* BBC Engineering GmbH, Düsseldorf : Shaker Verlag, 2012.
- Castillo-Cagigal, M., et al. 2011.** *PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector.* s.l. : Solar Energy, Vol.85, 2011.
- DIN CERTCO. 20015.** <http://www.dincertco.de/>. [Online] 15. Februar 20015.
<http://www.dincertco.de/logos/011-7S1889%20R.pdf>.
- DIN EN 12975-1:2011-01 . 2011.** *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.* 2011.
- DIN EN ISO 6946:2008-04. 2008.** *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.* 2008.
- DIN V 18599-10. 2007.** *DIN V 18599-10 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung,*