

# Entwicklung eines energetischen Gebäudesimulators zur Szenarioanalyse für verschiedene Breitengrade

## Masterarbeit

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

vorgelegt von

Name: Szameitat



Vorname: Ivo



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Betreuerin: Maria-Isabella Eickenjäger, M.Sc.

Hannover, den 30.09.2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Relevanz.....	1
1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2. Bereits verfügbare Simulatoren.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Grundlagen des Gebäudeenergiebedarfs .....</b>	<b>5</b>
3.1. Thermischer Gebäudeenergiebedarf .....	5
3.2. Elektrischer Gebäudeenergiebedarf .....	9
3.3. Geografische Besonderheiten des Gebäudeenergiebedarfs.....	10
<b>4. Grundlagen der Gebäudeenergiegewinnung.....</b>	<b>11</b>
4.1. Wärmepumpenanlagen und Kältemaschinen .....	11
4.2. Thermische Solaranlage .....	17
4.3. Photovoltaikanlage.....	23
<b>5. Grundlagen der Energiespeicherung.....</b>	<b>26</b>
5.1. Speicherung thermischer Energie .....	26
5.2. Speicherung elektrischer Energie .....	28
<b>6. Mathematisches Modell des energetischen Gebäudesimulators .....</b>	<b>30</b>
6.1. Problemstellung und Annahmen .....	30
6.2. Mathematische Formulierung des Modells.....	32
6.3. Limitationen des Modells .....	44
<b>7. Entwicklung eines energetischen Gebäudesimulators mit Excel/VBA.....</b>	<b>48</b>
7.1. Planung des Simulators .....	48

7.2.	Datengrundlage und Aufbereitung .....	51
7.3.	Entwicklung/Dokumentation .....	52
7.4.	Vorstellung des Prototyps .....	68
<b>8.</b>	<b>Entwicklung eines Generators zur Erstellung von Bedarfs- und Wetterdatensätzen...</b>	<b>79</b>
8.1.	Planung des Profilgenerators.....	79
8.2.	Entwicklung und Vorstellung des Generators .....	81
<b>9.</b>	<b>Szenarioanalyse .....</b>	<b>87</b>
9.1.	Schlüsselfaktoren und Unterscheidung der Szenarien .....	87
9.2.	Szenario 1: Hannover Altbau .....	97
9.3.	Szenario 2: Hannover Neubau .....	99
9.4.	Szenario 3: Madrid Altbau .....	101
9.5.	Szenario 4: Madrid Neubau .....	104
9.6.	Zusammengefasste Ergebnisse.....	106
<b>10.</b>	<b>Sensitivitätsanalyse .....</b>	<b>108</b>
10.1.	Überprüfung von Erwartungshaltungen .....	108
10.2.	Diskussion und kritische Würdigung der Ergebnisse .....	115
<b>11.</b>	<b>Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>117</b>
<b>12.</b>	<b>Methodenkritik.....</b>	<b>118</b>
<b>13.</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>121</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
	<b>Anhangsverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
	<b>Ehrenwörtliche Erklärung .....</b>	<b>134</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation und Relevanz

Der Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 2013 rund 13908 PJ, was ca. 3863 Mrd. kWh entspricht, und ist damit im Vergleich zum Vorjahr um gut 2,5 % gestiegen.<sup>1</sup> Unter Primärenergie wird dabei die in der Natur vorkommende, unveränderte Ressource, wie Kohle, Rohöl, Erdgas, Wind- oder Wasserkraft, bezeichnet.<sup>2</sup> Aus Gründen des Klimawandels, des nur begrenzten Vorkommens fossiler Energieträger und Kernbrennstoffen und zahlreicher selbstgesteckter Umweltschutzziele der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland wird die Nutzung regenerativer Energien seit Jahren vorangetrieben. Als regenerative Energiequellen werden Sonneneinstrahlung, Windkraft, Niederschlag, Umgebungswärme, Biomasse, Wellenkraft, Meeresströmung, Gezeiten, Schneeschmelze und Erdwärme betrachtet, also solche, die nahezu unbegrenzt vorkommen.<sup>3</sup> Zum Ende des ersten Halbjahres 2014 lag der Anteil regenerativer Energien am Energiemix in Deutschland allerdings gerade einmal bei 11,5 % des Gesamtprimärenergieverbrauchs.<sup>4</sup>

Rund 30 % des Gesamtprimärenergieverbrauchs in Deutschland fällt dabei auf die Deckung der Gebäudeenergiebedarfe zurück und auch hier können zur Deckung der thermischen und elektrischen Gebäudeenergiebedarfe bereits verschiedene regenerative Energiequellen genutzt werden.<sup>5</sup> Bei dem Neubau oder der Modernisierung eines Gebäudes muss einerseits die Frage beantwortet werden, wie das Gebäude künftig beheizt oder auch gekühlt werden soll. So wird bereits über 20%, der in neuen Wohnungen benötigten Heizenergie, durch Wärmepumpen gewonnen.<sup>6</sup> Andererseits ist auch zu entscheiden ob Elektrizität nur über das Stromnetz zu beziehen ist, oder ob durch eigene Anlagen regenerative elektrische Energie gewinnbar gemacht werden soll.

---

<sup>1</sup> Vgl. AGEBA (2014a), S. 4.

<sup>2</sup> Vgl. Schelling (2013), S. 11.

<sup>3</sup> Vgl. Quaschnig (2013a), S. 104-105.

<sup>4</sup> Vgl. AGEBA (2014b), S. 4.

<sup>5</sup> Vgl. Ritzenhoff (2009), S. 29.

<sup>6</sup> Vgl. Statistische Landesämter und BDEW (o.J.).

In jedem Fall gilt es vor der Anschaffung einer Anlage zur Gewinnung regenerativer Energien zu überprüfen, ob die Energieversorgung des Gebäudes gewährleistet ist und auch ob diese Investition überhaupt wirtschaftlich ist.

Zur Beantwortung dieser Fragen stehen sowohl einschlägige Kostenvergleichsrechner und Planungstools zur Auslegung der Anlagen, als auch persönliche Verkäufer- und Berater zur Verfügung. In vielen Fällen werden allerdings nur Abschätzungen, basierend auf Jahresenergiebedarfen oder einer energetischen Bewertungen des Gebäudes, getroffen und nach diesen Annahmen eine neue Anlage ausgelegt. Erst nach dem Kauf im tatsächlichen Betrieb zeigt sich ob eine überdimensionierte oder gar zu leistungsschwache Anlage angeschafft wurde.

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit ein Simulator entwickelt werden, welcher über einen langen Zeitraum und in kurzen Zeittakten die thermische und elektrische Energieversorgung eines Gebäudes simulieren kann. Dazu sollen die tatsächlichen Energiebedarfe einzelner Perioden und nicht nur die gesamte Jahressummen in die Kalkulation einbezogen werden. Diese Energiebedarfe umfassen neben Heizwärme-, Trinkwarmwasser- und Elektrizitätsbedarf auch Kühlbedarfe, wodurch eine Auslegung des Simulators für unterschiedliche Breitengrade erfolgen soll. Simuliert werden soll daraufhin die Bedarfsdeckung durch verschiedene einstellbare Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energien. In jeder einzelnen Periode soll dabei versucht werden anfallende Energiebedarfe durch gewinnbare oder gespeicherte Energie zu decken. Hierdurch können Engpässe im Jahresverlauf sichtbar gemacht werden und es kann überprüft werden, ob und in welchem Ausmaß ein Gebäudeenergiebedarf tatsächlich durch regenerative Energien gedeckt werden kann. Weiterhin soll auf Basis der Simulationsergebnisse eine Auswertung der Investition erfolgen und ermittelt werden ob diese auch wirtschaftlich vorteilhaft war und wann sich diese amortisiert.

## **1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt einen Simulator zur Simulation der Deckung thermischer und elektrischer Gebäudeenergiebedarfe zu entwickeln, wobei der Schwerpunkt auf der Bedarfsdeckung durch installierte Anlagen zur Gewinnung regenerativer thermischer und elektrischer Energien sowie deren Speicherung liegt. Dabei steht ein langer Betrachtungszeitraum, mit kurzen Zeittakten und der Auslegung für verschiedene Breitengrade im Fokus der

Entwicklung dieses Simulators. Als Kern eines Simulators, wird auch hier das Ziel verfolgt möglichst realistisch die komplexen Abläufe der Realität abzubilden und erwartungstreue Simulationsergebnisse zu liefern. Dabei ist eine Simulation von einer Optimierung abzugrenzen. Der Simulator dient in erster Linie nicht dem Ziel die beste Anlagenkonstellation für ein Gebäude auszugeben, sondern soll eine realistische Simulation sämtlicher einfließender Wetter- und Gebäudedaten vornehmen und diese auswerten können.

Dazu wird im folgenden Kapitel 2 versucht ein Überblick über bereits verfügbare Simulatoren aus Literatur und Wirtschaft zu geben. In den darauf folgenden Kapiteln 3, 4 und 5 wird dann auf die, der Simulation thematisch zugrundeliegenden Technologien und Berechnungsarten von Gebäudeenergiebedarfen, der Gewinnung thermischer und elektrischer Energie und schließlich auf deren Speicherung eingegangen. Hierauf aufbauend wird in Kapitel 6 die mathematische Formulierung eines zeitlich diskretes Erzeugungs- und Verbrauchsmodells zur Simulation der Deckung von Gebäudeenergiebedarfen in kurzen Zeittakten und über einen langen Zeitraum dargestellt. Dabei wird das Modell in die Deckung der thermischen und elektrischen Energiebedarfe jeder Periode aufgeteilt. Hierzu werden verschiedene getroffene Annahmen und Limitationen des Modells angegeben.

Im 7. Kapitel wird das zuvor vorgestellte Modell mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel<sup>7</sup> unter der Verwendung der Script-Sprache „Visual Basics for Applications“ (VBA), zur energetischen Simulation eines Zeitraums von einem Jahr in 15-minütigen Takten, implementiert und vorgestellt.

Auf Grundlage komplexer Wetter- und Gebäudeenergiebedarfsdatensätzen, können dann unterschiedliche zu simulierende Anlagen und Einstellungen im Simulator definiert werden, bevor die Simulation gestartet wird. Als installierbare Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energien sollen dabei ein Sonnenkollektor, eine Wärmepumpe/Kältemaschine und eine Photovoltaik-Anlage auswählbar sein.

Benötigte Datensätze, welche zu jeder Viertelstunde eines zu simulierenden Jahres Temperatur- und Sonneneinstrahlungsdaten, sowie Heizwärme-, Trinkwarmwasser-, Kühlung- und

---

<sup>7</sup> <http://office.microsoft.com/de-de/microsoft-excel-tabellenkalkulationssoftware-FX010048762.aspx>

Elektrizitätsbedarfe umfassen müssen, standen dieser Arbeit leider nicht zur Verfügung. Daher wird in Kapitel 8 ein Generator, welcher in Excel/VBA unter Verwendung des Excel-Solver-Add-Ins entwickelt wurde, vorgestellt. Dieser generiert aus kostenfrei zugänglichen durchschnittlichen monatlichen Temperaturen und täglichen Einstrahlungsdaten umfangreiche Wetterdatensätze für ein Jahr. Auf Grundlage definierbarer Gesamtbedarfe werden anschließend die thermische Bedarfe, basierend auf den generierten Außentemperaturen, für jede Periode generiert und die Trinkwarmwasser- sowie Elektrizitätsbedarfe nach einstellbaren Verbrauchsprofilen verteilt.

In Kapitel 9 werden dann, anhand generierter Datensätze, Gebäude mit unterschiedlich hohen Bedarfen für verschiedene Breitengrade in einer Szenarioanalyse simuliert und ausgewertet.

Das darauf folgende Kapitel 10 beinhaltet eine Sensitivitätsanalyse, wobei der Frage nachgegangen wird, ob der vorgestellte Simulator überhaupt erwartungstreu und realitätsnah arbeitet. Daher werden verschiedene Erwartungshaltungen für die Wirkung verschiedener geänderter Parameter definiert und in weiteren Simulationen überprüft.

Nach einer Diskussion der Ergebnisse werden in Kapitel 11 verschiedene Handlungsempfehlungen an etwaige Nutzer des Simulators sowie für potenzielle Weiterentwicklungsmöglichkeiten gegeben. Kapitel 12 betrachtet die durchgeführten Entwicklungen und Analyse noch einmal kritisch, bevor im letzten Kapitel, Kapitel 13, ein Fazit zum Verlauf dieser Arbeit gezogen wird.

## **2. Bereits verfügbare Simulatoren**

Zur Planung und Umsetzung des geplanten Simulators zur Gewinnung und Nutzung regenerativer Energien zur Deckung von Gebäudeenergiebedarfen wurde im Vorfeld untersucht was an vergleichbaren Rechnern oder Tools bereits verfügbar ist. Der Großteil der Simulationen beschränkt sich allerdings darauf Ertragsabschätzungen verschiedener Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energien für bestimmte Standorte zu geben. Ein weiterer Teil verfügbarer Tools beschäftigt sich mit der Auslegung verschiedener Anlagen für bestimmte Standorte und bei bestimmten Jahresenergiebedarfen. Hierbei wird meist nur ein einzelner Anlagen Typ betrachtet. Diese Tools sind meist kostenfreie Online-Tools oder Tabellenkalkulationen. Daneben bieten auch zahlreiche Anlagenhersteller oder Installationsbetriebe Auslegungshelfer o-

eine Weiterentwicklung empfiehlt sich die Entwicklung einer eigenständigen Software, welche die Lösung der Kalkulation und deren Aktualisierung besser handhaben kann und eventuell ausgliedert. Wird an einer Generierung von Datensätzen festgehalten sollte ein solcher Generator fest in der Simulationssoftware eingebaut sein, um das Einfügen generierter Datensätze zu vereinfachen. Hierfür bietet sich dann eine externe Datenbank an, auf die nur zu Beginn der Simulation zugegriffen werden muss.

Problematisch dürfte in vielen Fällen sein, dass, gerade auch bei Neubauten, die tatsächlichen Bedarfe einer Periode gar nicht bekannt sind und Simulationen unausweichlich auf angenommenen Bedarfen stattfinden müssen. Hier bietet sich wieder ein ausgereifterer Generator an um ermittelte Jahresbedarfe anhand des Gebäudes über ein Jahr zu verteilen.

### **13. Fazit und Ausblick**

Im Laufe dieser Arbeit wurde eine mathematische Formulierung in Form eines zeitlich diskreten Erzeugungs- und Verbrauchsmodells mit kurzen Zeittakten für die Deckung von Gebäudeenergiebedarfen aufgestellt und in ein Simulations-Tool mit Excel/VBA implementiert. Dabei wurden allerdings, im Gegensatz zu üblichen Kostenvergleichsrechnern oder Planungshilfen zur Dimensionierung von Anlagen zur Energiegewinnung, nicht einfach nur grobe Jahressummen der Energiebedarfe und Anlagenleistungen überschlagen. Die vorgestellte Simulation stellt für ein komplettes Jahr eine aufwendige Kalkulation für jede einzelne 15-minütige Periode auf. In jeder Periode sind auftretende thermische und elektrische Gebäudeenergiebedarfe zu decken. Thermische Energiebedarfe umfassen dabei explizit auch eine Gebäudekühlung, da das vorgestellte Simulations-Tool für unterschiedliche Breitengrade und Gebäudetypen Anwendung finden soll. Dabei wird durch eine aufwendige Steuerung in jeder Periode zuerst versucht einen thermischen Bedarf durch in Speichern eingelagerte Energie zu decken, bevor Anlagen zur Gewinnung thermischer Energie hinzugeschaltet werden. Ist die Auslastung einer solchen Anlage in einer Periode nicht ausgeschöpft wird restliche Leistung aufgebracht, um die Speicher wieder zu füllen. Ein Elektrischer Energiebedarf wird dagegen erst versucht direkt durch gerade gewonnene Energie zu decken. Darüber hinausgehende Bedarfe können durch die in Akkumulatoren gespeicherte Energie oder einen Bezug aus dem Stromnetz gedeckt werden. Wohingegen ein Überschuss an gewonnener Energie eingespeichert oder verkauft werden kann.



Zum Aufstellen dieser umfangreichen Simulation lassen sich detaillierte Datensätze, bestehend aus Wetterdaten und den Heizwärme-, Kühlungs-, Trinkwarmwasser- und Elektrizitätsbedarfen jeder Periode, einlesen. Die Simulation aller 15-minütigen Perioden bietet nach kurzer Berechnungsdauer eine umfangreiche Auswertung der zu erwartenden Zusammensetzung der Gebäudeenergiebedarfsbefriedigung. Zusätzlich wird eine finanzielle Auswertung der zu tätigen Investition und Finanzierung anhand einer Kapitalwertberechnung aufgestellt, um die Vorteilhaftigkeit der zur Simulation gewählten Anlagen zu überprüfen.

Die durchgeführten Szenario- und Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass das vorgestellte Simulations-Tool relativ leistungsstark sämtliche Berechnungen aufstellen kann und aussagekräftige und erwartungstreue Ergebnisse liefert und durch die Möglichkeit eingelesene Kühlbedarfsdatensätze über eine Kältemaschine zu befriedigen auch für Breitengrade mit höheren solaren Einstrahlungen und Außentemperaturen geeignet.

Um für ein Gebäude allerdings die optimale Dimensionierung von Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energien zu ermitteln, müssten verschiedene mögliche Anlagen und Einstellungen simuliert werden. Da das vorgestellte Tool der Simulation dient, wird eine umfangreiche Simulation und Auswertung, aber keine Optimierung, geboten.

Eine zukünftige Weiterentwicklung könnte, wie bereits erörtert, eine automatische Auswertung verschiedener geänderter Parameter darstellen. Hierdurch könnten bessere Handlungsempfehlungen gegeben und die Richtungsfindung weiterer Anpassungen an den simulierten Einstellungen und Anlagen vereinfacht werden.

Zusätzlich könnten weitere Einstellungsmöglichkeiten zur Simulation und die Auswahl weiterer Anlagen ermöglicht werden. Die Nutzung der Windkraft ist hier eine der interessantesten Erweiterungsmöglichkeiten. Aber auch die Option einer alternativen Kältegewinnung und die Kältespeicherung sollten zukünftig eingebaut werden. Zusätzlich könnten weitere Einstellungsmöglichkeiten zu den thermischen Speichern auswählbar gemacht werden. Hierbei könnte einerseits eine Bindung der Anlagen zur Energiegewinnung an bestimmte Speicher umgesetzt werden, aber auch weitere Speicherarten (z.B. Kombi- und Latentwärmespeicher) implementiert werden.