



LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT
INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSINFORMATIK

Technisch-ökonomische Energiesystemanalyse für Gebäude und Quartiere

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M. Sc.)“ im Studiengang
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und
der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Sarah Eckhoff



Prüfer:
Prof. Dr. Michael H. Breitner

Betreuer:
Prof. Dr. Michael H. Breitner
M. Sc. Tobias Kraschewski

Hannover, den 28. September 2019

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Formelverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Energiesystemsimulation und Stand des Modells	3
2.1 Transformation der Energieversorgung	3
2.2 Energiesystemkomponenten von Gebäuden	4
2.2.1 Verbraucher	5
2.2.2 Konventionelle Heizungen	7
2.2.3 Wärmepumpen	8
2.2.4 Blockheizkraftwerke	11
2.2.5 Solarthermie	13
2.2.6 Photovoltaikanlagen	17
2.2.7 Elektrische und thermische Speicher	18
2.2.8 Fahrzeuge	20
2.2.9 Stromnetz	22
2.3 Quartiersversorgungskonzepte	24
2.3.1 Nahwärmenetze	24
2.3.2 Elektrische Quartierspeicher	26
2.4 Modelle der Wirtschaftlichkeitsberechnung	27
2.5 Bilanzierung von Schadstoffemissionen	29
2.6 Bestehende Energiesystemsimulation	31
3 Modellierung von Wohn- und Gewerbequartieren	35
3.1 Strukturelle Änderungen	35
3.2 Erweiterung der Gebäudesimulation	37

3.2.1	Komponentenmodellierung	37
3.2.2	Berechnung der Wirtschaftlichkeit und der Treibhausgas- emissionen	52
3.3	Quartiersimulation	54
4	Analyse	59
4.1	Energieversorgung eines Mehrfamilienhauses	59
4.2	Fahrzeuge in einem Gebäudeenergiesystem	72
4.3	Energieversorgung eines Mischquartiers	79
4.4	Zusammenfassung	84
5	Einordnung des Modells	85
5.1	Limitationen	85
5.2	Ausblick	87
6	Fazit	90
	Literatur	92
A	Anhang	97
A.1	Betriebsführungskonzepte	98
A.2	Standardeingabewerte	103
A.3	MATLAB Programm	108
	Ehrenwörtliche Erklärung	109

1 Einleitung

Die globale Energieversorgung ist durch einen Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs und eine Verknappung der fossilen Brennstoffreserven gekennzeichnet. Gleichzeitig erhöht die vermehrte Verbrennung fossiler Energieträger die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, wodurch es zu einer stetigen Erderwärmung kommt [1]. Als Gegenmaßnahme wird der Ausbau erneuerbarer Energien weltweit gefördert, um fossile Energieträger zu schonen und Kohlenstoffdioxid- und andere Treibhausgasemissionen zu senken. In Deutschland wird dieser Prozess unter dem Begriff der *Energiewende* zusammengefasst [2]. Die energetische Sanierung des Gebäudebestands wird als die wichtigste Maßnahme der Energiewende angesehen, da auf den Gebäudebereich rund 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und etwa ein Drittel der Kohlenstoffdioxidemissionen entfallen [1]. Besonders die Wärmeversorgung birgt ein hohes Einsparpotential, da jährlich mehr als 600.000 Heizkessel altersbedingt ersetzt werden müssen [3]. Mit der Förderung erneuerbarer Energien hat auch die Integration elektrischer Erzeugungsanlagen, wie Photovoltaikanlagen, in Gebäuden zugenommen. Zur Deckung des thermischen Bedarfs können ebenfalls erneuerbare Energien und neue effizientere Technologien genutzt werden. So kann Wärme aus Umweltenergie genutzt werden, zum Beispiel Erdwärme durch eine Wärmepumpe oder solare Strahlungsenergie durch eine Solarthermieanlage. Außerdem kann die Erzeugung von Wärme und Strom unter Einsatz eines Blockheizkraftwerkes gekoppelt werden.

Das durch die Bundesregierung gesetzte Emissionsreduktionsziel von 40 % gegenüber 1990 bis zum Jahr 2020 wird aller Wahrscheinlichkeit nach verfehlt [2]. Daher muss der Gebäudesektor stärker als bisher in den Fokus rücken. Die softwaregestützte Simulation von Gebäuden und Quartieren kann dazu beitragen, die Potentiale und Entwicklungen im Gebäudesektor zu untersuchen und Grundlage für breit gefächerte weiterführende Forschung sein. Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein bestehendes Modell eines Gebäudes mit grafischer Benutzeroberfläche so weiterzuentwickeln, dass Energiesysteme simuliert werden können, die von einzelnen Wohn- und Gewerbegebäuden bis hin zu Quartieren reichen. Dazu werden die oben genannten Komponenten in das Gebäudemodell eingefügt. Außerdem werden Fahrzeuge betrachtet. Auf Quartierebene wird ein Nahwärmenetz und ein elektrischer Quartierspeicher modelliert. Zusätzlich zu den Energieflüssen werden auch die entstehenden Kosten und Treibhausgasemissionen berechnet, da neben der technischen Umsetzbarkeit auch die wirtschaftliche Attraktivität und das Emissions-

reduktionspotential neuer Energiesystemkomponenten von großer Bedeutung ist. Das Modell wird so aufgebaut, dass es für verschiedenste Fragestellungen bezüglich der Energiewende in Gebäuden genutzt werden kann. Die anschließende Analyse des entwickelten Modells wird dazu genutzt, eine beispielhafte Forschungsfrage zu beantworten. Aktuell wird zum wiederholten Male die Einführung einer Steuer auf Treibhausgasemissionen als weiteres Instrument der Energiewende diskutiert [4], [5], um Investitionsentscheidungen in Richtung emissionsarmer Technologien zu lenken. Dies wird zum Anlass genommen, um unter Einsatz des entwickelten Modells die folgende Frage bezüglich der Emissionssteuer zu analysieren.

Wie wirkt sich eine mögliche auf Treibhausgasemissionen erhobene Steuer auf Investitionsentscheidungen zwischen Energiesystemkomponenten in Gebäuden und Quartieren aus?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden verschiedene Energieversorgungsszenarien auf Gebäude- und Quartierebene miteinander verglichen. In Kapitel 2 werden dazu die Grundlagen der Energiesystemsimulation vorgestellt. Zunächst wird auf die aktuellen Herausforderungen bei der Energieversorgung von Gebäuden eingegangen. Die Vorstellung von Energiesystemen und deren Komponenten ist weiterer Bestandteil des Kapitels. Nach der Behandlung von Wirtschaftlichkeits- und Treibhausgasemissionsberechnungen wird das bestehende Energiesystemmodell vorgestellt. In Kapitel 3 werden die Bearbeitungsschritte zur Weiterentwicklung des Energiesystemmodells dargestellt. Anschließend wird das Modell in Kapitel 4 angewendet, um verschiedene Energieversorgungsszenarien zu vergleichen und hinsichtlich des Einflusses einer Emissionssteuer auszuwerten. Kapitel 5 zeigt die Limitationen des Modells auf und gibt einen Ausblick auf weitere Forschung, bevor in Kapitel 6 ein Fazit gezogen wird.

6 Fazit

Die energetische Sanierung des Gebäudebestands hat im Kontext der Energiewende ein hohes Einsparpotential bezüglich Endenergie und Treibhausgasemissionen. Da das durch die Bundesregierung gesetzte Emissionsreduktionsziel bis zum Jahr 2020 aller Wahrscheinlichkeit nach verfehlt wird, muss der Gebäudesektor stärker als bisher in den Fokus rücken. Ziel der Arbeit war es daher, ein bestehendes tool-basiertes Simulationsmodell eines Gebäudes so weiterzuentwickeln, dass komplexere Energiesysteme simuliert werden können und es anschließend anzuwenden, um Energieversorgungszenarien auf Gebäude- und Quartierebene hinsichtlich wirtschaftlicher Attraktivität und Emissionsreduktionspotential zu analysieren. Dabei wurde die aktuelle Debatte um eine Steuer auf Treibhausgasemissionen aufgegriffen, so dass die Forschungsfrage beantwortet werden sollte, wie sich eine mögliche auf Treibhausgasemissionen erhobene Steuer auf Investitionsentscheidungen zwischen Energiesystemkomponenten in Gebäuden und Quartieren auswirkt.

Dazu wurden in Kapitel 2 die Grundlagen der Energiesystemsimulation vorgestellt. Zunächst wurden die aktuellen Herausforderungen bei der Energieversorgung von Gebäuden sowie Energiesysteme und deren Komponenten erläutert. Außerdem wurden Berechnungsmethoden von Wirtschaftlichkeit und Treibhausgasemissionen vorgestellt, bevor abschließend das bestehende Energiesystemmodell beschrieben wurde. Kapitel 3 wurde genutzt, um die Bearbeitungsschritte zur Weiterentwicklung des Energiesystemmodells darzustellen. Dies umfasst zunächst strukturelle Änderungen, unter denen die Verbesserung des Programmaufbaus zur Laufzeitverringerung und die visuelle Aufbereitung der grafischen Benutzeroberfläche zusammengefasst wurden. Danach wurde die Erweiterung des Gebäudemodells durch weitere Lastprofile sowie die Komponenten Solarthermie, Blockheizkraftwerk, Heizkessel und konventionelle Fahrzeuge erläutert. Darauf aufbauend wurde das Quartiermodell entwickelt, mit dem die Ergebnisse mehrerer Gebäudesimulationen aggregiert werden können. Außerdem kann auf Quartierebene ein elektrischer Quartierspeicher sowie ein Nahwärmenetz mit Blockheizkraftwerk und nach Auswahl Spitzenlastkessel und/oder Pufferspeicher simuliert werden.

Anschließend wurden die entwickelten Modelle in Kapitel 4 angewendet. Der Vergleich verschiedener Energieversorgungszenarien auf Gebäude- und Quartierebene ergab, dass der Ersatz von Bestandskesseln durch moderne Brennwertkessel die wirtschaftlich attraktivste Form der Investition im Gebäudesektor ist. Daneben können auch PV-Anlagen mit optionalen elektrischen Speichern und Solar-

thermieranlagen mit thermischen Speichern die jährlichen Gesamtkosten eines Bestandsgebäudes reduzieren. Auf Quartierebene kann ein elektrischer Quartierspeicher bereits existierende elektrische Erzeugungsanlagen in Gebäuden wirtschaftlich sinnvoll ergänzen. Außerdem können Elektrofahrzeuge bei Betrieb mit eigens erzeugtem Strom wirtschaftlich attraktiv sein, wenn ohnehin neue Fahrzeuge angeschafft werden müssen. Die höchsten Einsparungen an Treibhausgasemissionen können durch Wärmepumpen erzielt werden. Die darauf aufbauende Analyse des Einflusses einer möglichen auf Treibhausgasemissionen erhobenen Steuer in Höhe von 40 €/t hat auf Gebäudeebene ergeben, dass zwar ein paar weitere Szenarien, deren Kosten zuvor annähernd gleich hoch waren wie die des Bestandsgebäudes, wirtschaftlich attraktiv wurden, moderne Brennwertkessel aber dennoch am attraktivsten blieben. Die hohen Investitionskosten, die zur Halbierung der Treibhausgasemissionen nötig waren, konnte die Steuer in der gewählten Höhe nicht kompensieren. Auf Quartierebene zeigte die angenommene Steuer in der Analyse keine Lenkungswirkung. In Bezug auf Fahrzeuge ergab sich ebenfalls keine Wirkung, hier sind allerdings vor allem die geringen Emissionsunterschiede als Begründung zu nennen.

Kapitel 5 zeigt die Limitationen des Modells auf. Die Energiesystemsimulation erfolgt ohne Berücksichtigung von Förderungen, Umlagen auf eigenverbrauchten Strom und der steuerlichen Behandlung des Eigentümers. Einspeisevergütungen werden nur unvollständig betrachtet und wurden daher in der Analyse ausgelassen. Außerdem gibt das Kapitel einen Ausblick auf weitere Forschung. Insbesondere die Berechnung des Transformationspfades eines Energiesystems von einem primär auf fossilen Brennstoffen basierenden System zu einem auf erneuerbaren Energien gestützten System muss Gegenstand weiterführender Forschung sein, um die Lenkungswirkung politischer Eingriffe umfassend zu ermitteln. Dafür bietet diese Arbeit ein breit gefächertes Fundament.