

Entwicklung eines Energiesystems-Simulators: Wärmenachfrage und -angebot

Masterarbeit

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

vorgelegt von:

Name: Schümann



Vorname: Angela-Patricia



Prüfer: Prof. Dr. Michael Breitner

Hannover, den 30.09.2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Forschungshintergrund	5
2.1 Literaturrecherche und Forschungslücke	5
2.2 Design Science Research	22
3 Grundlagen und Modellierung eines Energiesystemsensors	26
3.1 Gesamtmodell und Synergien der Bereiche	26
3.2 Wärmenachfrage	28
3.3 Wärmeenergieangebot	41
3.4 Systemarchitektur im Rahmen der Programmiersprache Matlab	46
4 Fallstudie	51
4.1 Datengrundlage und Schlüsselfaktoren für die Region Hannover	51
4.2 Szenario 1: Gegenwärtiger Zustand	58
4.3 Szenario 2: Nationale Klimaschutzziele	66
4.4 Szenario 3: Ziele der Region Hannover	77
5 Diskussion	83
5.1 Analyse der Ergebnisse	83
5.2 Limitationen	87
5.3 Handlungsempfehlungen	90
6 Fazit und Ausblick	93
Literatur	96
A Tabelle Literaturrecherche	105
B Gebäudedaten der Region Hannover	107
C Matlab Code	117

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Noch bis vor 150 Jahren etwa, war der Energieverbrauch in deutschen Haushalten relativ konstant.¹ Ab der Industrialisierung aber, stieg der weltweite Energiebedarf exponentiell an. Auch in den nächsten Jahren wird sich das Energiebedarfswachstum voraussichtlich nicht reduzieren. Hauptgrund hierfür, ist der weltweite Bevölkerungswachstum, sowie das Angleichen der Entwicklungs- und Schwellenländer, an den westlichen Lebensstandard. Während vor 100 Jahren Kohle die Basis der Energieträger ausmachte, gewannen nach dem zweiten Weltkrieg, vor allen Dingen aufgrund der wachsenden Automotorisierung, Öl und Erdgas immer mehr an Bedeutung. Heutzutage werden in etwa 85% des weltweiten Energiebedarfs von fossilen Energieträgern bereitgestellt.²

Fossile Brennstoffe entstehen im Laufe vieler Millionen Jahre durch die Umwandlung organischer Stoffe und lagern sich schließlich in der oberen Erdkruste ein. Die fossilen Stoffe befinden sich nur an einigen geographischen Standorten und Erdschichten. Je weiter der weltweite Ressourcenverbrauch fortschreitet, desto schwieriger wird die Gewinnung. Die Erdölförderung erfolgt beispielsweise an immer tieferen und schwer zugänglichen geographischen Lagerstandorten. Der Förderungsaufwand spiegelt sich folglich in den Preisen, welche die Endnutzer letztendlich zahlen müssen, wider.³ Verschiedene Studien gelangen zu unterschiedlichen Ergebnissen im Hinblick auf die Frage, wie lange die fossilen Reserven den Energiebedarf noch decken werden können, denn die Prognosen hinsichtlich zukünftiger Förderungstechnologien, Lagerstättenfunde, oder aber auch dem Anstieg des Energieverbrauchs, gestalten sich problematisch. Jedoch sind sich alle Studien einig, dass die fossilen Ressourcenvorräte in absehbarer Zeit zu Neige gehen werden. Denn der zeitliche Kontext zwischen dem Ressourcenverbrauch und der natürlichen Entstehung neuer Vorräte stehen im keinen Gleichgewichtsverhältnis. Die Preise steigen kontinuierlich mit den abnehmenden Ressourcenvorkommen.⁴

Die natürlichen Treibhausgas (THG)-Vorkommen verstärken die menschlichen Emissionen von THG, welches bei der Energiegenerierung fossiler Brennstoffe entsteht. Dies führt zu negativen Umweltauswirkungen. Durch die Verbrennung fossiler Stoffe entsteht THG, welches als Hauptursache der globalen Klimaerwärmung gilt. Der fossile Energiegewinnungsausstoß lässt Sonnenstrahlen ungehindert zur Erde durch und absorbiert einen Großteil der atmosphärischen Gegenstrahlung, welche wieder auf die Erde reflektiert wird. Die Erd-

¹Vgl. Cramer et al. (2009), S. 13.

²Vgl. Höök und Tang (2013), S. 798.

³Vgl. Andruleit et al. (2013), S. 399ff.

⁴Vgl. Lin und Ouyang (2014), S. 129-131.

oberfläche erwärmt sich in einem Ausmaß, welches allein durch die Sonnenstrahlung und den natürlich vorkommenden THG-Bestandteil nicht entstehen würde.⁵ Wie lange die Verweilzeit der THG in der Erdatmosphäre ist, hängt vom jeweiligen chemischen Element ab. Die mittlere atmosphärische Verweilzeit von Kohlenstoffdioxid beispielsweise, beträgt in etwa 120 Jahre. Dadurch wirken sich THG auch noch Jahre nach dessen Emission aus.⁶ Die gegenwärtigen, wahrnehmbaren Auswirkungen der Erderwärmung sind beispielsweise das Gletscherschmelzen und dem daraus resultierenden ansteigenden Meeresspiegel. Für Länder wie den Niederlanden, wo ungefähr die Hälfte des Landes weniger als einen Meter über, rund ein Viertel des Landes unterhalb des Meeresspiegels liegt, hat der Anstieg erhebliche negative Auswirkungen. Die Gletscherschmelzung bewirkt zudem eine Veränderung der Meeresströmungen. Mit dem Fortschreiten der globalen Erderwärmung verschieben sich die Klimazonen in nördlicher Richtung. Dieser Vorgang verstärkt den Effekt, dass regional neue Rekordtemperaturen erreicht werden.⁷ Die Niederschlagsmengenverteilung ist ebenfalls von der Klimaerwärmung betroffen, wodurch niederschlagsbedingte Unwetter wie Überschwemmungen oder Dürren entstehen. Diese Wetterbedingungen wiederum, wirken sich langfristig auf die politische Lage aus. In jenen Regionen, wo klimatische Entwicklungen die Lebensbedingungen gravierend beeinträchtigen, entsteht eine Abwanderung der Bevölkerung. In den zugewanderten Regionen hingegen, kann es so zu Spannungen kommen. Solche umweltbedingten Flüchtlingsströme werden vor allen Dingen in semiariden Regionen erwartet, in welchen zunehmend Wasserknappheit herrscht. Die Veränderungen der Niederschlagsmengenverteilung wirken sich ebenfalls negativ auf landwirtschaftliche Produktionspotenziale aus, da es durch den mangelnden oder aber auch erhöhten Niederschlag zu einem reduzierten Nahrungsmittelanbau kommen kann.⁸

Die Untersuchungen der Auswirkungen und Zusammenhänge einzelner Teilaspekte, welche aus der globalen Erderwärmung resultieren, sind Gegenstand vieler Studien, jedoch decken jene genannten Auswirkungen nicht den gesamten, weitaus komplexeren Themenbereich der Erderwärmung ab.⁹ Dennoch verdeutlichen sie das mögliche Ausmaß und die Problematik der fossilen Energieversorgung. Die erkennbare Endlichkeit der fossilen Ressourcen und die möglichen Konsequenzen veranlassen so mehrere Staaten zur Radizierung einer umfassenden Klimarahmenkonvention. Darauf aufbauend definiert die Bundesregierung Klimaschutzziele, die schrittweise bis zum Jahre 2050 umgesetzt werden sollen. Diese Ziele sehen eine 80 prozentige Reduktion der THG-Emissionen im Vergleich zu 1990 vor, welche durch eine Umstrukturierung der Energieträgerpfade sowie durch Reduktion von Primärenergie erreicht werden soll. Dazu strebt die Bundesregierung an, dass 80% der

⁵Vgl. García-Martos et al. (2013), S. 365.

⁶Vgl. Shrestha (2016), S. 2.

⁷Vgl. Chan und Wu (2015), S. 2-3.

⁸Vgl. Bauer et al. (2016), S. 72.

⁹Vgl. Dai (2013), S. 53.

Stromerzeugnisse sowie 60% der Gesamtprimärenergie aus regenerativen Energiequellen generiert werden.¹⁰ Die Umstrukturierung der Energiebereitstellung steht vor der Prämisse, dass Windkraft- und Solarenergie saisonal fluktuieren und die Versorgungssicherheit beeinträchtigt.

Die ambitionierten Ziele benötigen eine strategische Planung, um sowohl die Zielerreichung, als auch die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Für eine strategische Entscheidung ist eine detaillierte Analyse der Ausgangslage, die Identifikation verschiedener, möglicher Entwicklungspfade des Energiesystems, sowie deren Evaluierung, erforderlich. Auf Grundlage der geschilderten Herausforderungen der Zielsetzung leitet diese Arbeit folgende Forschungsfrage ab:

Welche Auswirkungen haben verschiedene Transformationspfade eines regionalen Energiesystems auf die Versorgungssicherheit und Reduktion der Treibhausgasemissionen?

Die Reduktion der THG-Emissionen ist in dem Ausbau der regenerativen Energieträger implizit enthalten. Aufbauend auf die Forschungsfrage zielt die Arbeit auf die Entwicklung eines Energiesystemsensors ab, welcher zukünftige mögliche Energieversorgungssysteme simuliert. Die Synergien der thermischen und elektrischen Bedarfs- und Bereitstellungsseite bildet der Simulator ab. Zudem enthält das Modell mehrere Energieträger, welche nach den gewünschten Anteilen einfließen. Dadurch lassen sich verschiedene Transformationspfade analysieren, sowie deren Energiegewinnungsbeiträge bewerten. Die stündliche Auslösung der Simulation erlaubt eine punktuelle Analyse einzelner Energieträger und Verbrauchssektoren. Die Umstrukturierung des Energiesystems strebt eine Erhöhung der erneuerbaren Erneuerbare Energien (EE) und somit eine Reduktion der THG-Emissionen an. Zudem können Energieeffizienzmaßnahmen eingebunden und deren Einsparpotentiale analysiert werden. Anhand einer regionalen Simulation werden Potentiale und Entwicklungspfade aufgezeigt die Zielsetzung wird auf ihre Erreichbarkeit überprüft. Mit Hilfe reeller Verbrauchsdaten lässt sich die Genauigkeit des Simulators überprüfen. Aus der Analyse lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten, welche die strategische Planung sowie die Entscheidungsfindung unterstützen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf die Problemstellung stellt Kapitel 2 den Forschungshintergrund vor. Das Unterkapitel 2.1 erörtert und analysiert die bestehende Literatur und identifiziert im Rah-

¹⁰Vgl. BMU und BMWi (2010), S. 4f.

6 Fazit und Ausblick

Gemeinsam mit anderen Arbeiten fand die Modellierung und Programmierung eines Energiesystemsensors, nach Vorgaben einer definierten Forschungsfrage, statt. Das zugehörige Wärmemodell wurde im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der bilanziellen Betrachtung von Wärmenachfrage und Angebot entwickelt und in den Simulator eingebunden. Der Energiesystemsensors ermöglicht die Simulation über einen Zeitraum mehrerer Jahre. Als Datenbasis stehen Wetterdaten der Region Hannover aus sechs verschiedenen Jahren zur Verfügung, welche in stündlichen Intervallen skaliert sind. Die Implementierung des Wärmemodells sowie die Einbindung von Teilmodulen anderer Arbeiten erfolgte in MATLAB. Die Synergien und möglichen Interaktionen zwischen den einzelnen Teilmodulen sowie dem Strom- und Wärmemodell werden bei der Simulation berücksichtigt. Die Simulation kann zur strategischen Planung und Unterstützung bei der Entscheidungsfindung im Bereich der Energieversorgung dienen. Dem liegt zugrunde, dass sich mit der Simulation die Potentiale verschiedener Maßnahmen auf regionaler Ebene abschätzen und analysieren lassen. Dies kann für eine mögliche Umstrukturierung des Energiesystems von erheblichem Vorteil sein. Das Gesamtmodell wurde mit Hilfe eines regionalen Szenarios, welches als Ausgangs- und Vergleichssituation diente, auf seine Genauigkeit überprüft. Weiterhin wurden verschiedene Zukunftsszenarien vom Simulator erstellt. Die Aufgabe zur Analyse dieser Szenarien bestand in der Prüfung, ob die Klimaschutzziele der Bundesrepublik Deutschland und der Region Hannover erreicht werden können. Es wurde festgestellt, dass die Erreichbarkeit der Ziele vom Ausbau der regenerativen Energieerzeugung und von der Steigerung der Effizienz bei der Energienutzung abhängt.

Die erstellten Szenarien beantworten die definierte Forschungsfrage nach den Auswirkungen verschiedener Transformationspfade auf die Versorgungssicherheit sowie nach der Reduktion von Treibhausgasemissionen. Hier gilt zu beachten, dass die Reduktion von Treibhausgasemissionen mit dem Ausbau der regenerativen Energien untersucht werden, da diese keine direkten Emissionen ausstoßen. Die Szenarien zeigten, dass die Region Hannover ohne Umstrukturierung der Energieversorgung keine der gesetzten Zielen erreichen kann. Aktuell stellt die fossile Energieerzeugung einen Anteil von 91% der Strom- und Wärmeenergie bereit. Zur Zielerreichung ist es notwendig, die Erzeugung aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Öl fast vollständig durch regenerative Alternativen zu ersetzen. Hierzu ist ein flächendeckender Ausbau von regenerativer Energieerzeugung notwendig. Auch im Bereich der Prozesswärme gilt es, geeignete Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu treffen. Die hochtemperierte Prozesswärme stellt hierbei die größte Herausforderung dar. Obwohl dieser Energiebedarf momentan fast ausschließlich mit Erdgas gedeckt wird, zeigte sich eine komplette Abdeckung mit regenerativen Energieträgern in der Simulation als möglich. Eine Umstellung von Erd- auf Biogas zeigt sich hier als ersten Schritt

in Richtung der regenerativen Versorgung. Eine Umstrukturierung ist auch mit einem erheblichen Aufwand im Ausbau von EE und einer Senkung des Energiebedarfs verbunden. Diese erfordern zusätzlich hohe Speicherkapazitäten in thermischen und elektrischen Bereichen, um eine schwankende Energiebereitstellung der regenerativen Energieträger auszugleichen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Im Falle nicht möglicher Energiebereitstellung durch regenerative Erzeuger, steuern hohe KWK-Anlagenleistungen die Bereitstellung der thermischen und elektrischen Energie. Dies sichert einen hohen Autarkiegrad der Region. Aus den erstellten Szenarien konnten regionale Handlungsempfehlungen für politische Maßnahmen und sowie Optimierungspotentiale abgeleitet werden. Bei der Erstellung der Szenarien zeigten sich die Grenzen des Simulators. Die Erfahrungen aus diesen Limitationen fließen in Form von Weiterentwicklungsvorschlägen mit in die Handlungsempfehlungen ein.

Die Limitationen können zur Grundlage einer Weiterentwicklung des Simulators genutzt werden, da sie Potentiale zur Verbesserung des Gesamtmodells aufzeigen. Einen großen Mehrwert verschafft die Einbindung einer Kostenbetrachtung zur Analyse der Wirtschaftlichkeit, um auf deren Grundlage die verschiedenen Energieträger und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu bewerten. Zudem ist eine Kalkulation der Emittierten Treibhausgase von Vorteil, um mögliche Maßnahmen zur Erfüllung der Klimaziele für eine Reduktion der Emission mit direkten Angaben belegen zu können. Durch die Integration der genannten Module ließen sich mit der Simulation die möglichen Transformationspfade hinsichtlich des Verhältnisses der Kosten zur Reduzierung der eingesparten Treibhausgase bewerten. Die regionale Energieversorgung kann mit einem solchen Verfahren sukzessive unter Berücksichtigung des Kosten/Nutzen Aspekts optimiert werden. Zudem ist Die Möglichkeit der Optimierung mit Fokussierung auf einen anderen Schwerpunkt oder der Integration weiterer Zwischenziele aufgrund der modularen Gestaltung des Simulators gegeben. Ein weiterer Ansatzpunkt liegt in der Einbindung verschiedener industriellen Prozesstemperaturen. Für eine regionale Prozesswärmesimulation werden detaillierte Daten über den zeitlichen Verlauf der Prozesstemperaturen aller Industriezweige benötigt. Diese müssen zur sinnvollen Einbindung in stündliche Intervalle gegliedert sein. Aufgrund des Fehlens an öffentlich zugänglichen Informationen wurde eine konstante Prozesstemperatur angenommen und auf die Einwohnerzahl der Region skaliert. Zudem sind die Daten über die Gebäude im Industriesektor nicht bekannt, weshalb für diesen Sektor keine Raumwärmekalkulation durchgeführt wurden. Bestimmte Bedarfssektoren wie beispielsweise Krankenhäuser und Hotels heben einen allgemein höheren energetischen Bedarf, welcher für die Simulation näherungsweise geschätzt werden musste. Eine Implementierung dieser thermischen Bedarfe würde die Genauigkeit und Aussagekraft der Simulation erhöhen. Weiteres Verbesserungspotential liegt in der Skalierbarkeit des Energiesimulators, beziehungsweise in der Darstellung der Ergebnisse. Die Darstellung der Ergebnisse für einzelne Teilgebiete

wie Kommunen oder Stadtteile kann helfen, Potentiale der einzelnen Teilsysteme aufzuzeigen und gegebenenfalls präzisere Maßnahmen zur Zielerfüllung einzuleiten. Die volkswirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen einer Umstrukturierung sowie eine Prognose der politischen Entwicklung kann das Modell nicht abbilden. Eine Weiterentwicklung könnte die Güte der Prognose zukünftigen Energieversorgung positiv beeinflussen.

Um KWK-Anlagen und deren Integration im Modell vollständig bewerten zu können, ist eine detaillierte Betrachtung der Netze innerhalb der Simulation nötig. In dieser Arbeit werden die Wärmenetze unzureichend betrachtet. Ein prozentualer Parameter wurde zur Modellbildung definiert, welcher den an das Wärmenetz angeschlossenen Gebäudeanteil festlegt. Diese Betrachtung zeigt sich nicht als ausreichend, da sie sich auf die KWK-Anlagen Analyse auswirkt. Da der Netzausbau mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden ist, erlaubt dieser im Vergleich zu den Anlagenkosten keine nachrangige Betrachtung. Für eine sinnvolle Dimensionierung zentraler KWK-Anlagen werden die Verbrauchsdaten der an das Netz angeschlossenen Gebäude und Industrieteile benötigt.