
Optimierung von Energieversorgungssystemen

Janet Nagel

Optimierung von Energieversorgungssystemen

Modellierung, Programmierung und
Analyse

Janet Nagel
INERI
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-031-36354-2 ISBN 978-3-031-36355-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-36355-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Springer Nature Switzerland AG 2019, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Daniel Froehlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbeallee 11, 6330 Cham, Switzerland

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Mit diesem Buch bleibe ich dem Thema Energie treu. Ich bin damit zu meinen Wurzeln der Energiemodellierung und Optimierung von Energieversorgungssystemen zurückgekehrt. Bereits vor über 20 Jahren habe ich mich das erste Mal mit dem Thema der Optimierung von Energieversorgungssystemen beschäftigt. Auch damals wurden je nach Fragestellung unterschiedlichste Modelle umgesetzt, manche mehr heuristisch, andere agentenbasiert bis hin zur klassischen linearen Optimierung. Im Zuge der Energiewende hat dieses Thema an Bedeutung weiter hinzugewonnen. Unzählige Fragestellungen weltweit warten darauf, beantwortet zu werden, um Lösungen für die zukünftige Gestaltung der Energieversorgung zur Deckung der Energienachfrage der Weltbevölkerung zu erhalten.

Durch einen Zufall habe ich Anfang 2017 bei meinen Recherchen von dem spannenden Projekt bzw. Programmsystem „Open Energy System Modelling Framework“ (OEMOF) erfahren. Der Einsatz dieses Tools kann dazu beitragen, schneller Antworten auf die Vielzahl an Energie-Fragestellungen zu erhalten und damit die Umsetzung der Energiewende schneller voranzutreiben. Es handelt sich bei OEMOF um einen generischen Ansatz zur Modellierung und anschließenden Optimierung von Energieversorgungssystemen. Generische, also allgemeingültige Ansätze spielen in der objektorientierten Programmierung eine wichtige Rolle. Das generische Konzept findet sich bei OEMOF bspw. in der allgemeingültigen Beschreibung einzelner Klassen und Funktionen wieder. Hierdurch ist OEMOF auf verschiedenste Fragestellungen anwendbar.

Bereits in der Vergangenheit, vor ca. 15 Jahren, habe ich mich mit generischen Ansätzen im Zusammenhang mit Datenbanken beschäftigt. Ich hatte den Gedanken, Datenbanken nicht jedes Mal, insbesondere bei Datenmodell-Anpassungen, neu zu programmieren, sondern generisch das Datenmodell anzupassen. Hinweise zu den Veröffentlichungen zu diesem Thema befinden sich unter <http://www.risa.eu/de/safetyanalyses/publications.php>.

Das Projekt OEMOF wird ebenfalls von der Vision getragen, dass Optimierer von Energieversorgungssystemen zukünftig nicht mehr selbst Optimierungsmodelle programmieren müssen, sondern sich ausschließlich auf die Modellierung ihres betrachteten Energieversorgungssystems konzentrieren können. Noch befindet sich dieses Programmsystem im Aufbau. Da es sich hierbei um ein Open-Source-Projekt handelt, ist jeder eingeladen, daran mitzuentwickeln und das eigene Know-how einzubringen.

Das Programmsystem wird durch die Community ständig weiterentwickelt. Während der Zeit der Erstellung dieses Buches konnte ein wichtiger Schritt bei der Weiterentwicklung von OEMOF erreicht werden und ein neues Release v0.2.0 herausgebracht werden. Da die Veröffentlichung dieses Releases erst kurz vor Fertigstellung des Buches erschienen ist, konnten noch keine Erfahrungen damit gesammelt werden.

Das Buch stellt einen ersten Schritt dar, um die im Internet vorhandene Dokumentation der OEMOF-Community zusammenzuführen und dem Anwender zugänglich zu machen. Als ich anfang, mich mit dem Projekt zu beschäftigen, war es mir wichtig, zu verstehen, wie die Programmierung hinter dem Modell erfolgt ist. Aus diesem Grund werden sowohl der Programmcode als auch Beispiele für die Anwendung von OEMOF vorgestellt.

Die Entwickler von OEMOF, insbesondere jene, die das Projekt gestartet haben und immer noch dabei sind, haben sicherlich ihre eigene Sicht auf das Programmsystem OEMOF und wie darüber geschrieben werden sollte. Schließlich haben sie das Konzept für das Tool entwickelt und mit Leben gefüllt. Damit ist dieses Buch ein Buch „über“ OEMOF und nicht ein Buch „von“ OEMOF, also der OEMOF-Community. Und doch denke ich, dass es dabei hilft, den Einstieg in die Arbeit mit OEMOF zu erleichtern. In meiner eigenen Arbeit an der Hochschule habe ich erfahren, dass Modellierern, die sich bis dahin noch nicht mit Optimierungsfragestellungen beschäftigt haben, der Einstieg in die Arbeit mit diesem Tool schwerfällt. Auch, wenn vielleicht nicht alle Fragen beantwortet werden können, hoffe ich, dass mit diesem Buch ein leichter Zugang zu dem Programmsystem OEMOF möglich ist.

Bücher leben davon, dass Wissen von Experten zu bestimmten Themen mit eingebracht wird. Diese Erfahrung habe ich bei all meinen bisherigen Büchern gemacht. In diesem Zusammenhang ist zunächst die OEMOF-Community zu nennen. Durch interne Workshops, Diskussionen und Anmerkungen zu Ausschnitten des Manuskriptes war es möglich, viele Teile der Umsetzung von OEMOF zu verstehen und in dieses Buch einzubringen, wofür ich mich bedanken möchte.

Ganz besonderes möchte ich an dieser Stelle Dr. Michael Stöhr der Firma B.A.U.M. Consult GmbH für seine aktive Unterstützung danken. Durch seine Anregungen und den konstruktiven Austausch konnten wertvolle Ausführungen zu dem gesamten Thema „Optimierung von Energieversorgungssystemen“ in das Buch eingebunden werden. Insbesondere seine Liebe zum Detail und den Wunsch, mathematische Zusammenhänge präzise darzulegen, führten dazu, dass ich mich mit vielen Themen noch tiefer auseinandersetzte. Dabei wissen wir alle, dass die Zeit im beruflichen Alltag extrem eng bemessen ist und trotzdem hat Herr Dr. Stöhr nicht gezögert, mir sein Expertenwissen zur Verfügung zu stellen.

Es stand von Anfang fest, dass dieses Buch in englischer Sprache erscheinen soll. So ist Prof. Dr. Verena Jung der AKAD University neu hinzugekommen. Sie ist Professorin für Sprachwissenschaft und Übersetzungswissenschaft. Aufgrund ihres professionellen Sprachwissens konnte das Manuskript in die englische Sprache übersetzt werden und steht so einer größeren Leserschaft zu Verfügung. Auch ihr gilt mein besonderer Dank.

Das Thema „Entwicklung von Szenarien“ spielt bei der Erstellung von Energiemodellen eine zentrale Rolle. In Diskussionen mit Detlef Schumann von BridgingIT GmbH erhielt ich im Rahmen unseres BDI Arbeitskreises „Internet der Energie“ Ansätze zur Gestaltung dieses Kapitels. Für die inspirativen Gespräche und Impulse möchte ich Herrn Schumann sehr danken.

Da dieses Buch viel mit Programmcode in der Programmiersprache Python zu tun hat, habe ich Henrik Fahlke, Entwickler, als Spezialisten hinzugezogen. Er stand mir für spezifische Fragen zu Python zur Verfügung, ebenso wie zur Entwicklung eines eigenen kleinen Beispiels. Für seine Zeit und seinen persönlichen Einsatz möchte ich ihm sehr danken.

Weiterhin hat mich wieder meine treue fachliche Begleiterin Dr. Silvia Porstmann, Geschäftsführerin der Seramun Diagnostica GmbH, bei der Fertigstellung des Buches unterstützt. Insbesondere das Lesen der englischen Übersetzung war bei diesem Buch von besonderer Wichtigkeit. Für ihre unbändige Neugier und ihren intensiven Einsatz möchte ich mich sehr herzlich bedanken. Sie war bereits bei den letzten beiden Büchern beteiligt.

Ein Buchprojekt lebt auch durch einen guten Verlag an der Seite. Im Springer Verlag habe ich einen sehr guten und kompetenten Partner zur Umsetzung meiner Buch-Idee gefunden. Für die Unterstützung aller Beteiligten möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Besonders hervorheben möchte ich meine Familie. Neben der aktiven Unterstützung wurde großes Verständnis für die vielen Stunden am Rechner in meiner Freizeit aufgebracht. Ohne diesen Zuspruch wäre die Umsetzung all meiner Buchprojekte nicht möglich gewesen. Danke für die Kraft; die ihr mir gebt.

Nun bleibt mir abschließend, allen interessierten Lesern, Energie-Modellierern und zukünftigen Entwicklern von OEMOF viel Spaß mit dieser Lektüre und einen guten Zugang zu dem Tool zu wünschen. Bringen wir gemeinsam die Energiewende nach vorne!

Berlin, Deutschland
April 2018

Janet Nagel

Vorwort 2023

Zu Zeiten des ersten Vorworts schien die Welt aus der heutigen Sicht noch ganz in Ordnung zu sein. Man versuchte, das Thema Energiewende in den Griff zu bekommen und beschäftigte sich vorrangig mit den damals verfügbaren bzw. sich in der Entwicklung befindenden Technologien.

Fünf Jahre später sieht die Welt ganz anders aus. Eine Pandemie wurde weltweit durchlebt, ein Krieg zwischen Russland und der Ukraine ist entfacht und auch an vielen anderen Stellen der Welt schwelen neue Konflikte.

Dabei steht das Thema Energie noch stärker als in der Vergangenheit im Fokus, heute verstärkt unter dem Aspekt der sicheren Versorgung. Denn nach dem Angriffskriegs Russlands gegen die Ukraine und den nachfolgenden umfassenden Sanktionen der westlichen Welt gegen Russland ist die Gasversorgung Deutschlands durch Russland nicht mehr gegeben. Dies hat zu einem drastischen Umdenken in Deutschland geführt, welches nun erst einmal versucht, die Abhängigkeiten von „alten“ Energielieferanten zu lösen und neue Versorgungsmöglichkeiten, bspw. auch für Wasserstoff, aufzubauen.

Vor diesem Hintergrund steht die Modellierung und damit die Entscheidungsfindung über die Auswahl der besten Möglichkeiten einer sicheren, unabhängigen und trotzdem „sauberen“ Energieversorgung im Blickpunkt. Es haben sich neue Fragestellungen und Rahmenbedingungen ergeben, die neue Modelle und neue Berechnungen erforderlich machen. Das hier als Beispiel vorgestellte Programmsystem als Open Energy Modelling Framework (OEMOF) kann nach meiner festen Überzeugung in Zukunft einen großen Beitrag zur Bewältigung der vielfältigen und schweren Aufgabe leisten.

Beschäftigt mit anderen Dingen, habe ich über ein weiteres Buch zur Optimierung von Energieversorgungssystemen nicht nachgedacht. Umso mehr erfreute es mich, als ich im Herbst 2022 einen Blick in mein E-Mail-Account warf und sich darin eine E-Mail des Springer Verlages mit der Idee der Übersetzung der englischen Ausgabe ins deutsche befand. Es sollte ein automatisiertes Übersetzungsprogramm erprobt und evaluiert werden.

Da dieses Buch bereits im Original auf Deutsch bestand, war die Veröffentlichung einer deutschen Ausgabe auch ohne Übersetzung problemlos möglich. Eine größere Herausforderung bestand nun darin, sich mit den neueren Entwicklungen von OEMOF auseinanderzusetzen.

Schon bei der englischen Ausgabe war es nicht mein Ziel, OEMOF eins zu eins abzubilden. Vielmehr soll ein Verständnis für die Umsetzung eines generischen Ansatzes zur Abbildung von Optimierungsproblemen im Energiesektor mit der Programmierungssprache Python gegeben werden. Aus diesem Grund sollen sowohl durch die englische als die deutsche Ausgabe nur erste beispielhafte Einblicke in die Strukturen und Programmiermöglichkeiten in OEMOF geschaffen werden. Denn uns ist allen bewusst, dass sich Programmsysteme und Programmcodes insbesondere in open source Projekten sehr schnell ändern. Die Grundstrukturen bleiben jedoch gleich, sodass der interessierte Leser einen Überblick darüber bekommt, wie ein generischer Ansatz in OEMOF umgesetzt werden kann.

Somit ist mit dieser deutschen Ausgabe der 2019 veröffentlichten englischen Version keine wesentliche Überarbeitung der Inhalte erfolgt. Auf Änderungen im Programmsystem OEMOF wird an den jeweiligen Stellen hingewiesen. Es wird jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Insbesondere der dargestellte Quellcode entspricht dem Stand der ersten englischen Ausgabe in 2019.

Ich hoffe trotzdem, dass dieses Buch für den Leser hilfreich ist, um sich mit OEMOF und der Umsetzung in der Programmiersprache Python auseinanderzusetzen und erste Ideen für ein eigenes Energiemodell zu erhalten. Aktuelle Informationen können direkt der Internetseite von OEMOF entnommen werden, die durch die in diesem Buch dargestellten Beschreibungen und Inhalte dann leichter verständlich sein sollten.

Dieses Buch soll somit dazu beitragen, sich intensiv mit der allgemeinen Struktur und Umsetzungsmöglichkeit zur Modellierung von Optimierungsproblemen in OEMOF auseinanderzusetzen.

Ich wünsche dem interessierten Leser viel Spaß bei der Arbeit mit diesem Buch und hoffe, dass mit dem folgenden Energiemodell ein wichtiger Beitrag für eine sichere, unabhängige und trotzdem „saubere“ Energieversorgung unseres Landes geleistet werden kann.

Ihre Janet Nagel

Berlin, Deutschland
Juni 2023

Janet Nagel

Inhaltsverzeichnis

- 1 Das Projekt OEMOF** 1
 - 1.1 Techniken zur Entwicklung von Strategien und Handlungsoptionen 5
 - 1.2 Worauf basiert OEMOF?..... 8
 - 1.3 Linear Programming (LP) und Mixed-Integer Linear Programming (MILP) 13
 - 1.3.1 Linear Programming (LP) 18
 - 1.3.2 Beispiel „Biogasproduktion“..... 18
 - 1.3.3 Formaler Aufbau LP 25
 - 1.3.4 Mixed-Integer Linear Programming (MILP)..... 26
 - 1.3.5 Sensitivitätsanalysen 29
 - Literatur..... 29

- 2 Das generische Basismodell in OEMOF**..... 31
 - 2.1 Grundlagen in Python 32
 - 2.1.1 Klassen, Objekte und Methoden 34
 - 2.1.2 Daten 36
 - 2.1.3 Erstellen von Klassen, Objekten und Methoden 38
 - 2.1.4 Klassenvariablen 41
 - 2.1.5 Vererbung 43
 - 2.1.6 Ein eigenes Beispiel in Python umsetzen 43
 - 2.2 Strukturaufbau des generischen Modells in OEMOF..... 49
 - 2.3 Libraries in OEMOF 53
 - 2.3.1 Bibliothek „oemof-network“ 54
 - 2.3.2 Bibliothek „oemof-solph“ 55
 - 2.3.3 Bibliothek „oemof-outputlib“ 60
 - 2.3.4 Bibliothek „feedinlib“ 61
 - 2.3.5 Bibliothek „demandlib“ 65
 - 2.4 Zentrale Packages und Module in OEMOF..... 65
 - 2.4.1 Module energy_system 66
 - 2.4.2 Module groupings 67
 - 2.4.3 oemof.outputlib package 69

2.4.4	oemof.solph package	70
2.4.5	oemof.tools package	90
2.5	Vorgehen bei der Entwicklung eines eigenen Modells	91
	Literatur	97
3	Mathematische Beschreibung der Objekte	99
3.1	Mathematisches Gleichungssystem im Modul „blocks.py“	109
3.1.1	class Flow(SimpleBlock)	110
3.1.2	class InvestmentFlow(SimpleBlock)	117
3.1.3	class Bus(SimpleBlock)	121
3.1.4	class Transformer(SimpleBlock)	122
3.1.5	class NonConvexFlow(SimpleBlock)	123
3.2	Mathematisches Gleichungssystem im Modul „components.py“	128
3.2.1	class GenericStorage(network.Transformer)	128
3.2.2	class GenericStorageBlock(SimpleBlock)	131
3.2.3	class GenericInvestmentStorageBlock(SimpleBlock)	132
3.2.4	class GenericCHP(network.Transformer)	136
3.2.5	class GenericCHPBlock(SimpleBlock)	138
3.2.6	class ExtractionTurbineCHP(solph.Transformer)	144
3.2.7	class ExtractionTurbineCHPBlock(SimpleBlock)	145
3.3	Mathematisches Gleichungssystem im Modul „constraints.py“	148
3.4	Mathematisches Gleichungssystem im Modul „custom.py“	150
3.4.1	class ElectricalLineBlock(SimpleBlock)	150
3.4.2	GenericCAESBlock(SimpleBlock)	151
3.5	Mathematisches Gleichungssystem im Modul „models.py“	158
	Literatur	159
4	Modellierung in OEMOF	161
4.1	Die Arbeit mit dem Framework von OEMOF	161
4.1.1	Eine Vertiefung in Python Programmierung	162
4.1.2	Oemof-energy_system	167
4.1.3	Oemof-groupings	172
4.1.4	Oemof-network	177
4.1.5	Oemof-solph	180
4.1.6	Oemof-outputlib	190
4.1.7	Oemof-feedinlib	201
4.1.8	Oemof-demandlib	215
4.2	Beschaffung von Daten	217
4.3	Das Programmsystem Spyder	222
4.3.1	Spyder Editor	223
4.3.2	Variable Explorer	225
	Literatur	226

5	Getting startet	229
5.1	Installation von OEMOF	229
5.2	Mein erstes Modell	238
5.3	Definition von Szenarien	240
	Literatur	254
6	Modellierung von Optimierungsproblemen im Energiesektor mit OEMOF	257
6.1	Studie „Elektrifizierung von Landmaschinen und Einsatz von Photovoltaik“	257
6.1.1	Investitionsberechnung in OEMOF	258
6.1.2	Finanzmathematische Erweiterung der Annuitätenmethode im Modul „economics_BAUM“	260
6.1.3	Der Quellcode des Moduls „economics_BAUM“	263
6.1.4	Die Applikation „GridCon_storage“	265
6.2	Modellierungsbeispiele aus OEMOF im Release v0.2.0	280
6.2.1	Beispiel „simple_dispatch“	280
6.2.2	Beispiel Investment Modelle – Variante 1: Investitionskosten für Windkraft, PV und Speicher	285
6.2.3	Beispiel Investment Modelle – Variante 2: Investitionskosten für Speicher	291
	Literatur	295