

Modellierungstool für den Einsatz von Warmwasserspeichern als Flexibilitäten

L. Gnam

Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

M. Schindler, P. Jasek, C. Pfeiffer, M. Puchegger

Forschung Burgenland GmbH, Eisenstadt, Österreich

ABSTRACT: For a successful transformation of the existing energy system to a sustainable and green system, the ever-increasing use of renewable energy conversion is inevitable. In the electricity sector in particular, the use of wind turbines and photovoltaic systems offers enormous potential for replacing conventional or fossil energy sources. One of the greatest challenges of the two aforementioned power generation technologies lies in their often extremely fluctuating generation, where generation and demand do not always coincide resulting in a high demand for so-called flexibilities, such as energy storage systems. However, since electricity storage systems pose challenges in terms of capacity, performance and cost, it is necessary to use other storage technologies in order to obtain both a technical and an economically acceptable solution to the flexibility problem. Here, especially the sector coupling option “thermal storage” plays a central role, which can provide the necessary flexibilities for an energy system. Local heating networks and heating centers in multi-story residential buildings are usually coupled with on-site thermal (and electrical) production. Heat pumps are sometimes used to couple the electricity grid with the heating grid and thereby store excess electricity in the form of heat. Here, heat pumps are ideally suited to make targeted use of the fluctuating generation of renewable electricity and to use or store it as heat. Some of the challenges for a successful coupling of electricity and heat grids lie on the one hand in the technical design of the heat pumps and on the other hand in the way exactly these systems are to be integrated into existing or new grids. Therefore, this work presents a flexibly applicable and modular modeling and simulation framework for the coupling of power and heat grids. It is based on a mixed-integer linear optimization model for power and heat networks. Due to the flexible design, different types of storage with variable sizes can be considered. Since besides a technically optimal operation also the economic efficiency is of great importance, a main aspect of the framework is the calculation of a technically and economically efficient schedule of heat pumps and storage units as well as an analysis of optimal investment options for an adaptation of existing systems. Using the example of an existing electricity and heat network in Burgenland, this paper shows how an optimal storage of electricity in heat storage systems leads to an increase of the share of renewable energy in the system and at the same time to an economic additional revenue.

1. EINLEITUNG

Damit die Energiewende weiter vorangetrieben wird, ist nicht nur die Verfolgung der ambitionierten Ausbauziele für erneuerbare Energien notwendig, sondern müssen auch die damit einhergehenden Herausforderungen betrachtet werden. Durch den hohen Anteil fluktuierend Erzeugender ist einerseits die Netzstabilität ein Thema aber andererseits auch die temporale Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch erneuerbarer Energien. Im Burgenland, dem östlichsten Bundesland Österreichs, gibt es eine große Anzahl an Windenergieanlagen. Einher mit der hohen Erzeugungsmenge geht das Problem der Verteilung und Speicherung, vor allem in Zeiten in denen die Erzeugung größer als der Verbrauch ist. Daher ist es notwendig Ansätze zu entwickeln um die lokal erzeugte Windkraft speichern und besser nutzen zu können. Hierzu wurde das Projekt „Heat water storage pooling“ ins Leben gerufen, welches

zum Ziel hat einen Pooling-Ansatz für thermische Speicher zu entwickeln und als Flexibilität zu nutzen (Klima- und Energiefond 2019). Bevor jedoch Ansätze in einer Demonstration verwirklicht werden können, sind Simulationsstudien notwendig um die erforderlichen Regelalgorithmen zu entwickeln und zu testen. Daher verfolgt diese Arbeit das Ziel ein flexibles Modellierungstool zu entwickeln, um die oben genannten Algorithmen designen und evaluieren zu können.

2. MODELLIERUNGSFRAMEWORK

Ziel des objekt- und komponenten-orientierten flexiblen Modellierungstools ist ein hoher Wiederverwendungsgrad sowie eine Vereinfachung der Modellierungsarbeit im Team. Letzteres ergibt sich vor allem dadurch, dass für einen bestimmten Use Case bereits vorhandene Komponenten verwendet werden können, während zum Beispiel parallel dazu an der Verfeinerung der Komponentenmodellierung gearbeitet werden kann. Basis für das Modellierungstool ist das Python-Framework Pyomo (Bynum et al. 2021). Pyomo ist ein quelloffenes Softwarepaket zur Modellierung und Lösung von mathematischen Optimierungsproblemen, wie (gemischt-ganzzahlig) linearer oder quadratischer Optimierung (Kallrath 2013).

In den folgenden Abschnitten werden die momentan vorhandenen Komponenten vorgestellt und erklärt, wie sie zur Modellierung eines Energiesystems verwendet werden können.

2.1 BIOMASSEHEIZWERK

Das Modell des Biomasseheizwerks (BMHWs) beinhaltet die thermische Leistung $P_{th,BMHW}(t)$ und eine binäre Zustandsvariable $on_{BMHW}(t)$ als Entscheidungsvariablen im mathematischen Modell. Alle weiteren Größen werden als Parameter definiert und in den dazugehörigen Nebenbedingungen verwendet. Dazu gehören die minimale und maximale Leistung, $P_{th,BMHW}^{min}(t)$ und $P_{th,BMHW}^{max}(t)$, welche die Leistungsgrenzen definieren. Zusätzlich beschränkt ein maximaler Leistungsgradient die pro Zeiteinheit mögliche Änderung der thermischen Leistung. Das Modell des BMHW beinhaltet prozessbedingt auch minimale Lauf- und Stillstandszeiten. Im Rahmen des Modellierungstools besteht auch die Möglichkeit den Betrieb des BMHWs mit einem Rauchgaskondensator zu koppeln (siehe Abschnitt 2.1.4). Da die Zielfunktion im Modellierungstool die Kosten des abgebildeten Systems minimiert, wird vom Tool automatisch der in Gleichung (1) definierte Beitrag berücksichtigt, wobei η_{BMHW} die Effizienz des BMHWs und p_{BM} den angenommenen Preis der Biomasse darstellen.

$$\frac{P_{th,BMHW}(t)}{\eta_{BMHW}} \cdot p_{BMHW} \quad (1)$$

2.2 BOILER

Die Boiler-Komponente stellt eine simple Beschreibung eines Elektroboilers dar. Die produzierte thermische Leistung $\dot{Q}_{th,boil}(t)$ zum Zeitpunkt t wird bestimmt durch Gleichung (2).

$$\dot{Q}_{th,boil}(t) = P_{el,boil}(t) \cdot \eta_{boil} \quad (2)$$

Hier beschreibt $P_{el,boil}(t)$ die elektrische Leistung zum Zeitpunkt t , η_{boil} den Wirkungsgrad des Boilers.

2.3 ELEKTROLYSEUR

Der Elektrolyseur liefert Wasserstoff abhängig von der elektrischen Leistung $P_{el,EL}(t)$ und seinem Wirkungsgrad η_{EL} gemäß Gleichung (3)

Um diese Gleichung zu linearisieren werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Einerseits besteht die Möglichkeit für Ganzjahressimulationen den COP-Wert auf Basis der vorhandenen Temperaturzeitreihe vorab zu berechnen, oder andererseits das Kennlinienfeld aus dem Datenblatt als stückweise lineare Funktion zu hinterlegen. Dadurch können auch nichtlineare multivariate Zusammenhänge näherungsweise im Modell abgebildet werden.

2.9 SPEICHER

Aufgrund der momentan unterschiedlichen Speichertechnologien, die in Energiesystemen zur Anwendung kommen, wie etwa thermische oder elektrische Speicher sowie Wasserstoffspeicher, wurde für die Implementierung im Modellierungstool eine allgemeine Herangehensweise gewählt. Es sind obere und untere Grenzen für den maximalen und minimalen Ladezustand (SOC_{max} und SOC_{min}) sowie Limits für die Lade- und Entladeleistungen im Modell definierbar ($SOC_{max,lade}$ und $SOC_{max,entlade}$). Der Ladezustand $SOC[t]$ ergibt sich dann folgendermaßen (Gleichung (8)):

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + SOC_{lade}(t) - SOC_{entlade}(t) - SOC_{verlust}. \quad (9)$$

Hier beschreibt $SOC_{lade}(t)$ die Ladeleistung und $SOC_{entlade}(t)$ die Entladeleistung zum Zeitpunkt t . Für $t = 0$ wird ein vorher zu definierender Startwert angenommen. $SOC_{verlust}$ bezeichnet die Speicher-verluste und kann optional je nach Speichertechnologie noch extra implementiert werden.

2.10 SOLVER-KLASSE

Basierend auf den in den einzelnen Komponenten hinterlegten Betriebs- oder Investitionskosten, sowie den gesetzten Parametern wird innerhalb dieser speziellen Klasse die Zielfunktion generiert, welche als Minimierungsproblem darauf abzielt die Kosten des Systems zu minimieren. Innerhalb dieser Klasse sind auch Funktionen enthalten, welche die Optimierungsergebnisse für eine nachfolgende Auswertung speichern oder auch ausgewählte Modellvariablen oder –parameter in Bilddateien plotten können.

2.11 NEBENBEDINGUNGEN

Die oben dargestellten Komponenten, wie BMHW oder Wärmepumpe, können zwar die Basis für die zu optimierende Zielfunktion darstellen, ihr genaues Zusammenspiel ist aber dadurch noch nicht definiert. Daher müssen für einen konkreten Anwendungsfall nur noch Nebenbedingungen definiert werden, die zum Beispiel angeben, dass Wärmepumpen ihre elektrische Energie nur aus Wind- oder Photovoltaikanlagen beziehen können. Die hierfür notwendigen Erzeugungsprofile für Wind oder Photovoltaik können entweder aus Prognosen oder historischen Zeitreihen stammen und ins Modell eingelesen werden.

3. BEISPIEL

In diesem Abschnitt wird gezeigt wie mit dem beschriebenen Modellierungsframework ein beispielhaftes Energiesystem modelliert und optimiert wurde. Abb. 1 gibt einen Überblick über das betrachtete System und seine Komponenten. Es enthält eine von einem Windpark gespeiste Wärmepumpe, ein Biomassekraftwerk mit Rauchgaskondensator und einen Gaskessel, welche alle thermische Energie in einen Speicher laden können. Dieser bedient dann die Nachfrage im Fernwärmenetz.

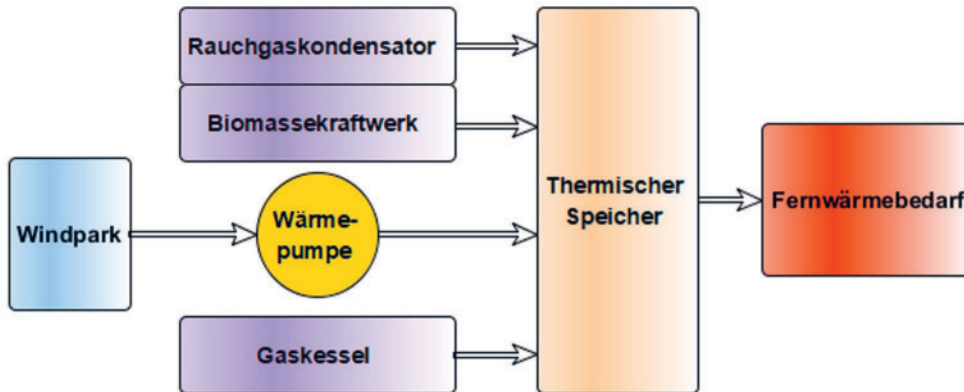


Abb. 1: Übersicht über das beispielhafte Energiesystem.

Der Windpark bzw. seine Erzeugungszeitreihe und der Fernwärmebedarf werden als fixe Zeitreihen in das Modell integriert. Um in der Zielfunktion auch Erlöse für den Verkauf von Windenergie abbilden zu können, wird ebenso eine Zeitreihe mit Preisen hinterlegt (EXAA 2021). Die weiteren Parameterwerte für die inkludierten Komponenten sind in Tab. 1 beschrieben. Das beispielhafte Energiesystem verfügt außerdem über die Besonderheit, dass es zwei verschiedene Betriebsmodi abbildet: einen Sommer- und einen Wintermodus. Im Sommermodus wird das BMHW nicht verwendet und die COP-Werte der Wärmepumpe, folglich auch ihre bereitgestellte Wärmeleistung, sind höher als im Wintermodus (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Der Grund dafür ist, dass eine Aufspaltung der linearen Näherung für den COP-Wert in Sommer- und Wintermodus eine genauere Darstellung der Abhängigkeiten für die COP-Berechnung liefert.

Tab. 1: Angenommene Parameterwerte für das beispielhafte Energiesystem.

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
$P_{max,BMHW}$	2600 kW	η_{BMHW}	0.90	η_{RG}	0.27
$P_{min,BMHW}$	520 kW	p_{BM}	4 ct/kWh	η_{GK}	0.93
p_{GK}	15 ct/kWh	$P_{max,GK}$	3900 kW	SOC_{max}	10.000 kWh
$SOC_{max,entlade}$	10.000 kWh	$SOC_{max,lade}$	10.000 kWh		

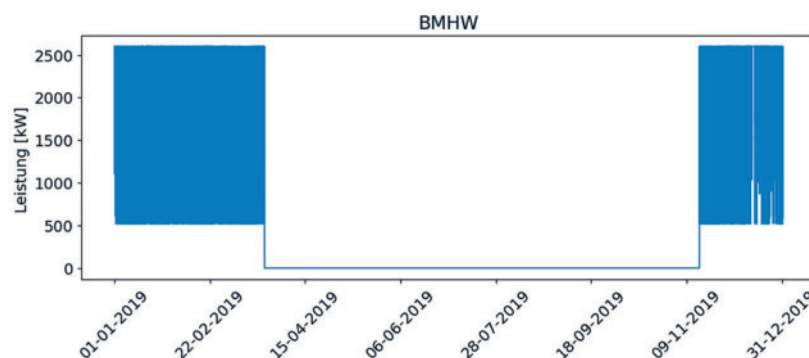


Abb. 2: Thermische Leistung des BMHWs in einem Betriebsjahr.

Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der benötigten Wärme aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann. Für den Fall, dass wenig bis keine Windkraft vorhanden und der thermische Speicher vollständig entladen ist, gibt es noch den Gaskessel als Backuplösung. Dessen Einsatz zeigt sich vor allem im Bereich der Übergangszeiten vom Winter- in den Sommermodus und umgekehrt. Dies ergibt sich beispielsweise im Herbst aus dem immer weiter ansteigenden Wärmebedarf, und der immer weiter abnehmenden Leistung der Wärmepumpen durch den geringer werdenden COP-Wert mit sinkender Quelltemperatur (hier Luft).

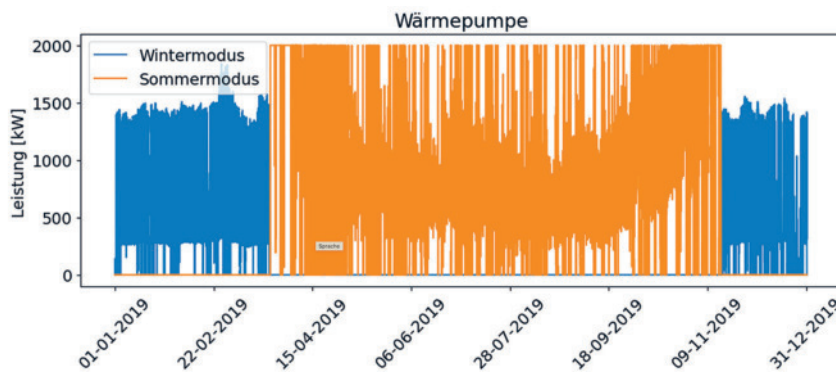


Abb. 3: Thermische Leistung der Wärmepumpe in einem Betriebsjahr.

4. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde ein modulares Modellierungsframework auf Basis eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsansatzes vorgestellt, welches vor allem auf die Einbindung von Flexibilitäten in neue und bestehende Energiesysteme abzielt. Anhand eines beispielhaften Energiesystems wurde die einfache Anwendung auf Modellfälle gezeigt und wie die Einbindung erneuerbarer Energien fossile Energieträger ersetzen kann. Ziel der weiteren Entwicklung des Modellierungsframeworks ist die Erweiterung mit zusätzlichen Komponenten und eine noch genauere Evaluierung anhand realer Betriebsdaten existierender Energiesysteme. Dadurch wird es in Zukunft möglich sein mit dem Modellierungstool abzuschätzen, welche Komponenten in Energiesysteme wirtschaftlich integriert werden können um den Anteil erneuerbarer Energien noch weiter zu steigern.

5. DANKSAGUNG

Das Projekt „Heat water storage pooling“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2018 durchgeführt.

LITERATUR

- Bynum M.L., Hackebeil G.A., Hart W.E., Laird C.D., Nicholson B., Siirola J.D., Watson J.-P., Woodruff D.L. (3. Ed.) (2021) Pyomo – Optimization Modeling in Python; USA: Springer International Publishing.
- EXAA (2021) Historische Marktdaten. Wien. [Online]. <https://www.exaa.at/marktdaten/historische-marktdaten/>. Zugegriffen am 15.06.2021.
- Kallrath J. (2. Ed.) (2013) Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. Wiesbaden, Deutschland: Springer Spektrum.

Klima- und Energiefonds (2019), Heat water storage pooling. Wien. [Online]. URL: <https://energieforschung.at/projekt/heat-water-storage-pooling/>. Zugegriffen am 10.09.2021.

KONTAKTDATEN:

Lukas Gnam
Steinamangerstraße 21
7423 Pinkafeld
Email: lukas.gnam@fh-burgenland.at