

Modellbasierte Optimierung von Energiesystemen

David Bauer¹, Stefan Kirschbaum², Gregor Wrobel³, Julian Agudelo⁴ und Philip Voll⁵

Abstract: Es wird ein Softwareframework vorgestellt, welches eine modellbasierte Simulation und Optimierung von Energieversorgungssystemen ermöglicht. Ziel der Entwicklung war es, komplexe mathematische und softwaretechnische Methoden Anwendern zugänglich zu machen, die zwar über profunde Kenntnis der inhaltlichen Fragestellungen verfügen, sich aber nicht mit den in der Software verwendeten Methoden auseinandersetzen können. Zu diesem Zweck wurde ein flexibles Softwareframework geschaffen, das die Anbindung verschiedener fachlicher Funktionen, wie Simulation, Optimierung oder Wirtschaftlichkeitsbewertung, ermöglicht und die methodische Komplexität hinter einer praxisnahen Benutzerführung und Oberfläche verbirgt. Es werden Praxisbeispiele beschrieben, die aufzeigen, dass diese Aufgabe erfolgreich gelöst werden konnte.

Keywords: Softwareframework, domänenspezifische Sprachen, Simulation, Optimierung, Energiesystemanalyse, Energieeffizienz

1 Einleitung

Die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien im Rahmen der Energiewende bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Atomenergie bis 2022 bedingt einen raschen Wandel der Energielandschaft in Deutschland. Um die ehrgeizigen Klimaziele zu erreichen, ist eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch gesteigerte Energieeffizienz unumgänglich. Immer häufiger entstehen verteilte, dezentrale Energiesysteme, um die Wärme- und Stromversorgung flexibel und damit wirtschaftlich und technisch optimal zu gestalten. Diese Systeme bergen große Optimierungspotenziale hinsichtlich ihrer Struktur und Dimensionierung.

Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Förderung von Kraft-Wärme-Kopplung hat ebenfalls zu einer höheren Preisvolatilität an den Strommärkten geführt. Hieraus resultieren hohe Einsparpotenziale, die sich durch eine optimierte und marktorientierte Betriebsweise von Energiesystemen erschließen lassen. Die vielen interagierenden Parameter, die dabei eine Rolle spielen, ergeben ein komplexes System, bei dem mathematische Optimierungsalgorithmen genutzt werden müssen.

Zur Bewertung und Simulation von industriellen Energiesystemen werden oftmals

¹ GFaI, Graphische Ingenieursysteme, Volmerstr. 3, 12489 Berlin, bauer@gfai.de

² GFaI, Graphische Ingenieursysteme, Volmerstr. 3, 12489 Berlin, kirschbaum@gfai.de

³ GFaI, Graphische Ingenieursysteme, Volmerstr. 3, 12489 Berlin, wrobel@gfai.de

⁴ GFaI, Graphische Ingenieursysteme, Volmerstr. 3, 12489 Berlin, agudelo@gfai.de

⁵ Currenta, Energy economics and energy projects, Chempark, 51368 Leverkusen, philip.voll@currenta.de

Tabellenkalkulationsprogramme eingesetzt. Diese bieten zwar eine große Flexibilität hinsichtlich der Modellierung, sind aber nicht speziell auf die Domäne der Energiesysteme zugeschnitten. Es fehlen Möglichkeiten, die Ergebnisse schematisch und transparent darzustellen. Die Modelle lassen sich meist nur von den Programmierern der Lösungen bedienen. Eine Verwendung von fachfremden Nutzern ist nahezu unmöglich. Zudem ist es schwierig, verschiedene Modelle von Energiewandlungsanlagen zu kombinieren. Zum Lösen komplexer Optimierungsprobleme werden spezialisierte Software-Tools benötigt.

Im Folgenden wird ein Simulationswerkzeug vorgestellt, welches es erlaubt, industrielle Energiesysteme in Struktur und Betrieb zu optimieren, und das gleichzeitig eine gute Bedienbarkeit bietet. Die Nutzung der Software durch mathematisch weniger geschultes Personal war bei der Entwicklung des Frameworks eine strategische Herausforderung. Anlagenfahrer können eine Betriebsoptimierung oder Energieberater eine Strukturoptimierung durchführen, ohne dass ein fachliches Verständnis der dahinter liegenden mathematischen Methoden und Modelle erforderlich ist.

2 Das Software-Framework TOP-Energy

Das Framework TOP-Energy [TE15] wurde über mehrere Jahre von der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik und vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen entwickelt. Der Lösungsansatz basiert auf folgenden Grundsätzen:

- *Modularer Softwareaufbau.* Die Software besteht aus verschiedenen Modulen zur Erfassung, Simulation, Optimierung und zum Vergleich von Energiesystemen. Durch Verwendung von domänen-spezifischen Modellierungssprachen ist der Entwicklungsaufwand für neue Module, z.B. zur Sensitivitäts- oder Pinchanalyse, gering.
- *Komponentenweise Simulationsmodelle.* Die Energiewandlungsanlagen und Stoffmodelle innerhalb der Simulationsmodule sind als Vorlagen verfasst, welche eine einheitliche Trennung zwischen Benutzereingabe, Ausgabe und dem fachlichen Modell besitzen. Durch Instanzieren der Templates (Komponenten) können die Bestandteile der Energiesystemanlagen mit Hilfe eines Flussschemaeditors zu einem Energiesystem zusammengefügt werden. Anwender können die bestehende Vorlagenbibliothek durch eigene Vorlagen erweitern und parametrisierte Komponenten speichern.
- *Ein hybrider Simulations- und Optimierungsalgorithmus.* Der zur Simulation verwendete Algorithmus kann sowohl große, algebraische Gleichungssysteme als auch gemischt ganzzahlig lineare Optimierungsprobleme und einfache Zuweisungen lösen. Die Aufteilung des Problems zwischen Simulation und Optimierung ist abhängig vom Energiesystem und der Aufgabenstellung und ergibt sich aus den Fragestellungen der Anwender.

- *Auf die Energietechnik zugeschnittene Benutzerschnittstellen.* Um eine ausgezeichnete Bedienbarkeit zu gewährleisten, sind Editoren zur Bearbeitung von energietechnischen Lastgängen und Kennlinien erforderlich. Für die übersichtliche Darstellung der Simulationsergebnisse bietet das Flussschema spezielle Ansichten, mit denen Massen-, Enthalpie und Exergieströme im Energiesystem Sankey-artig visualisiert werden können.

2.1 Grundlegende Architektur

Das TOP-Energy-Framework basiert auf dem ForGE-Framework zur Entwicklung von Applikationen für graphische Ingenieursysteme. Dieses enthält Funktionalität, um netzartig und hierarchisch strukturierte Applikationsdaten aufzunehmen und zu visualisieren. Dazu gehören auch Layout-Verfahren zum automatischen Platzieren und Routen in schematischen Darstellungen. In Forschungsprojekten wurden weitere ForGE-Applikationen entwickelt, beispielsweise zur Wissensverarbeitung im Qualitätsmanagement oder zur Simulation von Produktionsprozessen.

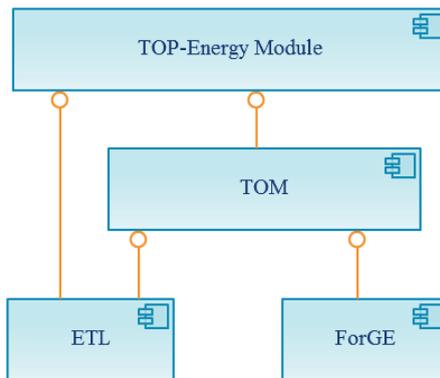


Abb. 1: Softwarekomponenten in TOP-Energy

Das ForGE-Framework wurde um die Engineering-Template-Library (ETL) ergänzt. Hierbei handelt es sich um eine Bibliothek, welche umfangreiche Berechnungen mit ingenieurtechnischen Datentypen ermöglicht. Die ETL wurde ursprünglich am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der RWTH Aachen entwickelt. Zu den wichtigsten Datentypen zählen Zahlen mit Einheit, Terme, Zeitreihen und Kennlinien.

Das Speichern der Daten erfolgt im Datenmodell des ForGE. Die dort enthaltene aber stark abstrakte Datenstruktur und die in der ETL implementierten Funktionen zur Berechnung werden vom TOP-Energy Object Model (TOM) überbrückt. Das TOM stellt gleichzeitig eine fachliche Schnittstelle für die Modulprogrammierung dar. Die Daten werden durch zusammengesetzte Datenobjekte implementiert, welche nach außen wie ETL-Datentypen erscheinen, intern aber als abstrakter Datenbaum in ForGE serialisiert

werden. Somit besteht eine Trennung zwischen dem internen Datenmodell und den fachlichen Modulen der Software durch das TOM.

Die Module werden dynamisch zur Laufzeit über die Kommandoschnittstelle des ForGE in das System integriert. Auf diese Art und Weise können Modulfunktionalitäten erweitert und modifiziert werden ohne in die Softwarebasis einzugreifen. Die zugrunde liegenden Mechanismen basieren auf entsprechenden Entwurfsmustern. Um die Modulerstellung zu beschleunigen, gibt es ähnlich wie für die Komponenten Modellierungssprachen und -editoren.

2.2 Modularer Aufbau

Standardmäßig sind folgende Module verfügbar:

- *eNtry*. Dieses Modul dient einer ersten energieorientierten Analyse eines Energiesystems und erfasst die wichtigsten Rahmendaten in einem Fragebogen. Daraus werden betriebliche Energiekennzahlen ermittelt und typischen Branchenwerten gegenüber gestellt.
- *eSim*. Hiermit lassen sich Energiesysteme unter Vorgabe von zeitlichen Lastgängen sowie von technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen simulieren. Das Simulationsmodell wird in einem Flusschemaeditor zusammengestellt, welcher gleichzeitig der übersichtlichen Präsentation der Simulationsergebnisse dient.
- *eSynthesis*. Entsprechend lassen sich mit diesem Modul Energiesysteme unter Vorgabe von Randbedingungen hinsichtlich ihrer Struktur, ihrer Dimension oder ihres Betriebs optimieren.
- *eVariant*. Das Modul sammelt bewertungsrelevante ökonomische und ökologische Größen eines Simulationsmodells und illustriert Zusammenhänge in einer Übersicht.
- *eValuate*. Zum Vergleich von verschiedenen Varianten eines Energiesystems lässt sich hiermit eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführen.

Die verschiedenen Module werden durch einen Zeitreiheneditor zum Bearbeiten von energietechnischen Lastgängen ergänzt. Dieser kann auch als eigenständige Applikation benutzt werden und ist an TOP-Energy angebunden. Der Zeitreiheneditor bietet verschiedene Verfahren zum Erzeugen, Bearbeiten, Filtern, Interpolieren und Aggregieren von Lastgängen.

2.3 Komponenten als Bausteine für Simulationsmodelle

Die Simulationsmodelle bestehen aus Komponenten, welche technische Anlagen, Stoffströme, Energiebedarfe, Tarife oder Außengrenzen eines Energiesystems

repräsentieren. Auf diese Weise kann man verschiedene Varianten eines Systems schnell erstellen und verändern.

Die Eingabe und Ausgabe von Lastgängen und Parametern erfolgt über Formulare und ist in allen Komponenten einheitlich von der Modellbeschreibung separiert.

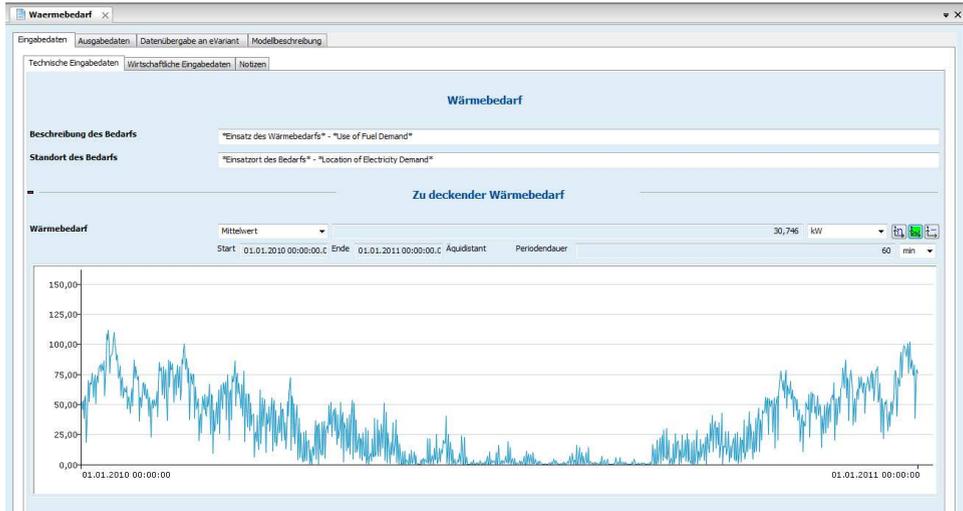


Abb. 2: Eingabeformular der Komponente „Wärmebedarf“

Die Ein- und Ausgabeformulare sind zeilenbasiert aufgebaut. Jede Zeile repräsentiert ein TOM-Datenobjekt und wird durch eine Menge von grafischen Steuerelementen realisiert. Der Aufbau der Formulare, aber auch die Sichtbarkeit von Bedienelementen in Abhängigkeit von Datenwerten, wird in einer eigenen Formularbeschreibungssprache definiert. Dabei handelt es sich um ein XML-Derivat, das zur Beschreibung von Oberflächen konzipiert wurde. Diese Beschreibung wird zur Systemlaufzeit interpretiert, und die jeweiligen Formulare generiert. Analog zur Beschreibung von Formularen gibt es die Möglichkeit, Reports durch eine eigene Beschreibungssprache zu spezifizieren. Die Verwendung von XML-Sprachen stellte sich als eine geeignete Form zur Beschreibung von Formularen und Berichten durch versierte Anwendern dar und ermöglicht neue technische Komponenten hinzuzufügen oder bestehende Komponenten nach den eigenen Anforderungen zu modifizieren und das ohne Programmierkenntnisse.

Die mathematische Beschreibung der Komponenten erfolgt mit Hilfe einer textuellen Modellierungssprache (PML - Process Modelling Language), welche an Modelica [Mo15] angelehnt ist. Benötigte Variablen müssen zunächst mit Name und Einheit deklariert und können ggf. mit Steuerelementen der Ein- und Ausgabeformulare verknüpft werden. Als Variablentypen stehen neben kontinuierlichen, binären und ganzzahligen Variablen auch Kennlinien und Listen zur Verfügung. Die physikalischen, technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge werden anschließend in Form von

Gleichungen beschrieben. So enthält die Komponente BHKW relevante technische Daten wie Nennleistung oder Wirkungsgrad und ein Modell, das die Umwandlung der chemischen Energie des Brennstoffs in thermische und elektrische Energie beschreibt.

2.4 Flussschemaeditor

Im Flussschemaeditor werden die verschiedenen Komponenten zu einem Energiesystem verknüpft, indem technische Anlagen, Tarife und externe Einflüsse durch Stoffströme miteinander verbunden werden. Das Layout der Netze erfolgt durch ein entwickeltes Routingverfahren. Hierbei handelt es sich um ein orthogonales Routing, welches für Hyperkanten eine möglichst durchgängige geradlinige Struktur berechnet.

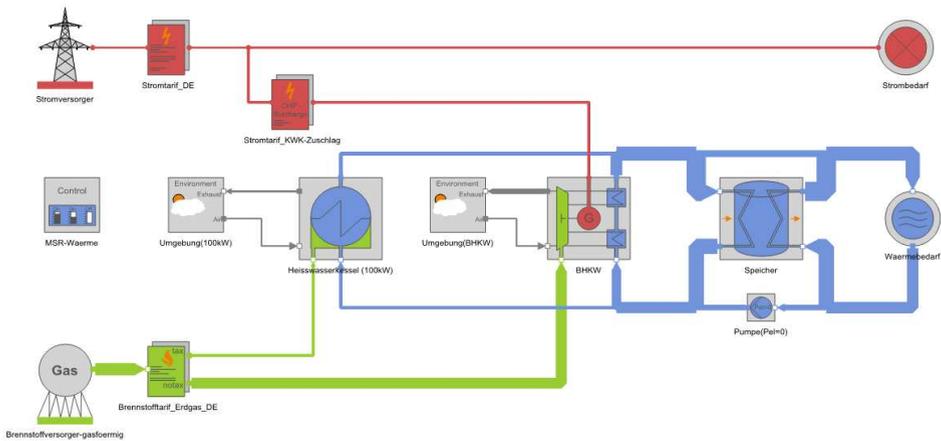


Abb. 3: Flussschema eines Energiesystems mit Busrouting

Zur Visualisierung der Ergebnisse lassen sich Massen-, Enthalpie und Exergieströme veranschaulichen, indem die Kantendicken proportional zu den jeweiligen Flussgrößen dargestellt werden.

3 Simulation und Optimierung von Energiesystemen

TOP-Energy verfügt über einen hybriden Simulations- und Optimierungsalgorithmus, der in der Lage ist, die graphisch modellierten Energiesysteme in Gleichungssysteme zu konvertieren und diese zu lösen [Au05], [Ki12]. Für jeden Zeitschritt des Betrachtungszeitraums wird ein quasistationärer Zustand des Energiesystems berechnet. Der Optimierungsanteil besteht aus einem gemischt ganzzahlig linearen Optimierungsproblem, welches in der Betriebsoptimierung für jeden Zeitschritt und in der Strukturoptimierung einmal für den gesamten Simulationszeitraum gelöst wird. Der Simulationsteil wird mit Hilfe eines modifizierten Newtonalgorithmus gelöst. Zur

Verbesserung der Konvergenz steht eine Blockzerlegung und ein symbolischer Vereinfacher zur Verfügung.

3.1 Simulationsablauf und Algorithmen

In jeder Simulation werden nacheinander die folgenden Schritte ausgeführt:

1. *Einlesen der Modellbeschreibungen.* Als Erstes werden die in PML formulierten Modellbeschreibungen geparkt und in ein großes Gleichungssystem überführt.
2. *Blockzerlegung.* Das entstandene Gleichungssystem, welches sämtliche Modellgleichungen beinhaltet, wird in einzelne Blöcke zerlegt, die sukzessive gelöst werden können. Die daraus resultierenden, kleineren Gleichungssysteme sind im Idealfall alle wohlbestimmt; das heißt die Anzahl der Ergebnisvariablen stimmt in jedem Gleichungssystem mit der Anzahl der Gleichungen überein. Es können aber auch unter- oder überbestimmte Systeme entstehen, z.B. durch fehlende bzw. redundante Eingabedaten oder verbleibende Freiheitsgrade im Energiesystem. Für die Blockzerlegung wird der graphentheoretische Algorithmus von Dulmage und Mendelsohn [DM58], [DM69] verwendet, welcher die Knoten eines bipartiten Graphen partitioniert. Dies entspricht der Zerlegung in einen wohlbestimmten, unterbestimmten und überbestimmten Anteil. Die weitere Aufteilung in kleine, wohlbestimmte Blöcke geschieht mit dem Algorithmus von Tarjan [Ta97], welcher die Adjazenzmatrix des wohlbestimmten Anteils in eine untere Dreiecksform transformiert.
3. *Symbolisches Vereinfachen.* Das numerische Lösen der kleinen Gleichungssysteme für jeden Zeitschritt ist verhältnismäßig zeitaufwendig und mit Fehlern behaftet. Da die Ergebnisse eines Gleichungssystems als Eingabeparameter für das jeweils nächste Gleichungssystem dienen, akkumulieren sich numerische Ungenauigkeiten durch Fehlerfortpflanzung. Sofern die Gleichungen sich auflösen lassen, werden daher einfache Gleichungssysteme symbolisch gelöst. Die gefundene Lösung wird als Binärcode kompiliert, um die Ausführung für jeden Zeitschritt zu beschleunigen.
4. *Lösen der Gleichungssysteme.* Das eigentliche Lösen der Gleichungen macht den Hauptteil der Simulation aus. Jeder Block wird zunächst für alle Zeitschritte berechnet, bevor das nächste Gleichungssystem bearbeitet wird. Für die symbolisch vereinfachten Systeme wird der generierte Binärcode ausgeführt. In der Regel verbleiben einige wenige Blöcke, die numerisch gelöst werden. Hier wird ein Newton-Raphson-Verfahren eingesetzt, welches frühzeitig abbricht, wenn sich die Qualität der Lösung nicht hinreichend verbessert und einen Neustart mit randomisierten Startwerten ausführt. Die Wahl sinnvoller Startwerte erweist sich als besonders schwierig. Sofern vorhanden, werden Lösungen aus früheren Zeitschritten als Startwerte verwendet. Zusätzlich gibt es einen Block, der das

lineare Optimierungsproblem beinhaltet. Zum Lösen dessen sind verschiedene Solver über eine Software-Schnittstelle angebunden.

3.2 Optimierungsproblem und Löser

Das Optimierungsproblem ist als gemischt ganzzahlig lineares Problem (GGLP oder auch MILP) formuliert, da diese Problemklasse robust lösbar ist und sich umfangreiche Modelle mit kommerziellen Lösern wie GUROBI oder CPLEX in akzeptabler Rechenzeit optimieren lassen [Sc98]. Es setzt sich aus kontinuierlichen und binären Variablen zusammen, die über lineare Gleichungen und Ungleichungen in Beziehung stehen. Während das gesamte Energiebilanzmodell durch kontinuierliche ($x \in \mathbb{R}^n$) Variablen realisiert wird, dienen die Binärvariablen ($y \in \{0, 1\}^m$) zur Beschreibung von Zustandsgrößen. Diese geben z.B. an, ob ein BHKW in Betrieb ist oder nicht. Das Teillastverhalten der technischen Anlagen wird über linearisierte Kennlinien abgebildet.

Die allgemeine Form eines GGLP lautet:

$$f(x, y) \rightarrow \min \text{ sodass } g(x, y) = 0 \text{ und } h(x, y) \leq 0 \text{ für } x \in \mathbb{R}^n, y \in \{0, 1\}^m$$

Die zu minimierende Zielfunktion $f(x, y)$ repräsentiert die Summe aller Energiekosten und –erlöse sowie etwaige Wartungs- oder Personalkosten. Zum Lösen des Optimierungsproblems stehen drei verschiedene Solver zur Verfügung, die über eine Software-Schnittstelle angebunden sind. CBC ist ein frei verfügbarer Löser aus dem COIN-OR Framework [Co15] und liefert nur für kleinere Probleme praktikable Rechenzeiten. Eine deutlich bessere Performance erzielt SCIP, der beste akademische GGLP-Löser [Ac09]. Schließlich gibt es eine Anbindung für GUROBI, einen kommerziellen, hochperformanten Löser [Gu15].

4 Praxisbeispiele

Die Funktionalität zur Struktur- und Betriebsoptimierung soll an ausgewählten Praxisbeispielen erläutert werden. Das dafür verwendete Modul eSynthesis ist im Rahmen des Forschungsprojektes „*sOptimo: Strukturoptimierung von Energieversorgungssystemen – am Beispiel von Industrieparks*“ entstanden [Vo12], [Ki13]. Das Projekt wurde im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung gefördert.

4.1 Zeitlich aufgelöste Betriebsoptimierung

Ein österreichischer Energieversorger verfügt über ein Fernwärmenetz, dessen Betriebsweise sehr viele Freiheitsgrade enthält. Es werden drei Gasmotoren mit einer elektrischen Leistung von 4,6 MW betrieben. Des Weiteren stehen drei

Heißwasserkessel und ein Wärmespeicher zur Verfügung, der es erlaubt, Erzeugung und Bedarf zeitlich zu entkoppeln. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Abwärme von einem Zementwerk zu beziehen.

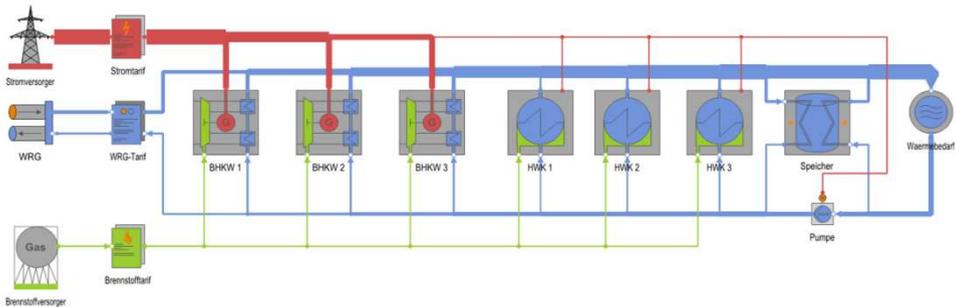


Abb. 4: Schematischer Aufbau des Fernwärmesystems

Die Auswahl der wirtschaftlichsten Fahrweise stellt eine große Herausforderung dar. Bisher wurde der tägliche Einsatzplan vom Kraftwerksmeister, basierend auf dessen Erfahrungswissen und einigen Eckdaten, am Vortag festgelegt. Aufgrund der Heterogenität des Systems und der sich schnell verändernden Marktsituation war zu erwarten, dass hier der Einsatz eines Simulationswerkzeugs zur Optimierung des täglichen Fahrplans lohnenswert ist.

Für den beschriebenen Anwendungsfall soll eine Betriebsoptimierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten entwickelt werden. Das Modell sollte einerseits komplex genug sein um alle maßgeblichen Eigenschaften des Energiesystems abzubilden, andererseits aber auch benutzerfreundlich und schnell, sodass es vom Betriebspersonal in den täglichen Arbeitsprozess integriert werden kann. Als Ergebnis soll der Anwender einen Einsatzplan der verschiedenen Wärmeerzeugungseinheiten für den folgenden Tag erhalten.

Im Optimierungsmodell werden die folgenden Betriebsparameter und Faktoren berücksichtigt:

- *Wirtschaftliche Faktoren:* Strom- und Gaspreise, Betriebskosten des BHKW, Instandhaltungs- und Wartungskosten, CO₂-Kosten, KWK-Bonus, Preise für die Wärmerückgewinnung
- *Technische Parameter:* Tagesganglinie für den Wärmebedarf in Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem Wochentag, Wirkungsgrade und Teillastverhalten der Anlagen, elektrischer Eigenverbrauch, maximale Starts pro Tag und Mindestlaufzeit der Gasmotoren, Ladezustand des Speichers

Nicht enthalten sind Investitionskosten, Kosten für das Betriebspersonal sowie sonstige Fixkosten.

Im Modell wird eine zeitliche Auflösung des Tages in 24 Stunden verwendet. Die zu minimierende Zielfunktion $f(x, y)$ repräsentiert die Summe aller Kosten und Erlöse, die bei der Bereitstellung der Wärme entstehen. Für jede Stunde des Tages setzen sich diese wie folgt zusammen:

$$C_S(x, y) + Z_B(x, y) + Z_W(x, y)$$

Dabei bezeichnet C_S die Energiekosten (für Brennstoff, Strom und Wärme aus dem Zementwerk sowie Einnahmen für die Stromeinspeisung), Z_B die Betriebskosten (wie Schmierstoffe und Harnstoff) und Z_W die Wartungskosten (aus dem Wartungsvertrag mit dem Hersteller). Die Zielfunktion entspricht der Summe der Kosten aller 24 Stunden:

$$f(x, y) = \sum_{t=1}^{24} C_S(x_t, y_t) + \sum_{t=1}^{24} Z_B(x_t, y_t) + \sum_{t=1}^{24} Z_W(x_t, y_t) \rightarrow \min$$

$$\text{so dass } g(x_t, y_t) = 0 \text{ und } h(x_t, y_t) \leq 0 \quad \forall t \in \{1, \dots, 24\}$$

Die Nebenbedingungen beinhalten Energiebilanzen und Betriebsgrenzen, die eingehalten werden müssen. Sie werden für jeden Zeitschritt des zu optimierenden Tages in das Modell aufgenommen. Einige Nebenbedingungen in dem Modell koppeln die Variablen unterschiedlicher Zeitschritte miteinander. Das betrifft zum einen den Füllstand des Wärmespeichers, der zum Anfang des einen und zum Ende des nächsten Zeitschritts gleich sein muss, und zum anderen die Restriktionen für die Starts der Motoren (maximal 2 pro Tag), die alle Zeitschritte miteinander koppeln:

$$\tilde{g}(x, y) = 0 \text{ und } \tilde{h}(x, y) \leq 0 \text{ mit } x = (x_1, \dots, x_{24}), y = (y_1, \dots, y_{24})$$

Im Optimierungslauf werden 24 Zeitschritte mit einer Schrittweite von 60 Minuten simultan berechnet. Durch die Optimierung aller Zeitschritte eines Tages in einem einzigen Gleichungssystem können zeitlich koppelnde Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Einbeziehung einer vorausschauenden Speicherbe- und -entladung und einer Reduktion der Starts durch eine prädiktive Fahrweise der Motoren macht zwar das Optimierungsproblem sehr komplex, kann aber die Energie- und Kosteneffizienz deutlich verbessern. Das endgültige Problem, welches gelöst wird, beinhaltet über 5000 Variablen und ca. 8300 Gleichungen bzw. Ungleichungen.

Zur Vereinfachung der Handhabung wurde eine Schnittstellenkomponente generiert, welche die täglich zu ändernden Ein- und Ausgabedaten auf einem Formular vereint. Dies sind der Wochentag, die mittlere Außentemperatur, der stündlich aufgelöste Strompreis an der Strombörse sowie die Verfügbarkeiten der einzelnen Anlagen an dem entsprechenden Tag.

Die Ergebnisse wurden anhand ausgewählter Betriebsdaten überprüft. Die größte Herausforderung war die richtige Einbindung des Speichers, da alleine die Festlegung der Randbedingungen zu Beginn und zum Ende des Betrachtungszeitraumes eine betriebliche Herausforderung darstellt. Das Modell läuft seit einigen Monaten absolut

stabil. Die Simulation liefert eine sehr hohe Übereinstimmung des prognostizierten mit dem tatsächlichen Wärmebedarf. Der Fehler des Tagesmittelwerts liegt für gewöhnlich unter 2 %. Ein vorsichtiger erster Vergleich der bisherigen, händischen Fahrweise mit den Einsatzplänen des Optimierungsprogrammes ergibt Kosteneinsparungen von über 10%.

4.2 Strukturoptimierung eines Industriestandorts

Ein historisch gewachsener Standort eines Pharmaunternehmens soll im Zuge der Einführung eines neuen Produktionsprozesses optimiert werden. Der Komplex besteht aus einem Haupt- (A) und einem Nebenstandort (B), die beide durch eine öffentliche Straße separiert sind. Auf Standort A sind alle Gebäude über ein zentrales Wärme- und Kältenetz miteinander verbunden. Standort B besitzt derzeit keinen Bedarf an Kälteenergie und ist daher nur mit dem Wärmenetz verbunden. Zum Betrieb des neuen Produktionsprozesses werden hier künftig 7 GWh Kälte jährlich benötigt. Insgesamt ergeben sich damit jährliche Energiebedarfe von 48 GWh für Strom, 28 GWh für Wärme und 27 GWh für Kälte.

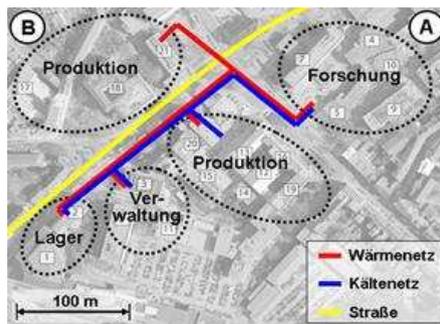


Abb. 5: Derzeitiger Gebäudeplan des Industriestandorts

Im bestehenden Komplex sind drei Kessel, ein Motorheizkraftwerk (MHKW) und drei Kompressionskältemaschinen (KKM) installiert. Als Alternativen stehen neue Kessel, MHKWs, elektrisch betriebene KKM und thermisch betriebene Adsorptionskältemaschinen (AKM) zur Verfügung. Wegen Baubeschränkungen durch die öffentliche Straße ist die nachträgliche Ankopplung von Standort B an das zentrale Kältenetz nicht möglich. Die verschiedenen Entscheidungsmöglichkeiten für oder gegen neue Anlagen werden durch zusätzliche Binärvariablen im Optimierungsmodell repräsentiert.

Ausgehend vom Ist-Fall wird die wirtschaftlich optimale Versorgungslösung gesucht, die den Kapitalwert

$$C = Z \cdot \frac{(i + 1)^T - 1}{(i + 1)^T \cdot i} - I$$

maximiert. Hierbei bezeichnet Z den Zahlungsstrom pro Periode und I die gesamten Investitionskosten. Es wird ein Zeitraum T von 10 Jahren mit einem internen Zinssatz i von 8 % betrachtet. Der Kapitalwert ist in der Regel negativ, da die Energiebezugskosten die Erlöse durch Stromeinspeisung übersteigen.

Die beste Lösung stellt einen Kompromiss zwischen Investitions- und betriebsgebundenen Kosten her und ermöglicht jährliche Energie- und Wartungskostensparnisse in Höhe von 4,73 Mio €. Der Kapitalwert ist um 39 % besser als im Ist-Fall. Es werden lediglich ein Kessel und eine Kältemaschine aus dem aktuellen Bestand behalten. Alle übrigen Anlagen werden durch neue effizientere Anlagen ersetzt.

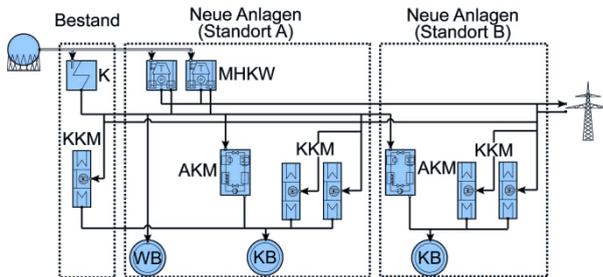


Abb. 6: Optimierte Anlagenstruktur

Die Anlagenverschaltung und –dimensionierung sind so gewählt, dass die neu installierten Anlagen fast vollständig in Teillastbereichen mit maximaler Effizienz betrieben werden.

Eine genauere Analyse des mit der Umrüstung des Standorts beauftragten Ingenieurbüros ergab, dass aus platztechnischen Gründen keine Lösung mit mehr als zwei MHKWs realisiert werden kann. Das Büro erarbeitete anhand des Vorschlags einen dreigliedrigen Umrüstungsplan, der zunächst die Anlagen zur Versorgung von Standort B installiert.

5 Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Softwareplattform zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen ermöglicht es Anwendern, komplexe Fragestellungen für Energiesysteme zu bearbeiten. Anhand von zwei Praxisbeispielen wurde nachgewiesen, dass das Framework durch Kapselung der dahinter liegenden mathematischen Modelle auch fachfremden Nutzern zugänglich ist. Um künftig mehr Flexibilität beim Erstellen der Modelle zu erreichen, soll die Bibliothek der verfügbaren Energiesystemkomponenten sukzessive erweitert werden. Für die Synthese wären beispielsweise Komponenten für Solarthermie und Dampferzeugung wichtig.

Literaturverzeichnis

- [Ac09] Achterberg, T.: SCIP: solving constraint integer programs. *Mathematical Programming Computation* Vol. 1/1, S. 1-41, 2009.
- [Au05] Augenstein, E.; Herbergs, S.; Kuperjans, I.; Lucas, K.: Simulation of industrial energy supply systems with integrated cost optimization. In (Kjelstrup, S.; Justad, J. E., Hrsg.): *Proceedings of ECOS 2005: 18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*. Trondheim, Norway, S. 627-634, 2005.
- [Co15] COIN-OR, www.coin-or.org, Stand: 30.04.2015.
- [DM58] Dulmage, A. L.; Mendelsohn, N. S.: Coverings of bipartite graphs. *Canad. J. Math* 10, S. 517-534, 1958.
- [DM69] Dulmage, A. L.; Mendelsohn, N. S.: Some Graphical Properties of Matrices with Non-Negative Entries. *Aequationes mathematicae* 2, S. 150-162, 1969.
- [EP15] European Power Exchange Marktdaten, www.epexspot.com/de/marktdaten/, Stand: 30.04.2015.
- [Gu15] Gurobi, www.gurobi.com/de, Stand: 30.04.2015.
- [Ki12] Kirschbaum, S.: *Entwicklung eines Softwarepaketes zur Simulation industrieller Produktionsprozesse unter energetischen Gesichtspunkten*. Shaker Verlag, 2012.
- [Ki13] Kirschbaum, S.; Voll, P.; Scheffler, R.; Plessow, M.; Bardow, A.: Simultaneous optimization of structure and infrastructure for distributed energy supply systems. In (Xu, J.; Jin, H.; Zhan, N., Hrsg.): *Proceedings of ECOS 2013: 26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*. Guilin, China, S. 1-10, 2013.
- [Mo15] Modelica, www.modelica.org, Stand: 30.04.2015.
- [Sc98] Schrijver, A.: *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley & Sons, 1998.
- [Ta97] Tarjan, R.: Depth first search and linear graph algorithms. *SIAM Journal on Computing* 1/2, S. 146-160, 1997.
- [TE15] TOP-Energy, www.top-energy.de, Stand: 30.04.2015.
- [Vo12] Voll, P.; Lampe, M.; Wrobel, G.; Bardow, A.: Superstructure-free synthesis and optimization of distributed industrial energy supply systems. *Energy* 45/1, S. 424-435, 2012.
- [WKP12] Wrobel, G.; Kirschbaum, S.; Pleßow, M.: *Modellgetriebene Entwicklung von Softwarelösungen für die Energietechnik*. Praxisforum Modellierung 2012, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, 2012.