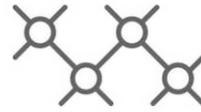




TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Institut für
Computertechnik
Institute of
Computer Technology

EINE DIPLOMARBEIT ÜBER

Entscheidungshilfe für Energiemanagement mittels Digitaler Zwillinge

ZUR ERBRINGUNG DER ANFORDERUNGEN FÜR DEN GRAD DES

Diplom-Ingenieur

in

Embedded Systems (066 504)

von

Roman Rundel

11901950

Betreuer_Innen:

Univ.Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Kaindl

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ralph Hoch BSc

Wien, Österreich

21. Februar 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

In times of global climate change and rising energy prices, energy efficiency and optimization of renewable energy use are gaining more and more importance. New laws make it possible to establish energy communities. These serve the purpose of local and optimized use of renewable energy. These energy communities open up new opportunities for optimized use of renewable energy.

This thesis proposes decision support for designing energy communities. The following research questions were asked: How can digital twins be used for decision support in energy management? What are the control parameters in an energy community that may support decision making?

To answer these questions, a concept for the integration of digital twins into the energy sector was developed. Existing simulation tools were extended, interfaces were defined and implemented. In addition, a visualization for optimized data was integrated.

The results of this thesis can assist in the design of energy communities. The concept can be used for the dimensioning of different components in an energy community. A case study was performed to evaluate the implemented concept for a concrete energy community.

Kurzfassung

In Zeiten des globalen Klimawandels und steigender Energiepreise gewinnen Energieeffizienz und die Optimierung der Nutzung erneuerbarer Energien immer mehr an Bedeutung. Neue Gesetze ermöglichen die Gründung von Energiegemeinschaften. Diese dienen dem Zweck der lokalen und optimierten Nutzung erneuerbarer Energien. Diese Energiegemeinschaften eröffnen neue Möglichkeiten für die optimierte Nutzung erneuerbarer Energien.

Diese Diplomarbeit schlägt Entscheidungshilfen für die Gestaltung von Energiegemeinschaften vor. Dazu werden die folgende Forschungsfragen gestellt: Wie können Digitale Zwillinge für eine Entscheidungshilfe im Energiemanagement eingesetzt werden? Welche Stellgrößen gibt es in einer Energiegemeinschaft, die bei Entscheidungen unterstützen können?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde ein Konzept für die Integration von Digitalen Zwillingen im Energiebereich entwickelt. Bestehende Simulationstools wurden erweitert, Schnittstellen wurden spezifiziert und implementiert. Darüber hinaus wurde eine Visualisierung für optimierte Daten integriert.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können bei der Gestaltung von Energiegemeinschaften helfen. Das Konzept kann für die Dimensionierung verschiedener Komponenten in einer Energiegemeinschaft verwendet werden. Eine Fallstudie wurde durchgeführt, um das implementierte Konzept für eine konkrete Energiegemeinschaft zu evaluieren.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Copyright Statement

I, Roman Rundel, hereby declare that this thesis is my own original work and, to the best of my knowledge and belief, it does not:

- Breach copyright or other intellectual property rights of a third party.
- Contain material previously published or written by a third party, except where this is appropriately cited through full and accurate referencing.
- Contain material which to a substantial extent has been accepted for the qualification of any other degree or diploma of a university or other institution of higher learning.
- Contain substantial portions of third party copyright material, including but not limited to charts, diagrams, graphs, photographs or maps, or in instances where it does, I have obtained permission to use such material and allow it to be made accessible worldwide via the Internet.

Signature: _____

Vienna, Austria, 21. Februar 2023

Roman Rundel

Danksagung

In dieser Danksagung möchte ich mehreren Personen und Unternehmen danken, die mich während meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Zunächst danke ich Professor Hermann Kaindl, der meine Arbeit betreut hat. Seine fachliche Kompetenz und seine Unterstützung haben es mir ermöglicht, meine Arbeit erfolgreich abzuschließen. Auch Zweitbetreuer Dr. Ralph Hoch danke ich für seine wertvollen Anregungen und Ratschläge, die dazu beigetragen haben, dass meine Arbeit inhaltlich und strukturell verbessert wurde.

Ein weiterer wichtiger Unterstützer meiner Arbeit war die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG, die es ermöglicht das Forschungsprojekt EnergyDec durchzuführen. Dieses Projekt wird zum Teil durch das KLIEN Förderprogramm „Energieforschung (e!MISSION)“ im 7. Call finanziert und durch die FFG im Projekt Nr. 888428 abgewickelt (siehe <https://projekte.ffg.at/projekt/4174815>).

Ich danke auch allen Teilnehmern des Forschungsprojekts EnergyDec, die an meiner Arbeit mitgewirkt und mich mit wertvollen Daten und Informationen versorgt haben.

Ebenso danke ich der Siemens AG Österreich, die mir die Nutzung des Simulationstools BIFROST ermöglicht hat. Im Rahmen einer Lizenzvereinbarung wird dieses Tool dem Institut für Computertechnik (ICT) der TU Wien für die Lehre und wissenschaftliche Forschung kostenlos bereitgestellt. Ebenso danke ich der Ampeers Energy GmbH, die mir die Nutzung des Business Simulation Tool (BST) ermöglicht hat.

Ich möchte mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Sie haben mich während meines Studiums ermutigt und unterstützt und haben mir auch in schwierigen Zeiten zur Seite gestanden.

Ich bin dankbar für die Hilfe und Unterstützung, die ich von allen diesen Personen und Unternehmen erhalten habe. Ihre Unterstützung hat mir geholfen, meine Arbeit erfolgreich abzuschließen und wertvolle Erfahrungen für meine zukünftige Karriere zu sammeln.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
Kurzfassung	iv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Aufbau der Diplomarbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Representational State Transfer (REST)	5
2.2 Siemens Simulationstool BIFROST	9
2.3 Ampeers Energy GmbH Business Simulation Tool (BST)	11
2.4 Digitaler Zwilling	12
3 Beispiel Energiegemeinschaft A	15
3.1 Übersicht	15
3.2 Datenerstellung durch BIFROST	16
3.3 Senden der Daten an BST	18
3.4 Erhalten der optimierten Daten	20
3.5 Visualisieren der optimierten Daten	20
4 Konzeptionelle Architektur und technische Umsetzung	23
4.1 Konzeptionelle Architektur	23
4.2 Technische Umsetzung	25
4.3 Entscheidungshilfe durch Anwendung des Konzepts	31

5	Fallstudie: Energiegemeinschaft B	33
5.1	Basiskonfiguration der Energiegemeinschaft	33
5.2	Vergleichbarkeit der Konfigurationen	42
5.3	Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung der PV-Anlagen	44
5.4	Entscheidungshilfe bei der Konfiguration der Energiegemeinschaft	46
5.5	Evaluierung des Konzepts	47
5.6	Gewonnene Erkenntnisse	47
6	Conclusio	49
6.1	Zusammenfassung	49
6.2	Fazit	50
6.3	Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	51

Tabellenverzeichnis

2.1	Prinzipien einer REST Ressource	7
2.2	REST API Methoden	8
5.1	Stromkomponenten in der Energiegemeinschaft	36
5.2	Wärme­komponenten in der Energiegemeinschaft	37
5.3	Kälte­komponenten in der Energiegemeinschaft	37
5.4	Überblick der Inputdaten für Simulationslauf im Januar	40
5.5	Überblick der Inputdaten für Simulationslauf im Juli	43
5.6	Vergleich der Netzbezüge bei unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen	45
5.7	Vergleich der Netzbezüge mit unterschiedlichen Konfigurationen	47

Abbildungsverzeichnis

2.1	Client-Server Architektur mit Request und Response	6
2.2	BIFROST Frontend Ansicht	11
2.3	Information Mirroring Model aus [1] von Grieves	13
3.1	Übersicht des Konzepts	15
3.2	Beispiel einer Energiegemeinschaft	16
3.3	Energiegemeinschaft mit zwei Häusern in BIFROST	16
3.4	Erzeugungsprofil PV-Anlage	17
3.5	Standardlastprofil Haushalt	18
3.6	Senden der erzeugten Daten	18
3.7	Erzeugungs- und Lastprofile Haus 1 und 2	19
3.8	Haus 1 Profile mit Bereichsmarkierungen	19
3.9	Haus 2 Lastprofil und Netzbezug	20
3.10	Beispieldaten des Optimierungstools	21
3.11	Vergleich der Gesamtnetzbezüge Haus 1 + 2	21
4.1	Übersicht Arbeitsschritte	24
4.2	Erstellung der Inputdaten in BIFROST	26
4.3	Ausschnitt der Time Series-Mappe des Inputfiles	28
4.4	Komponente PV-Anlage	29
4.5	Komponente Wärmepumpe	29
4.6	Netzbezug einer Woche	30
4.7	Inputdaten einer PV-Anlage	31
5.1	Übersicht der Konfiguration und Komponenten der Energiegemeinschaft von Ampeers Energy GmbH	35
5.2	Energiegemeinschaft abgebildet in BIFROST	38

5.3	Powergrid View der Energiegemeinschaft	39
5.4	Ein Tag der PV-Erzeugung von Baufeld 1	39
5.5	Inputdaten von Mieterstrom und Wärmelast BF1 für einen Tag	40
5.6	Inputdaten in „Time Series“ Mappe	41
5.7	Bezug und Einspeisung in das Netz der Energiegemeinschaft	42
5.8	Vergleich der PV-Erzeugung des Gymnasiums im Januar und im Juli	43
5.9	Vergleich Netzbezug der Energiegemeinschaften im Januar und im Juli	44
5.10	Netzbezug im Juli mit unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen	45
5.11	Ausschnitt der Basiskonfiguration	46

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In Zeiten des Klimawandels und einem Rekordniveau der Energiepreise werden neue Ansätze für die Steigerung der Effizienz im Energiebereich gesucht. Energiegemeinschaften bilden dafür eine neue Möglichkeit. Durch eine Gesetzesnovelle in Österreich dürfen Energiegemeinschaften gegründet werden. Somit werden neue Ansätze zur gebäudeübergreifenden Optimierung unter Nutzung des öffentlichen Netzes möglich.

Eine vielversprechende Möglichkeit dazu bietet die digitale Abbildung von Energiesystemen, auch bekannt als Digitaler Zwilling. In dieser Diplomarbeit wird untersucht, wie ein solcher Digitaler Zwilling im Energiemanagement einer Energiegemeinschaft eingesetzt werden kann, um eine gebäudeübergreifende Optimierung unter Nutzung des öffentlichen Netzes zu ermöglichen.

Das Projekt EnergyDec befasst sich mit Entscheidungsfindung und Optimierung für verteiltes Energiemanagement. Bisher wird auf die Optimierung des Betriebs einzelner Gebäude und die Maximierung des Eigenverbrauchs von Photovoltaik (PV)-Anlagen gesetzt. Für eine standortübergreifende Optimierung sind jedoch neue Parameter und Faktoren zu berücksichtigen.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Entscheidungsfindung bei der Konfigurierung und Dimensionierung der Komponenten in Energiegemeinschaften durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen zu unterstützen und die Flexibilitäten bzw. Stellgrößen im Energiemanagement zu erforschen. Die Ergebnisse dieser Arbeit können einen Beitrag zur Entscheidungsfindung für die Dimensionierung von Komponenten einer Energiegemeinschaft leisten.

1.2 Problemstellung

Bisher wurde die Optimierung im Bereich Energiemanagement auf einzelne Gebäude beschränkt. Es wird versucht, den eigenen Energiebedarf durch Maßnahmen wie die Installation von PV-Anlagen auf Dächern, den Einbau von Energiespeichern und die Verwendung von Lastmanagementsystemen zu decken. Es muss jedoch ein Ansatz entwickelt und implementiert werden, um die Optimierung auf mehrere Gebäude auszudehnen und eine gebäudeübergreifende Lösung zu schaffen.

Eine weitere Herausforderung besteht in der digitalen Modellierung der Gebäude. Diese digitale Modellierung ermöglicht es, verschiedene Szenarien zur Optimierung des Energieverbrauchs im Computer zu untersuchen und zu vergleichen. Ohne digitale Modellierung ist es schwierig, den Energieverbrauch von Gebäuden zu optimieren und eine effizientere und nachhaltigere Energieversorgung zu erreichen.

Für diese Arbeit war zusätzlich vorgegeben, das Simulationstool BIFROST¹ für die Datenerstellung zu verwenden. In BIFROST werden die Gebäude der Energiegemeinschaft repräsentiert und deren Daten erzeugt. Zusätzlich soll das Simulations- und Optimierungstool Business Simulation Tool (BST) von Ampeers Energy GmbH für die Optimierung verwendet werden.

1.3 Aufbau der Diplomarbeit

Nach diesem Einleitungskapitel werden im zweiten Kapitel die Grundlagen erläutert. Hier wird das technische Verständnis für das Konzept aufgebaut, indem der Representational State Transfer (REST)-Architekturstil, BIFROST und BST eingeführt werden. Abschließend wird der Begriff des Digitalen Zwillings vorgestellt.

Kapitel 3 repräsentiert ein vereinfachtes Beispiel für das implementierte Konzept der Diplomarbeit, um ein besseres Verständnis zu ermöglichen.

Kapitel 4 bietet einen Überblick über das implementierte Konzept und beschreibt die technische Umsetzung. Der Informationsfluss und die einzelnen Arbeitsschritte werden erklärt und die Schnittstellen zwischen BIFROST und BST beschrieben. Zusätzlich werden die Entscheidungshilfen, die durch das Konzept bereitgestellt werden, erörtert.

Kapitel 5 demonstriert die Anwendbarkeit des Konzepts anhand einer Fallstudie. Die Konfiguration einer Energiegemeinschaft wird spezifiziert und die Datenerstellung erklärt. Die Resultate werden dargestellt und die Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung von PV-Anlagen und der Konfiguration der Energiegemeinschaft gezeigt. Diese Fallstudie dient zur Evaluierung des Konzepts.

¹Das Tool Bifrost wurde von der Siemens AG Österreich entwickelt und kann im Rahmen einer Lizenzvereinbarung am Institut für Computertechnik (ICT) der TU Wien für die Lehre und wissenschaftliche Forschung kostenlos verwendet werden.

Kapitel 6 fasst die Diplomarbeit zusammen, bietet ein Fazit und einen Ausblick für weitere Entwicklungen des Konzepts.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen beschrieben. Sie dienen zum Verständnis der Arbeit und beinhaltet Hintergrundmaterial. Zunächst wird der REST-Architekturstil erklärt. Er dient als Grundlage des implementierten Konzepts für diese Diplomarbeit. REST wird in den Simulationstools, sowie für die Schnittstellen des Konzepts verwendet. Die Constraints des Architekturstils werden aufgezeigt und das Prinzip einer Resource in REST beschrieben. Zusätzlich werden in Unterpunkten die Begriffe RESTful Webservice und REST Application Programming Interface (API) erklärt. Danach wird das BIFROST Framework vorgestellt. Es dient als Simulationstool zur Datengenerierung und als Visualisierungsmöglichkeit. Danach wird BST beschrieben. Es ist für die gebäudeübergreifende Optimierung zuständig und bildet einen Hauptbestandteil des Konzepts. Am Ende des Kapitels wird der Begriff des Digitalen Zwillings vorgestellt.

2.1 Representational State Transfer (REST)

Zum ersten Mal wurde der Begriff REST von Thomas Fielding in seiner Dissertation beschrieben [2]. Fielding beschäftigte sich darin mit Architekturstilen und dem Design netzwerkbasierter Softwarearchitekturen im Internet. Er stellt fest, dass es etablierte Standards und Konzepte für verteilte Systeme gibt. Beispiele dafür sind unter anderem das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) als Standard und die Client-Server Architektur als Konzept. Diese wurden zusammengesetzt für eine neue Schnittstellenspezifikation. REST bezeichnet einen Architekturstil verteilter Systeme.

Des Weiteren wird der Begriff „RESTful“ verwendet. Man bezeichnet etwas als RESTful, wenn es den Beschränkungen des REST-Architekturstils unterliegt.

2.1.1 Constraints

Fielding definiert Bedingungen, sogenannte Constraints, für einen RESTful Architekturstil. Zu diesen gehören :

- Client-Server Architektur
- Zustandslose Kommunikation
- Cacheable
- Einheitliche Schnittstelle
- Mehrschichtige Systeme
- Code on Demand (optional)

Client-Server Architektur

Ein Client ist definiert als eine Maschine, die eine Ressource anfordert. Ein Server ist eine Maschine, die mit der angeforderten Ressource antwortet. Client und Server sind verbunden. Diese Verbindung ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Eine Maschine kann als Client und als Server fungieren. Für die Dauer eines HTTP-Request- und Response-Zyklus muss sie aber genau eine dieser Rollen annehmen. Beispiele für solche Maschinen wären ein Webbrowser für einen Client und eine Website für einen Server.

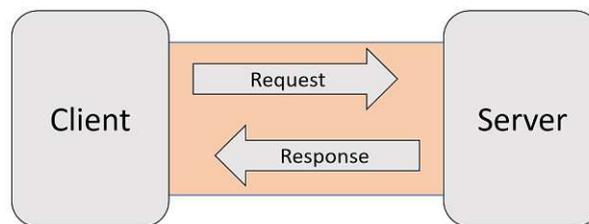


Abbildung 2.1: Client-Server Architektur mit Request und Response

Zustandslose Kommunikation

Während des Kommunikationsprozesses ist eine RESTful Architektur nicht berechtigt Informationen über den Zustand einer anderen Maschine zwischenspeichern. Jede Anfrage von einem Client an einen Server muss so behandelt werden, als ob es die erste Anfrage an den Server wäre.

Im Gegensatz dazu gibt es zustandsbehaftete Architekturen. Diese erinnern sich an die Aktivität des Clients zwischen Anfragen. Dies ist aber nicht im Sinne des REST-Architekturstils.

Cacheable

Response Nachrichten vom Server an den Client werden ausdrücklich als cacheable oder non-cacheable bezeichnet. Auf diese Weise können Antworten vom Client zwischengespeichert werden. Dies ist hilf-

reich wenn sich die Informationen auf dem Server seit der letzten Anfrage nicht geändert haben.

Einheitliche Schnittstelle

Eine RESTful Architektur muss eine einheitliche Schnittstelle zwischen allen Clients und dem Server haben. Jede Maschine die versucht auf Informationen zuzugreifen, muss den gleichen Zugang erhalten.

Mehrschichtige Systeme

REST erlaubt ein Schichtensystem. Ein Client kann normalerweise nicht erkennen, ob er direkt mit dem Endserver oder einem Vermittler verbunden ist.

Code on Demand

Code on Demand ist optional für eine RESTful Anwendung. Es ermöglicht Code vom Server an den Client zu verschicken.

2.1.2 Ressourcen

Eine Ressource ist die Abstraktion von Informationen in REST [3]. Sie gehört zu den wesentlichen Prinzipien des REST-Architekturstils. Jede Information, die benannt und adressierbar ist, kann eine Ressource sein. Beispiele für eine REST-Ressource sind Dokumente, Bilder, ein Dienst, oder eine Sammlung anderer Ressourcen [4].

Tabelle 2.1 zeigt die festgelegten Richtlinien für eine Ressource im REST- Architekturstil [5].

Tabelle 2.1: Prinzipien einer REST Ressource

Prinzip	Beschreibung
Adressierbarkeit	Jede Ressource wird durch einen eindeutigen Uniform Resource Identifier (URI) identifiziert.
Entkopplung von Ressourcen und Repräsentation	Es können verschiedene Repräsentationen einer Ressource existieren. Eine Ressource kann beispielsweise als Extensible Markup Language (XML)- oder JavaScript Object Notation (JSON)-Format angefordert werden.
Zustandslosigkeit	Jede Ressource untersteht der Einschränkung der zustandslosen Kommunikation, wie bereits in 2.1.1 beschrieben.
Vereinheitlichte Schnittstelle	Jede Ressource untersteht auch der Einschränkung der einheitlichen Schnittstelle. Bei REST wird über Standardmethoden auf eine Ressource zugegriffen. Die HTTP-Standardmethoden sind GET, POST, PUT und DELETE.

2.1.3 RESTful Webservice

Ein Webservice ist ein Softwaresystem, das entwickelt wurde um eine interoperable Maschine-zu-Maschine Interaktion über ein Netzwerk zu unterstützen [6]. Ein Webservice stellt einen bestimmten Dienst im Internet anderen Anwendungen zur Verfügung.

Ein RESTful Webservice unterliegt dem REST- Architekturstil. Besonders bei einem RESTful Webservice ist, dass bei einem Request nur der Ort, an dem der Dienst zur Verfügung steht angegeben wird. Dieser Ort wird beim HTTP-Protokoll mittels einer Uniform Resource Locator (URL) angegeben. Eine URL ist eine Bezeichnung, welche die Ressource identifiziert.

2.1.4 REST API

Eine API ist allgemein eine Programmierschnittstelle. Sie ist eine Möglichkeit, dass zwei oder mehrere Computerprogramme miteinander kommunizieren können. Der standardisierte Austausch ist dabei essentiell. Die Übergabe von Daten und Befehlen erfolgt strukturiert nach einer zuvor definierten Syntax [7].

Eine REST API unterliegt dem REST- Architekturstil. Sie ist eine Programmierschnittstelle, die HTTP-Anfragen nutzt. Mit den Methoden GET, PUT, POST und DELETE wird auf Ressourcen zugegriffen. In Tabelle 2.2 werden die Funktionen der Methoden beschrieben.

Tabelle 2.2: REST API Methoden

Methode	Beschreibung
GET	ruft eine Ressource ab um sie zu lesen.
PUT	ändert den Zustand einer Ressource oder aktualisiert sie.
POST	erstellt eine Ressource.
DELETE	entfernt eine Ressource.

Das Simulationstool BIFROST verwendet eine REST API. Über diese können zum Beispiel alle Simulationseinstellungen getroffen werden.

2.1.5 Vorteile von REST

Durch REST wurde eine Methode entwickelt, mit der man einfach auf Ressourcen im Internet zugreifen kann. Zu den Vorteilen der Verwendung von REST gehören:

- Bekanntheit und Popularität
- Sprachunabhängigkeit

- Verwendung etablierter Standards (HTTP-Methoden)
- Ressourcenbasierter Ansatz

Für diese Arbeit war es sinnvoll auf einen REST-Architekturstil zu setzen, da das Simulationsframework BIFROST auf REST setzt.

2.2 Siemens Simulationstool BIFROST

BIFROST ist ein Framework zur Modellierung und Simulation smarter Energiesysteme [8]. Der Fokus liegt auf dem Stromnetz. Es können zum Beispiel Lastflussberechnungen innerhalb einer Siedlung oder die Stromerzeugung von Solarpanelen bei unterschiedlichen Wetterlagen berechnet werden. Die Simulation von „Microgrids“ und Energiegemeinschaften ist somit möglich. Das Framework besteht aus einer Webschnittstelle und einem Simulationsteil.

Die Webschnittstelle ist eine browserbasierte Benutzeroberfläche, die zum Bau von Siedlungen („settlements“) dient. Sie bietet eine Vielzahl von Strukturelementen wie Wohn- und Industriegebäuden und Komponenten des Stromnetzlayouts. Durch den Simulationsteil werden die erstellten Konfigurationen zeitlich durchlaufen. Die Ergebnisse der Simulation werden dann wieder in der Benutzeroberfläche veranschaulicht. Hauptkomponente von BIFROST ist der sogenannte „state“. Er ist die zentrale Datenstruktur und beinhaltet alle Informationen über eine Siedlung. Der „state“ wird als ein JSON-Objekt dargestellt.

Grundsätzlich wird bei BIFROST der „state“ manipuliert. Dies geschieht durch sogenannte „actions“. Diese können auf verschiedene Arten ausgelöst werden, einerseits durch Veränderung der Siedlung direkt in der Benutzeroberfläche, zum Beispiel durch Hinzufügen eines neuen Gebäudes oder einer neuen Stromleitung. Andererseits kann sich externe Software mit BIFROST verbinden und so den „state“ manipulieren. Dazu gibt es eine REST-Schnittstelle. Die Simulation selbst verändert auch den „state“, da die Dynamikdaten („dynamics“) sich stetig verändern. Dynamikdaten sind physikalische Größen wie Leistung und Spannung, die mit einem Strukturelement, etwa einem Gebäude, verbunden sind.

2.2.1 Backend

BIFROST besteht aus vier Architekturkomponenten:

- Engine
- Simulation control
- Server
- Benutzeroberfläche

Jede Komponente dient dazu den „state“ zu manipulieren. Die „Engine“ managt die „state“-Updates. Die „Simulation control“ verwaltet den Zeitverlauf und den Aufruf externer Komponenten. Der „Server“ stellt den „state“ über REST- und WebSocket-Schnittstellen zur Verfügung. Die Benutzeroberfläche bietet die Möglichkeit den „state“ händisch über einen Webbrowser zu manipulieren.

Modularer Aufbau

BIFROST ist in Module aufgeteilt. Ein Modul ist eine externe Serverkomponente, die bei der BIFROST-Simulationsschleife registriert ist. Abhängig von ihrer eingestellten Abtastrate werden die Module zu geeigneten Zeiten aufgerufen. Module können Dynamikdaten abonnieren („subscribe“). Diese Daten werden verarbeitet und schließlich im „state“ aktualisiert. Es können auch eigene Module erstellt und in die Simulationsschleife integriert werden.

Zu den Grundmodulen für eine Stromnetzsimulation gehören:

- das „Weathergenerator“-Modul,
- das „BuildingModel“-Modul und
- das „Fenrir“-Modul.

Im „Weathergenerator“-Modul wird das Wetter der Siedlung generiert. Dazu gehören Dynamikdaten wie Niederschlag, Wolkenbedeckung, Windgeschwindigkeit und Sonnenstand. Diese Daten beeinflussen die Stromerzeugung bei Gebäuden mit Solarpanelen. Im „Buildingmodel“-Modul werden die Verbrauchsprofile der jeweiligen Gebäude verwaltet. Hier können auch eigene Profile hinzugefügt werden. Im „Fenrir“-Modul wird der Lastfluss berechnet.

2.2.2 Frontend

Die Benutzeroberfläche bietet eine 2,5D-Ansicht. Abbildung 2.2 illustriert das Frontend. Auf der rechten Seite befinden sich verschiedene Reiter. Im „Build“-Reiter können die Strukturelemente ausgewählt und in die Siedlung hineingezogen werden. Er dient zum Erstellen der Siedlungen. Im „Info“-Reiter werden die Dynamikdaten eines ausgewählten Strukturelements angezeigt. Hier werden zum Beispiel die Verbrauchsprofile eines Gebäudes veranschaulicht. Im „Module“-Reiter werden die Module verwaltet. Hier können einzelne Module zu- und weggeschaltet werden. Externe Module werden hier auch angezeigt. Zusätzlich befinden sich dort weitere Reiter, wie Einstellungen, Hilfe, Favoriten, Siedlungsbeschreibung und Skripte. Im unteren Bereich befindet sich die Simulationsleiste. Dort wird die Simulationszeit eingestellt. Außerdem wird die Simulation dort auch gestartet, wenn nötig wiederholt abgespielt oder zurückgesetzt.

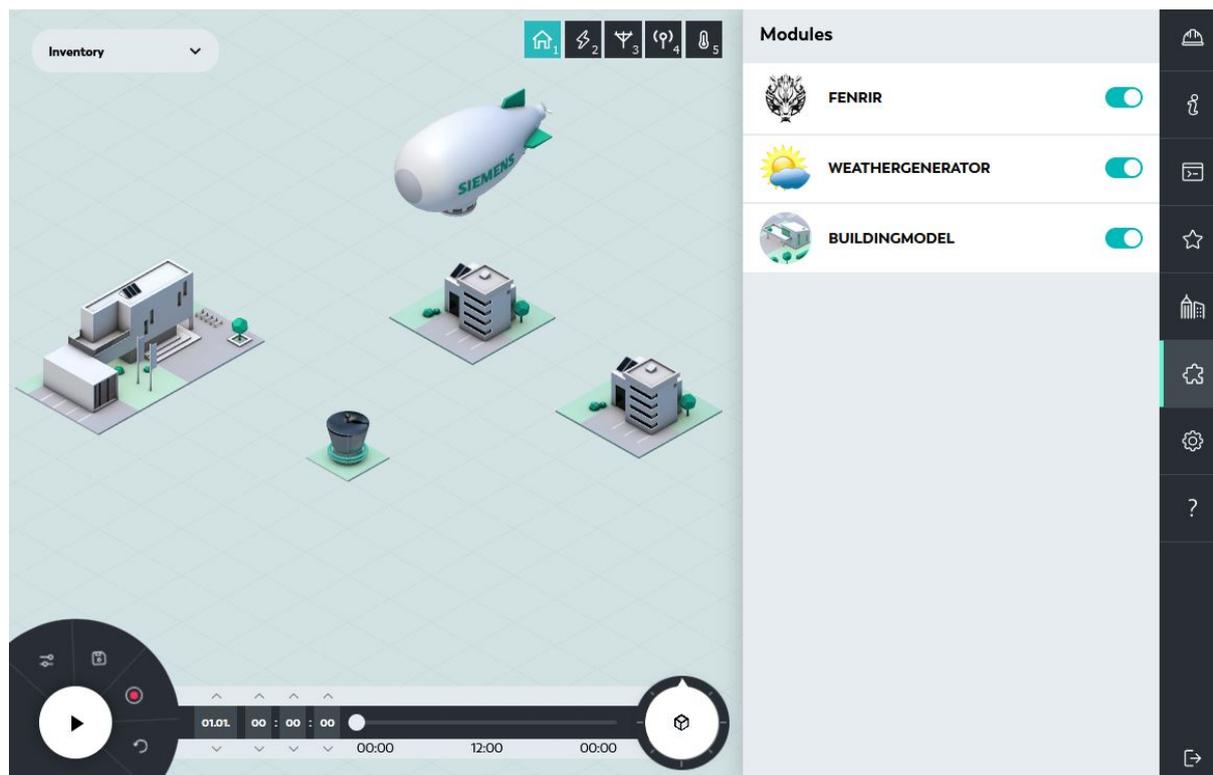


Abbildung 2.2: BIFROST Frontend Ansicht

2.3 Ampeers Energy GmbH Business Simulation Tool (BST)

BST von Ampeers Energy GmbH führt eine Simulation mit Optimierung basierend auf Zeitreihendaten aus. Zu den Zeitreihendaten gehören die Erzeugungsdaten einer PV-Anlage, die Wärme- und Kältebelastung der Gebäude und der allgemeine elektrische Verbrauch. BST arbeitet mit fixen, statischen Zeitreihen und bietet nicht selbst die Möglichkeit dynamische Daten zu simulieren. Diese Daten basieren entweder auf historischen Daten oder auf Standardlastprofilen.

Die Simulation von BST bietet die Möglichkeit gebäudeübergreifend zu optimieren. Ziel ist eine Betriebskostenoptimierung. Eine Eigenverbrauchsoptimierung auf Basis der Kosten wird angestrebt.

Angesteuert wird BST über eine REST-Schnittstelle. Über einen Webservice wird die Simulation mit Optimierung gestartet. Die Basis für den Optimierer ist ein Excelfile. Darin befinden sich die Simulationsparameter, die Zeitreihendaten und sonstigen Variablen sowie Fixwerte für die Simulation. Dieses Inputfile wird an den Webservice gesendet. Das Tool optimiert die flexiblen Anlagen der Energiegemeinschaft, wie Wärmepumpe, Kältemaschine sowie Pufferspeicher. Als Ergebnisse werden optimierte Daten als Zeitreihen zurückgesendet. Die Schnittstelle, das Inputfile und die Ergebnisse als Zeitreihen werden in Kapitel 4 genauer beschrieben.

2.4 Digitaler Zwilling

In der heutigen digitalen Welt haben Unternehmen und Organisationen eine immer größere Nachfrage nach Lösungen, die ihnen dabei helfen, ihre Prozesse und Systeme zu optimieren und zu verbessern. Eine dieser Lösungen ermöglicht der Digitale Zwilling.

Das Konzept des Digitalen Zwillings hat in den letzten Jahren an Popularität gewonnen und wird in vielen Branchen und Anwendungsbereichen eingesetzt. Digitale Zwillinge werden in Bereichen wie Fertigung, Energie, Gesundheitswesen und Verkehr eingesetzt [9]. Trotz des wachsenden Interesses an Digitalen Zwillingen gibt es jedoch noch offene Fragen und Unklarheiten zur Definition des Digitalen Zwillings.

Dieses Kapitel soll einen Überblick über das Konzept des Digitalen Zwillings geben und verschiedene Definitionen und Ansichten zu diesem Thema zusammenfassen und vergleichen. Danach wird eine Definition eines Digitalen Zwillings für diese Diplomarbeit gewählt. Abschließend wird der Kontext für Digitale Zwillinge in dieser Diplomarbeit beschrieben.

Herkunft

Ursprünglich wird der Begriff des Digitalen Zwillings von Michael Grieves geprägt. Das Konzept stammt aus dem 2005 veröffentlichtem Artikel „Product Lifecycle Management“ von Grieves [1]. Das Konzept des Digitalen Zwillings basiert auf drei Teilen. Es gibt den realen Raum, den virtuellen Raum und die Verbindung für Daten und Informationen, die das reale mit dem virtuellen Produkt verknüpft. Die Idee besteht darin, digitale Informationen über ein physisches System als eigenständige Einheit zu betrachten. Die digitalen Informationen, also der Zwilling, soll im physischen System eingebettet sein. Diese Verbindung soll über den ganzen Lebenszyklus hindurch bestehen [10]. Die Entstehung dieses Konzepts ist eng mit der industriellen Fertigung verbunden, deshalb wird auch der Begriff eines Produkts verwendet. Heutzutage sind Digitale Zwillinge, im Zusammenhang mit Digitalisierung und immer größeren verfügbaren Datenmengen auch in anderen Bereichen zu finden.

Ursprünglich wurde das Konstrukt noch als „Information Mirroring Model“ bezeichnet und ist in Abbildung 2.3 veranschaulicht. Es gibt ein reales Objekt und ein oder mehrere virtuelle Objekte. Dazu kommen die Verbindungen für die Informationen und Daten.

Das Konstrukt ist aus drei Teilen aufgebaut, die heutzutage auch in den Definitionen der Digitalen Zwillingen zu finden sind. Zu den drei Teilen gehören:

- ein realer Raum (Real Space)
- ein virtueller Raum (Virtual Space) mit mehreren virtuellen Unterräumen (VS1, VS2, ..., VS_n)

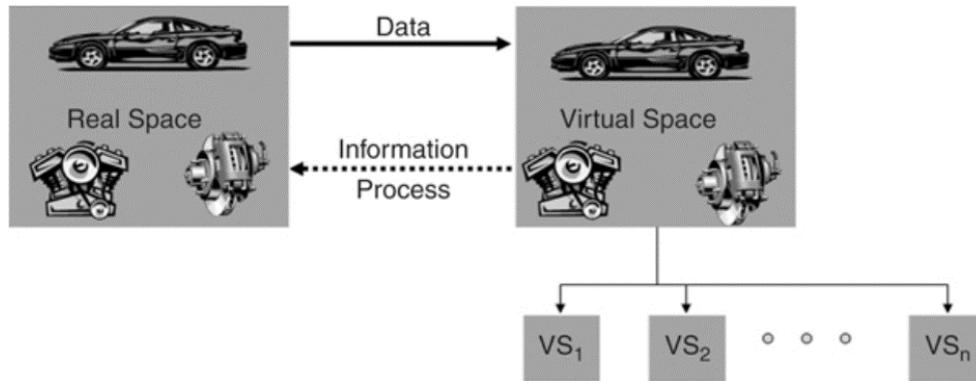


Abbildung 2.3: Information Mirroring Model aus [1] von Grieves

- eine Verbindung für Informationen von Real zu Virtuell (Information Process) und für Daten von Virtuell zu Real (Data)

Definitionen

Es gibt unterschiedliche Definitionen eines Digitalen Zwillings. Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) versteht unter dem Begriff ein Konzept, mit dem Produkte sowie Maschinen und ihre Komponenten mit Hilfe digitaler Werkzeuge modelliert werden, und zwar einschließlich sämtlicher Geometrie-, Kinematik- und Logikdaten. Ein Digitaler Zwilling ist das Abbild des physischen „Assets“ in der realen Fabrik und erlaubt dessen Simulation, Steuerung und Verbesserung [11].

Im Glossar von Siemens Digital Industries Software ist ein Digitaler Zwilling eine virtuelle Darstellung eines physischen Produkts oder Prozesses, der verwendet wird, um die Leistungsmerkmale des physischen Pendants vorherzusagen. Digitale Zwillinge werden während des gesamten Produktlebenszyklus zum Simulieren, Prognostizieren und Optimieren des Produkts und Produktionssystems verwendet, bevor in physische Prototypen und Ressourcen investiert wird [12].

Thomas Kuhn definiert Digitale Zwillinge als digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mithilfe einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den Digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird [13].

Beim Vergleich dieser Definitionen fällt auf, dass der Fokus auf Produkten und deren Lebenszyklus liegt. Allerdings kann der Digitale Zwilling bei der zweiten Definition auch einen Prozess beschreiben. Der Digitale Zwilling kann auch verwendet werden um Vorhersagen zu treffen.

Die dritte Definition erlaubt sogar eine Interpretation von Digitalen Zwillingen als Repräsentanzen von nicht-physischen Dingen und nicht nur von Produkten. Sie lässt somit mehr Spielraum für

Interpretationen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Definitionen des Digitalen Zwillings die Idee eines virtuellen Modells eines realen Systems oder Prozesses beinhalten. Dieses Modell wird verwendet, um das reale System zu überwachen, steuern und zu optimieren. Der Begriff ist vor allem in der industriellen Fertigung gebräuchlich.

Anzumerken ist noch, dass solche Konzepte auch ohne die Bezeichnung Digitaler Zwilling erarbeitet und veröffentlicht worden sind, siehe etwa [14]. In diesem Artikel wird ein Ansatz präsentiert, bei dem ein automation agent auch eine explizite Darstellung von sich selbst und seiner Relationen zur Umgebung als Modell beinhaltet.

Kontext für diese Diplomarbeit

In dieser Diplomarbeit wird das Konzept eines Digitalen Zwillings entwickelt und implementiert. Die Kombination von BIFROST und BST bildet dabei die Grundlage. Durch das implementierte Konzept kann eine Energiegemeinschaft digital abgebildet werden.

Die Daten für den Digitalen Zwilling werden entweder in BIFROST generiert oder aus Standardlastprofilen ausgelesen. Durch BST werden diese Daten optimiert und können anschließend durch die Visualisierung in BIFROST analysiert und interpretiert werden. Somit wird durch den Digitalen Zwilling die Energiegemeinschaft simuliert und der Betrieb optimiert. Durch eine Analyse solch optimierter Daten kann das implementierte Konzept bei einer Entscheidungsfindung helfen.

Kapitel 3

Beispiel Energiegemeinschaft A

Dieses Kapitel stellt das implementierte Konzept anhand eines einfachen Beispiels vor. Zusätzlich werden die wichtigsten Begriffe für das Verständnis der Arbeit aufgezeigt. Ziel ist es Daten, wie Stromerzeugung und -verbrauch, einer Energiegemeinschaft an BST zu schicken. Es hat die Möglichkeit gebäudeübergreifend zu optimieren. Die optimierten Daten sollen abschließend visualisiert werden. Abbildung 3.1 zeigt das Konzept in seinen Einzelteilen.

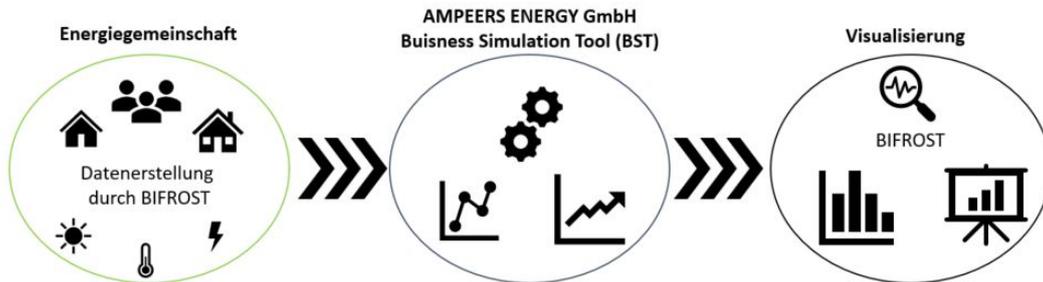


Abbildung 3.1: Übersicht des Konzepts

Das Energiemanagement der Gebäude soll möglichst kostenoptimiert agieren und die erneuerbaren Energie dort nutzen, wo sie erzeugt wird und wenn sie verfügbar ist. Der Energiebedarf soll bestmöglichst selbst gedeckt werden.

3.1 Übersicht

Für dieses Beispiel wird eine einfache Energiegemeinschaft mit nur zwei Gebäuden betrachtet. Nur ein Gebäude hat eine PV-Anlage und teilt durch die Energiegemeinschaft seinen eventuell vorhandenen PV-Erzeugungsüberschuss. Die Gebäude haben den alltäglichen elektrischen Verbrauch durch Heizen, Kochen, Waschen, Beleuchtung usw. Heizen wird in diesem Beispiel nicht getrennt betrachtet. Durch die Energiegemeinschaft soll ein Zusammenschluss zur gemeinsamen Produktion und Verwertung der

Energie geschaffen werden. Abbildung 3.2 zeigt die Energiegemeinschaft abstrakt. Haus 1 ist das Gebäude mit der PV-Anlage. Haus 2 ist das andere Gebäude der Energiegemeinschaft. Die Häuser sind mit dem öffentlichen Netz verbunden.

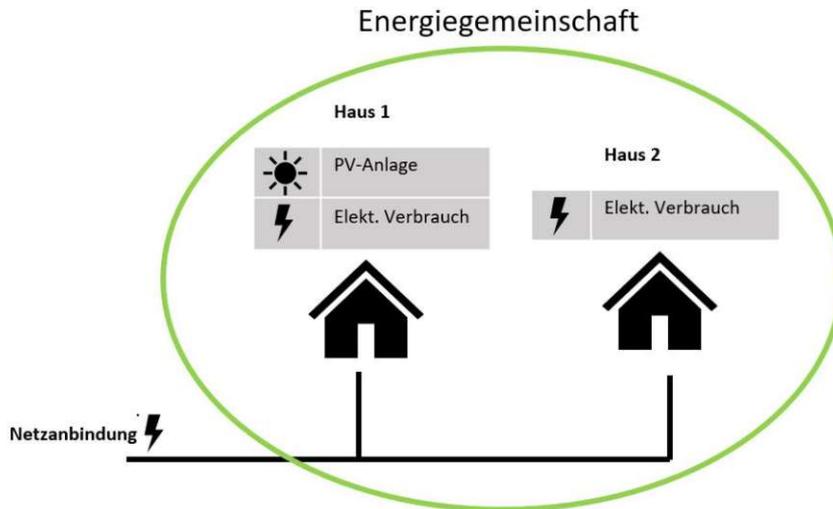


Abbildung 3.2: Beispiel einer Energiegemeinschaft

3.2 Datenerstellung durch BIFROST

Diese Energiegemeinschaft wird im Simulationstool BIFROST abgebildet. Die jeweiligen Komponenten, wie PV-Anlage und elektrische Verbraucher werden hinzugefügt. Aus dem Simulationslauf können dann die benötigten Daten generiert werden.

Abbildung 3.3 zeigt diese Energiegemeinschaft mit zwei Häusern im Simulationstool BIFROST. Links und rechts im Bild sind die Häuser zu sehen. In der Mitte des Bildes ist ein „Transformator“, der die Netzanbindung darstellt. Verbunden sind diese Elemente unterirdisch. Die Verbindungen sind in dieser Abbildung nicht zu sehen.

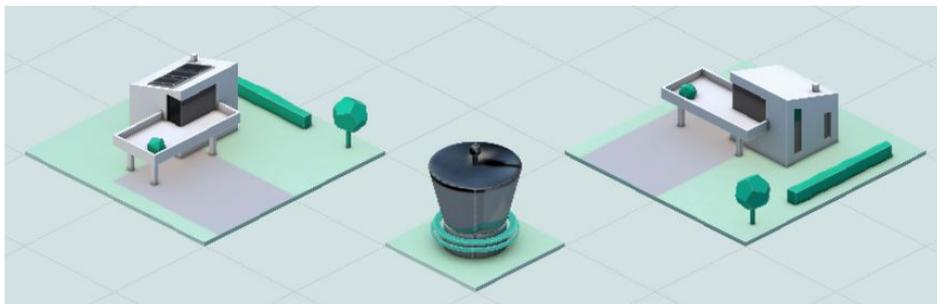
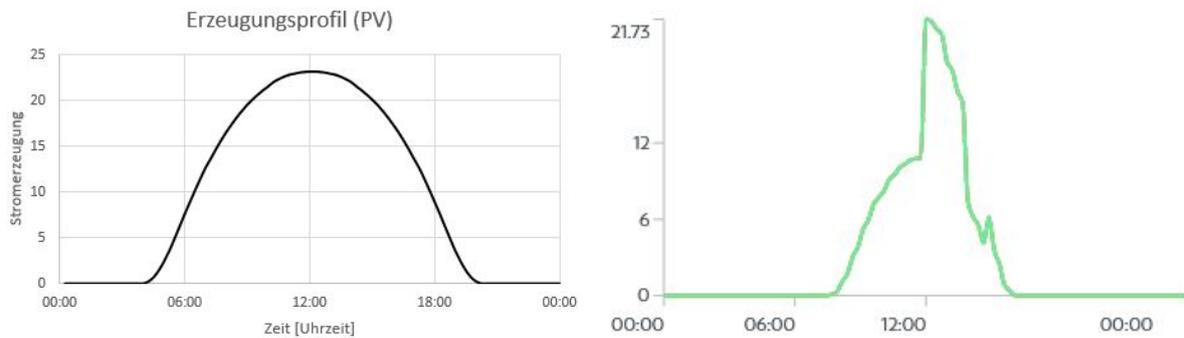


Abbildung 3.3: Energiegemeinschaft mit zwei Häusern in BIFROST

Die Daten, die zu BST gesendet werden, sind Verteilungen mit Zeitschritten, sogenannte Profile. Die

PV-Anlage hat zum Beispiel ein Erzeugungsprofil für den Strom, den sie in die Energiegemeinschaft bereitstellt bzw. ins Netz einspeisen könnte. Die Stromerzeugung zu jedem Zeitschritt, zum Beispiel alle 15 Minuten, werden über die Simulationsdauer gesammelt. Diese gesammelten Daten werden Zeitreihen genannt. Zeitreihen können gut visualisiert werden. Abbildung 3.4.(a) zeigt ein ideales Erzeugungsprofil einer PV-Anlage für einen Tag.



(a) ideales Erzeugungsprofil einer PV-Anlage

(b) Erzeugungsprofil aus BIFROST

Abbildung 3.4: Erzeugungsprofil PV-Anlage

Auf der x-Achse sind die Zeitschritte über einen Tag. In dieser Abbildung werden die Zeitschritte als Uhrzeit aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Stromerzeugung in Kilowatt. Die Werte für die Stromerzeugung sind willkürlich gewählt und dienen in diesem Beispiel nur zur Anschauung des Konzepts. Die Spitze zu Mittag ist gut erkennbar. Die PV-Anlage liefert in der Nacht keinen Strom. Die abgebildete Kurve ist ideal. Die Stromerzeugung einer realen PV-Anlage hängt von vielen Faktoren, wie Sonnenstand und Wolkendichte, ab. Diese Faktoren werden vom Simulationstool BIFROST berücksichtigt. Abbildung 3.4.(b) zeigt ein generiertes Erzeugungsprofil einer PV-Anlage. Dieses Profil hat Spitzen und einen unterschiedlich starken Verlauf der erzeugten Energie.

Der elektrische Verbrauch wird in einem Lastprofil angegeben. Ein Lastprofil zeigt die Verteilung des Verbrauchs über eine Zeitspanne an. Abbildung 3.5 zeigt ein Lastprofil des Stromverbrauchs eines Gebäudes. Die x-Achse ist wieder die Zeit über einen Tag und an der y-Achse ist der elektrische Verbrauch zu sehen. Die Last in der Nacht ist in diesem Beispiel am niedrigsten, dafür in der Früh und am Abend hoch.

Abbildung 3.5 zeigt ein Standardlastprofil des elektrischen Verbrauchs eines Einfamilienhaushalts. Als Standardlastprofil wird ein Lastprofil bezeichnet, das repräsentativ für eine Gruppe, wie zum Beispiel Haushalte, den durchschnittlichen Verbrauch über die Zeit anzeigt. Standardlastprofile werden oft für Gebäudesimulationen hergenommen. Ein reales Lastprofil ist immer individuell und verändert sich ständig. Die Werte des Stromverbrauchs wurden in dieser Abbildung wieder willkürlich gewählt. Die Anordnung der Gebäude, ihre Verbindungen und Ausstattung an Energieerzeuger und -verbraucher



Abbildung 3.5: Standardlastprofil Haushalt

wird als Konfiguration bezeichnet.

3.3 Senden der Daten an BST

Die Energiegemeinschaft wird modelliert und simuliert. In einer Simulation in BIFROST werden die Erzeugungs- und Lastprofile als Zeitreihen erstellt. Diese werden an das BST gesendet. Abbildung 3.6 zeigt diesen Arbeitsschritt.

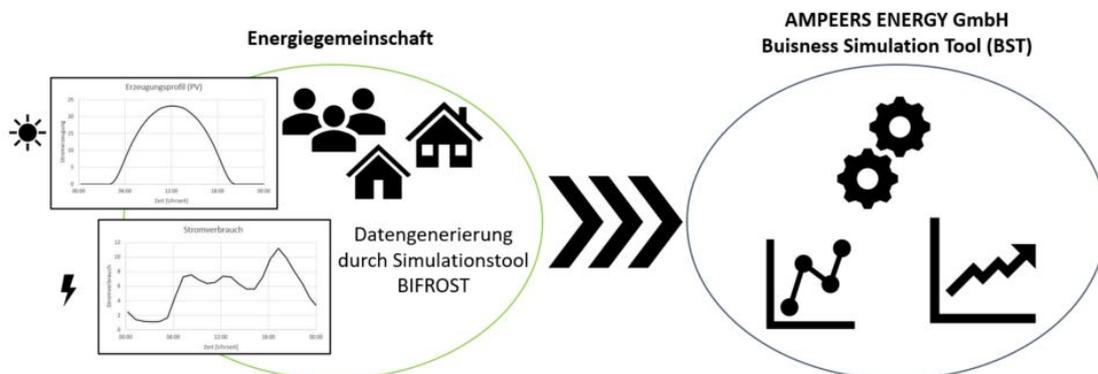


Abbildung 3.6: Senden der erzeugten Daten

Zu den Daten gehören das PV-Erzeugungsprofil und die Lastprofile der elektrischen Verbraucher. Diese Daten werden anschließend an BST von Ampeers Energy GmbH gesendet und für eine kosten-effiziente Nutzung der Energie in der Energiegemeinschaft optimiert.

Für dieses Beispiel wird angenommen, dass beide Häuser der Energiegemeinschaft den gleichen elektrischen Verbrauch haben. Nur das Haus 1 hat eine PV-Anlage. In Abbildung 3.7(a) sind die Profile des ersten Hauses übereinander gelegt.

Der Überschuss in der Mittagszeit ist zu erkennen. Es wird mehr Strom erzeugt als verbraucht. In Abbildung 3.7(b) ist das Lastprofil des zweiten Hauses zu sehen. Diese Last muss ohne Energiegemein-

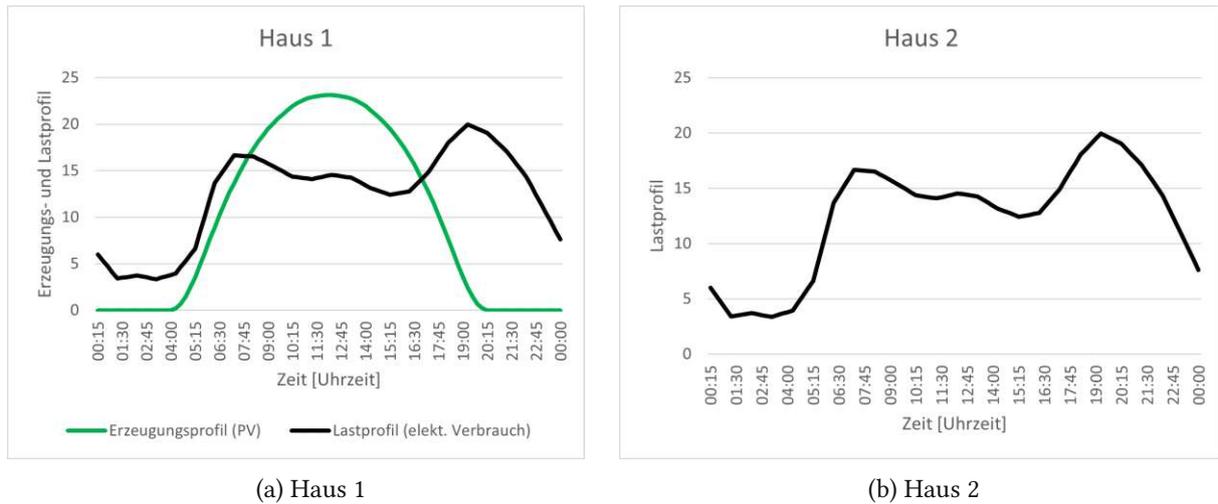


Abbildung 3.7: Erzeugungs- und Lastprofile Haus 1 und 2

schaft komplett vom Netz bezogen werden.

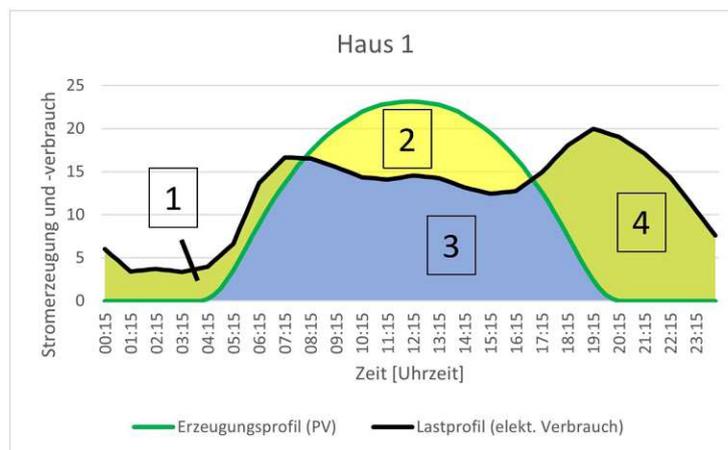


Abbildung 3.8: Haus 1 Profile mit Bereichsmarkierungen

In Abbildung 3.8. sind die Erzeugungs- und Lastprofile des ersten Hauses aufgezeigt. Zusätzlich zeigt diese Abbildung die verschiedenen Bereiche für Netzbezug, Überschussenergie und Selbstversorgung. In Bereich 1 und 4 wird der benötigte Strom vom Netz gekauft. Bereich 2 zeigt den Überschuss der PV-Anlage. Dieser Strom wird nicht selbst verbraucht. Wenn keine Energiegemeinschaft besteht, wird dieser Strom ins Netz eingespeist und verkauft. Bereich 3 zeigt den Eigenverbrauchsanteil der Energiegemeinschaft durch die PV-Anlage. Hier wird der erzeugte Strom der PV-Anlage selbst verbraucht. Es muss kein Strom vom Netz bezogen werden. Diese Profile werden an BST gesendet.

3.4 Erhalten der optimierten Daten

Nachdem die Optimierung der Daten durchgeführt wurde, werden die Ergebnisse wieder als Zeitreihen zurückgesendet. Zu den Ergebnissen von BST gehören unter anderem diese Zeitreihen:

- Energiebezug der Gemeinschaft abgedeckt von der PV-Anlage
- Energieeinspeisung der PV-Anlage in die Gemeinschaft
- Energiebezug vom Netz

Für diesen Fall ist die Optimierung, die BST berechnet, simpel. Die PV-Überschusserzeugung soll direkt in der Energiegemeinschaft verbraucht werden. Der Überschuss der PV-Anlage soll nicht ins Netz eingespeist werden, sondern lokal in der Energiegemeinschaft verbraucht werden. Dies kann finanziell von Vorteil sein und spart Ressourcen in der Stromübertragung.

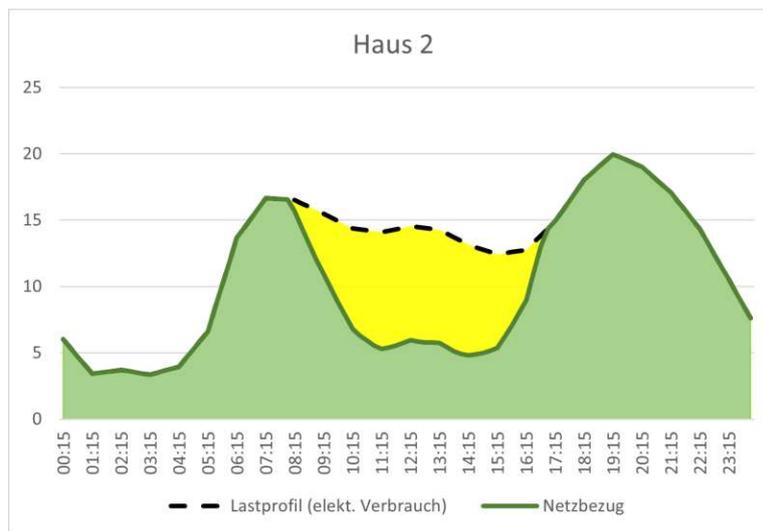


Abbildung 3.9: Haus 2 Lastprofil und Netzbezug

Abbildung 3.9 zeigt in grün den Netzbezug des zweiten Hauses. Der gelbe Bereich stellt den Teil dar, der mit dem Überschuss der PV-Anlage des ersten Hauses abgedeckt werden kann. Die strichlierte schwarze Kurve zeigt das Lastprofil des zweiten Hauses. Durch die Nutzung des PV-Überschusses wird der Gesamtnetzbezug der Energiegemeinschaft verringert.

3.5 Visualisieren der optimierten Daten

Der letzte Arbeitsschritt ist die Visualisierung der Daten, die von BST kommen. In Abbildung 3.10 werden beispielhaft zwei Zeitreihen dargestellt. In Abbildung 3.10(a) ist der Energiebezug abgedeckt von der PV-Anlage in der Gemeinschaft zu sehen. Die gesamte Energie der PV-Anlage wird in der Gemein-

schaft verwendet. Abbildung 3.10(b) zeigt den Energiebezug vom Netz für das erste Haus. Während der Mittagszeit wird kein Strom vom Netz bezogen.

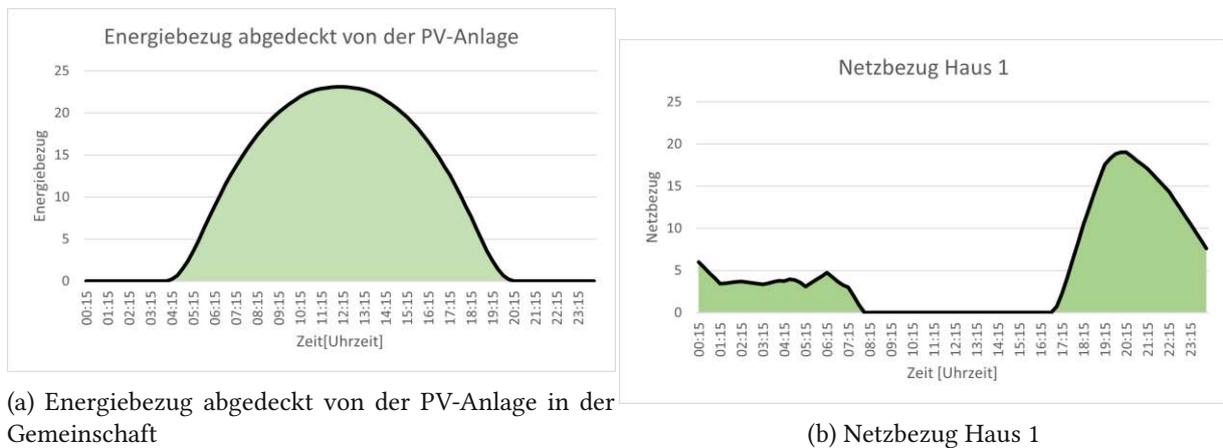


Abbildung 3.10: Beispieldaten des Optimierungstools

Die Visualisierung kann verwendet werden um die Outputdaten zu analysieren. In Abbildung 3.11 ist beispielweise der Gesamtbezug vom Netz an Energie der Energiegemeinschaft zu sehen. Die schwarze gestrichelte Linie zeigt den alten Bezug, der ohne Energiegemeinschaft benötigt worden wäre. Die orangefarbene Linie zeigt den neuen Bezug vom Netz. Somit kann gesagt werden, dass der gesamte Netzbezug der beiden Häuser durch die Gründung einer Energiegemeinschaft verringert worden ist.

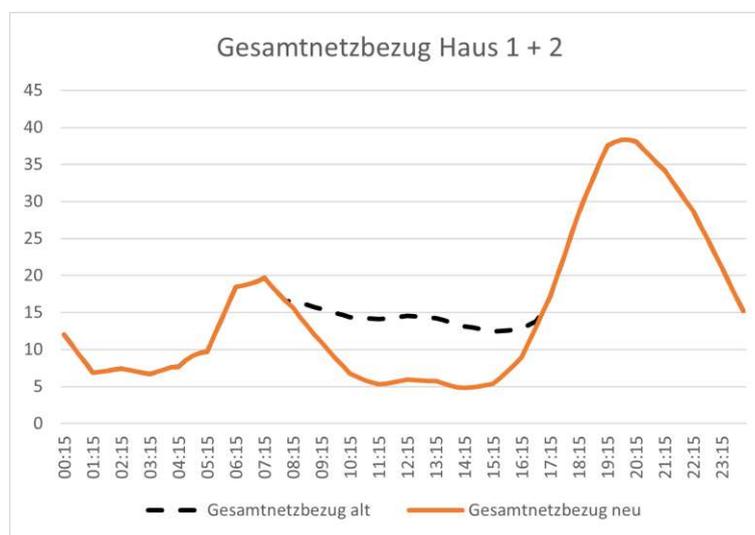


Abbildung 3.11: Vergleich der Gesamtnetzbezüge Haus 1 + 2

Das Konzept und seine technische Umsetzung wird in Kapitel 4 ausführlich erklärt. In Kapitel 5 wird außerdem eine Fallstudie zu diesem Konzept folgen. Darin wird eine komplexere Energiegemeinschaft bearbeitet. Dieses Kapitel diente zum Verständnis und hat einen ersten Einblick in das Konzept gebracht. Es hat die wichtigsten Begriffe erklärt. Gezeigt wurden die Arbeitsschritte:

- Erstellung der Daten der Energiegemeinschaft
- Senden der Daten an BST
- Erhalten der optimierten Daten
- Visualisieren der optimierten Daten

Der Datensatz des gesamten Netzbezugs der Energiegemeinschaft wurde außerdem interpretiert. Es wurde gezeigt, dass sich in diesem Fall der gesamte Strombezug aus dem Netz verringert, wenn eine Energiegemeinschaft gegründet wird.

Kapitel 4

Konzeptionelle Architektur und technische Umsetzung

Dieses Kapitel beschreibt das Konzept zur Entscheidungshilfe. Die konzeptionelle Architektur und seine technische Umsetzung werden erklärt. Der Informationsfluss zwischen dem Simulationstool BIFROST und BST von Ampeers Energy GmbH wird beschrieben. Dieses Kapitel enthält die technische Implementierung des Konzepts. Es dient auch zur Schnittstellenbeschreibung der verschiedenen Arbeitsschritte. Zunächst gibt ein Unterkapitel eine Übersicht der konzeptionellen Architektur des Informationsflusses. Danach werden die einzelnen Arbeitsschritte beschrieben. Dazu gehören die Erstellung der Inputdaten, die Verbindung zum Webservice, die Beschreibung der Input- und Outputdaten, sowie die Visualisierung in BIFROST. Abschließend wird erklärt wie dieser Ansatz zur Entscheidungshilfe beitragen kann.

4.1 Konzeptionelle Architektur

In diesem Unterkapitel wird die konzeptionelle Architektur beschrieben. In Abbildung 4.1 sind die Arbeitsschritte skizzenhaft dargestellt. Das Konzept ist in drei große Schritten aufgeteilt. Zuerst werden die Inputdaten erstellt. Der zweite Schritt ist die Verbindung zum Webservice von Ampeers Energy GmbH für BST. Zum Schluss werden die Resultate visualisiert.

Inputdatenerstellung

Bei der Erstellung der Inputdaten werden die Zeitreihen für BST erzeugt. Dazu gehören Mieterstrom, Wärmelast, Kältelast und PV-Stromerzeugung der Energiegemeinschaft. Für die Daten der PV- Stromerzeugung wird BIFROST verwendet. Die restlichen Zeitreihen werden aus hinterlegten Standardlast-

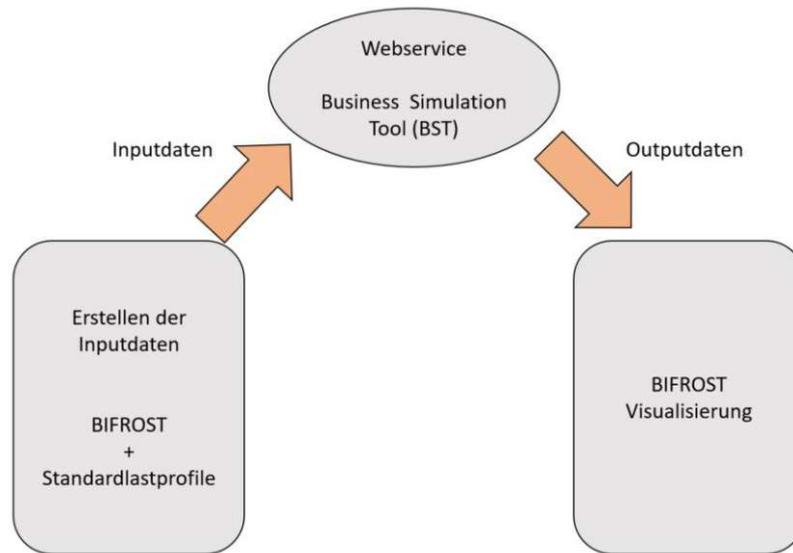


Abbildung 4.1: Übersicht Arbeitsschritte

profilen ausgelesen. Diese Daten werden in einer Mappe eines Excelfiles hinterlegt. Das Excelfile besteht aus mehreren Mappen und dient BST als Input.

Verbindung zum Webservice

Die Verbindung zu BST erfolgt über einen Webservice. Über eine REST-Schnittstelle werden die Inputdaten dem Webservice übergeben. Danach wird die externe Simulation mit Optimierung gestartet. Das Ergebnis sind die Outputdaten, die zurückgesendet werden.

Visualisierung der Resultate

Die Outputdaten werden anschließend in BIFROST zurückgespielt. BIFROST bietet eine Möglichkeit diese Daten in der Benutzeroberfläche zu visualisieren. Es werden die Ergebnisdaten als Profile über die Simulationszeit dargestellt. Durch die Visualisierung können die Outputdaten interpretiert und verglichen werden.

Entscheidungshilfe

Die Interpretation und der Vergleich der Outputdaten helfen zur Entscheidungsfindung in der Energiegemeinschaft. Somit kann der gesamte Netzbezug der Energiegemeinschaft verglichen werden und dadurch die passendste Konfiguration herausgefunden werden.

4.2 Technische Umsetzung

In diesem Unterkapitel wird die technische Umsetzung der Arbeitsschritte für den Informationsfluss beschrieben. Dieses Kapitel ist aufgeteilt in die drei großen Arbeitsschritte, die in der Übersicht zu sehen sind. Es dient auch zur Schnittstellenbeschreibung der verschiedenen Tools. Zunächst wird der Input und dann der Output des Informationsflusses dargestellt. Der Input bezieht sich auf die Informationen zwischen der BIFROST-Simulation und BST. Der Output sind die Ergebnisse von BST. Diese werden an BIFROST gesendet und in der Benutzeroberfläche angezeigt.

4.2.1 Datenerstellung der Energiegemeinschaft

Die Erstellung der Inputdaten ist in zwei Teile aufgegliedert. Im ersten Teil werden in BIFROST die PV-Daten erzeugt. Diese Daten müssen anschließend konvertiert werden. Im zweiten Teil werden hinterlegte Standardlastprofile ausgelesen. Zu den Inputdaten gehören die Erzeugungs- und Lastprofile als Zeitreihen.

In BIFROST wird ein „settlement“ angelegt. Dieses wird je nach Konfiguration mit Gebäuden, Komponenten und Verbindungen zum Stromnetz befüllt. Die Gebäude müssen mit „Solar Panels“ bestückt werden. Während einer Simulation errechnet das „Building Model“-Modul die PV - Stromerzeugungsdaten in BIFROST. Zur Berechnung fließen verschiedene Parameter ein. Zu diesen gehören Einflüsse des Wetters, Neigungswinkel der PV-Anlage, Wolkendichte und Effizienz der Anlage. Daraus werden während der Simulation für jeden Zeitschritt Daten generiert. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein BIFROST-Modul implementiert, dass die erzeugten Daten aller PV-Anlagen aus dem „settlement“ sammelt und abspeichert.

Der zweite Teil der Inputdaten sind Standardlastprofile. Diese sind hinterlegte Zeitreihen. Sie werden für Mieterstrom, Wärmelast und Kältelast verwendet. Hinterlegt sind die Daten für einen Zeitraum von einem Jahr. Je nach Simulationsdatum und -zeitraum werden die Zeitreihen ausgelesen. Wird zum Beispiel die erste Juliwoche simuliert, werden die Daten aus den hinterlegten Zeitreihen herausgesucht. Anschließend werden diese Daten in das Excelfile für die Simulation mit Optimierung von BST geschrieben.

Konvertieren der Daten

Nachdem die Daten für BST erstellt wurden, werden sie in das dafür vorgesehene Format konvertiert. In Abbildung 4.2 ist beispielhaft ein „settlement“ zu sehen mit einem PV-Erzeugungsprofil.

Während einem Simulationslauf in BIFROST werden zu jedem Zeitschritt die PV-Erzeugungsdaten aufgezeichnet. Die Daten aus BIFROST werden in einem separaten Excelfile zunächst abgespeichert. Es

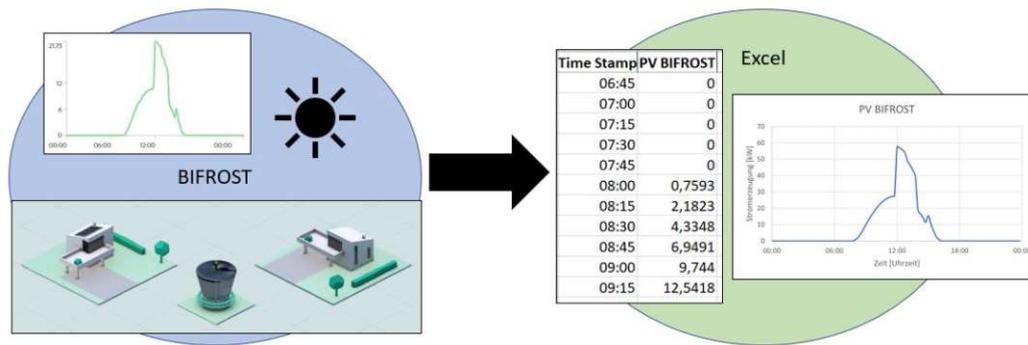


Abbildung 4.2: Erstellung der Inputdaten in BIFROST

wird der jeweilige Zeitschritt und der Wert der Erzeugung abgespeichert. Befinden sich mehrere PV-Anlagen im „settlement“, so wird jede Anlage in einer separaten Spalte abgespeichert. Anschließend sind die Daten bereit um in das Inputdatenfile für BST geschrieben zu werden.

Die Standardlastprofile sind als Zeitreihen abgespeichert. Sie haben einen Zeitschritt von 15 Minuten. Die Daten sind für ein gesamtes Jahr hinterlegt. Wird zum Beispiel eine Woche im Juli simuliert, werden die benötigten Daten herausgesucht und in das passende Format für BST gebracht.

Durch die Konvertierung der Daten liegen die benötigten Zeitreihen bereit für einen Simulationslauf von BST.

Inputdaten

Die erstellten Daten aus BIFROST und den Standardlastprofilen bilden nur einen Teil der gesamten Inputdaten. Der Input für BST wird in einem Excelfile bereitgestellt. In diesem Excelfile befinden sich alle Daten für das Simulationstool von Ampeers Energy GmbH. Das Excelfile ist in unterschiedliche Mappen aufgeteilt. Zu den Mappen gehören:

- Simulation Summary
- Components
- Contracts
- Szenarios (mehrere Mappen möglich)
- Time Series

Die erste Mappe wird als „Simulation Summary“ bezeichnet. Hier werden globale Simulationsvariablen und eine Übersicht der Szenarien dargestellt. Ein Szenario beschreibt die Konfiguration der Energiegemeinschaft, seine Verbindungen und Knotenpunkte und setzt fest, welche Zeitreihe für welche Komponente verwendet werden soll. Zudem werden Daten wie Name, Zeitauflösung, Anzahl der Zeitschritte in dieser Mappe festgelegt. Sie stellt eine Zusammenfassung der Simulationsdaten dar.

Bei der Mappe „Components“ werden die Komponenten der Konfiguration beschrieben. Die Netzanschlüsse, wie zum Beispiel zu elektrischem Netz, Gasnetz oder Fernwärme, werden hier gesetzt. Erzeuger, Speicher und Lasten werden hier konfiguriert. Für eine PV-Anlage wird hier zum Beispiel die maximale Erzeugung in Kilowatt-Peak angegeben. Bei einem Speicher beispielsweise werden in dieser Mappe die Kapazität, Effizienz, maximale Ladeleistung und maximale Entladeleistung festgelegt.

In der Mappe „Contracts“ sind die verschiedenen Verträge festgelegt. Hier werden die Preise eingestellt, wie zum Beispiel für den Stromverbrauch oder die Stromeinspeisung ins Netz. Je nach Konfiguration werden hier auch die Preise für Gas, Fernwärme und -kälte angeführt. Diese Preise sind statisch und können nicht zur Simulationslaufzeit geändert werden.

Die nächste Mappe bzw. die nächsten Mappen beschreiben die Szenarien. Die Szenariomappe beschreibt die Konfigurationen. Hier werden die zuvor in der Mappe „Components“ beschriebenen Komponenten über „Connection Node“ verbunden. Für jede Komponente wird der Eingangs- und Ausgangspunkt festgelegt. So wird der gewünschte Aufbau der Energiegemeinschaft gebildet. Diese Mappe stellt auch die Verbindung zwischen den Komponenten und den Inputzeitreihen der nächsten Mappe her. Hier wird angegeben, welche Zeitreihe für welche Komponente verwendet werden soll.

In der Mappe „Time Series“ sind die Zeitreihen der Energiegemeinschaft hinterlegt. Die Zeitreihen bilden die Grundlage der Simulation von BST. Bei ihnen sind die Erzeugungs- und Lastprofile hinterlegt. Dazu gehören Stromverbrauch, Wärmelast, Kältelast und die Erzeugung der PV-Anlagen. Diese Daten werden zu jedem Zeitschritt angegeben. In der linken Spalte der Mappe wird der Zeitschritt beschrieben und hängt von der Einstellung in der Mappe „Simulation Summary“ ab. In Abbildung 4.3 ist ein Ausschnitt der „Time Series“-Mappe zu sehen. Dargestellt sind die ersten zehn Zeitschritte. In Spalte A unter „Time Stamp“ sind diese Zeitschritte angegeben. Die nächsten Spalten beschreiben den Stromverbrauch, die Wärmelast, die Kältelast und die Erzeugung der PV-Anlagen. Die Werte sind willkürlich gewählt. Die Kältelast ist für diesen Betrachtungszeitraum auf null. Die Simulation und somit der erste Zeitschritt beginnt um Mitternacht. Die PV-Zeitreihe ist auf null, da in der Nacht kein Strom durch die PV-Anlage erzeugt wird.

Das gesamte Excelfile bildet die Inputdaten für BST. Dieses File wird mithilfe einer REST - Schnittstelle zum Webservice gesendet. Dort wird die externe Simulation mit Optimierung gestartet.

4.2.2 Verbindung zum Webservice

Nachdem die Inputdaten erstellt und in das Input-Excelfile gebracht worden sind, ist der nächste Arbeitsschritt die Verbindung zum Webservice. Der Webservice bietet die Möglichkeit BST zu starten.

Das Input-Excelfile wird über eine REST-Schnittstelle an den Webservice übertragen. Dabei handelt es sich um einen POST-Request. Die REST-Ressource ist das Inputfile.

	A	B	C	D	E
1	Time Stamp	Mieterstrom	Wärmelast	Kältelast	PV
2	1	39,71469713	72,78426478	0	0
3	2	37,13034666	68,75468611	0	0
4	3	34,54599619	64,72510743	0	0
5	4	31,96164572	60,69552876	0	0
6	5	29,37729526	56,66595009	0	0
7	6	28,76846146	58,05111776	0	0
8	7	28,15962766	59,43628542	0	0
9	8	27,55079386	60,82145309	0	0
10	9	26,94196006	62,20662076	0	0
11	10	26,76314174	61,45107476	0	0

Abbildung 4.3: Ausschnitt der Time Series-Mappe des Inputfiles

Outputdaten

Der Webservice liefert ein JSON-File als Rückgabewert. Dieses beinhaltet die Daten für den Output von BST. Die Daten werden konvertiert und als Zeitreihen gespeichert. Typische Zeitreihen der Outputdaten sind:

- Energiebezug abgedeckt von den PV-Anlagen in der Gemeinschaft
- Energieeinspeisung der PV-Anlagen in die Gemeinschaft
- Energiebezug vom Netz
- Energieeinspeisung ins Netz
- elektrischer Verbrauch durch Mieter
- elektrischer Verbrauch der Wärme-/Kältemaschinen
- Thermische Energie in die Gemeinschaft gespeist (Wärme und Kälte)
- Eingespeicherte Energie der Pufferspeicher
- Ausgespeicherte Energie der Pufferspeicher
- Ladestände der thermischen Pufferspeicher
- Eingespeicherte Energie der elektrischen Speicher (wenn vorhanden)
- Ausgespeicherte Energie der elektrischen Speicher (wenn vorhanden)
- Ladestände der elektrischen Speicher (wenn vorhanden)
- Energie vom Fernwärme- oder Fernkältenetz bezogen (wenn ein Anschluss vorhanden ist)
- Energie ins Fernwärme- oder Fernkältenetz eingespeist (wenn ein Anschluss vorhanden ist)

Die Eigenschaft und Anzahl der Zeitreihen ändern sich je nach Konfiguration und Komponenten. Jede Komponente kann mehrere Ein- und Ausgänge besitzen. Jeder dieser Ein- und Ausgänge bekommt in den Outputdaten eine Zeitreihe. In den folgenden Abbildungen sind Komponenten als eingefärbte Rechtecke dargestellt. Die dazugehörigen Zeitreihen sind als Pfeile mit Ellipsen illustriert. Ein Eingang

einer Komponente ist mit einem Pfeil zur Komponente hin dargestellt. Ein Ausgang einer Komponente ist mit einem Pfeil von der Komponente weg dargestellt.

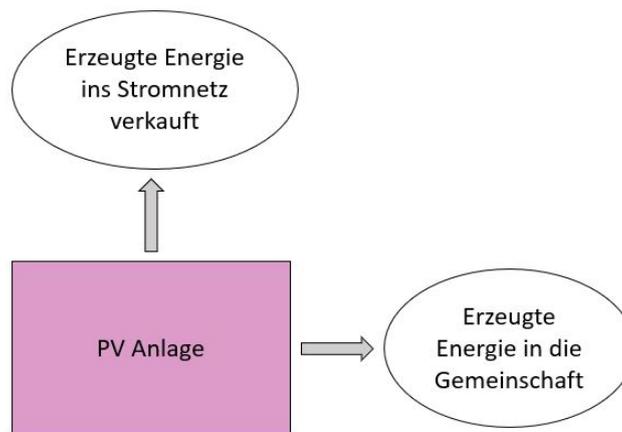


Abbildung 4.4: Komponente PV-Anlage

Eine PV-Anlage hat zum Beispiel zwei Komponentenausgänge, einen für die in die Gemeinschaft gelieferte Energie und einen Ausgang in das übergeordnete Stromnetz, damit der Überschuss verkauft werden kann. Diese Ausgänge werden in Abbildung 4.4 dargestellt. Somit werden beispielsweise für diese Komponente zwei Zeitreihen in den Outputdaten erstellt.

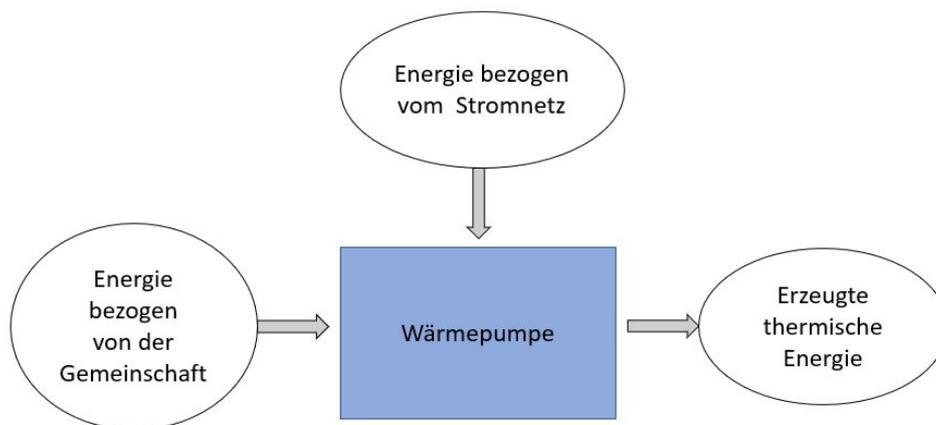


Abbildung 4.5: Komponente Wärmepumpe

In Abbildung 4.5 ist eine Wärmepumpe als Komponente dargestellt. Eine Wärmepumpe kann beispielsweise zwei elektrische Eingänge und einen thermischen Ausgang besitzen. Die Werte in einer Zeitreihe werden von BST berechnet.

Für den nächsten Arbeitsschritt werden die Zeitreihen in das richtige Format für die Visualisierung in BIFROST konvertiert. Dadurch können sie in der Benutzeroberfläche in BIFROST als Profile betrachtet und verglichen werden. Das JSON-File, welches vom Webservice zurückgegeben wird, beinhaltet alle Zeitreihen in einem Comma-separated values (CSV)-String. Dieser wird in ein separates Excelfile

konvertiert. Somit können die Outputdaten für die Visualisierung in BIFROST verwendet werden.

4.2.3 Visualisierung mittels BIFROST

Die Outputdaten liegen in einem Excelfile bereit und können visualisiert werden. Bei den Daten handelt es sich wieder um Zeitreihen, die einen Zeitschritt und einen Wert haben. Somit können sie als Profile visualisiert werden.

Für die Visualisierung der Zeitreihen der Outputdaten wird wiederum BIFROST verwendet. Es wurde ein eigenes Modul implementiert für diesen Zweck. Das BIFROST Modul nimmt die Zeitreihen der Outputdaten und schreibt sie in die dafür angelegten Dynamikdaten. Für jede Zeitreihe wurde eine „dynamic“ in BIFROST angelegt.

Somit können die Outputdaten in BIFROST eingefügt werden. Die Profile werden in der Benutzeroberfläche angezeigt. Abbildung 4.6. zeigt beispielhaft den Netzbezug einer Energiegemeinschaft mit einer Simulationsdauer von einer Woche. Auf der x-Achse ist die Simulationsdauer von einer Woche aufgetragen. Die y-Achse beschreibt den Netzbezug in kWh. Die höchsten Spitzen sind während des Abends. In der Nacht ist ein Tal, aber trotzdem muss Strom vom Netz bezogen werden. Am Vormittag gibt es eine kleinere Spitze. Die Energiegemeinschaft ist in der Lage, zur Mittagszeit sich selbst mit Energie zu versorgen, ohne dabei auf einen Bezug vom Stromnetz angewiesen zu sein.

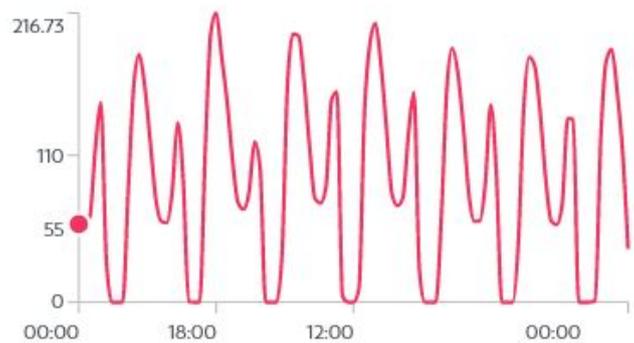


Abbildung 4.6: Netzbezug einer Woche

Die Inputdaten, wie PV-Stromerzeugung, Mieterstrom, Wärme- und Kältelast werden auch in BIFROST visualisiert. Dies hilft zur besseren Vergleichbarkeit der In- und Outputdaten, sowie zur Interpretation der Outputdaten. In Abbildung 4.7 sind die Inputdaten einer PV-Anlage einer Woche zu sehen. Auf der x-Achse ist die Simulationsdauer von einer Woche aufgetragen. Die y-Achse beschreibt die PV-Erzeugung in kWh. Die Spitzen sind täglich zur Mittagszeit.

Durch diese Visualisierungen wird es möglich die Ergebnisse von BST für eine bestimmte Konfiguration zu interpretieren und zu vergleichen. So kann verglichen werden was zum Beispiel eine Vergrößerung der Leistung der PV-Anlagen für Auswirkungen auf den Betrieb hat.

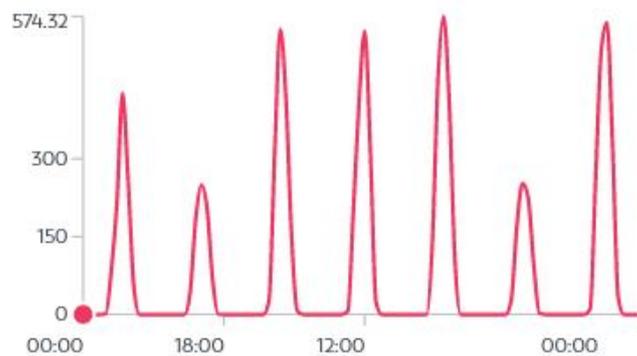


Abbildung 4.7: Inputdaten einer PV-Anlage

4.3 Entscheidungshilfe durch Anwendung des Konzepts

Durch die Anwendung dieses Konzepts ist es möglich die Konfiguration einer Energiegemeinschaft zu testen. BST liefert Daten eines kostenoptimierten Betriebs der Energiegemeinschaft. Das Tool von Ampeers Energy GmbH optimiert den Betrieb der variablen Größen in der Energiegemeinschaft wie Wärmepumpe, Kältemaschine und Speicher. Anhand dieser Daten kann eine Energiegemeinschaft projektiert werden. Die einzelnen Komponenten, wie PV-Anlage, Wärmepumpe, Kältemaschine oder Speicher, können so dimensioniert werden damit sie die gewünschten Anforderungen erfüllen. Dies hilft zur Entscheidungsfindung, welche Komponenten und in welcher Dimensionierung sie geeignet sind für eine Energiegemeinschaft.

In Kapitel 5 wird dieses Konzept mit einer komplexen Energiegemeinschaft in einer Fallstudie gezeigt. Dabei wird die Machbarkeit des Konzepts veranschaulicht. Zudem werden Ergebnisse verschiedener Dimensionierungen verglichen. Durch den Vergleich soll abgeschätzt werden, welche Dimensionierung der Komponenten in der Energiegemeinschaft geeignet sind.

Kapitel 5

Fallstudie: Energiegemeinschaft B

In diesem Kapitel wird das implementierte Konzept anhand einer Fallstudie auf seine Umsetzbarkeit und Wirksamkeit evaluiert. Dafür wird eine konkrete Energiegemeinschaft betrachtet und das Konzept angewendet. Zuerst wird die Basiskonfiguration der Energiegemeinschaft beschrieben, das Konzept an ihr angewendet und die Resultate veranschaulicht. Des Weiteren wird die Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung der PV-Anlagen in der Energiegemeinschaft durch das Konzept dargestellt. Danach wird veranschaulicht, wie das Konzept bei einer Entscheidungsfindung bei den Komponenten der Konfiguration helfen kann. Am Ende der Fallstudie werden die erzielten Ergebnisse analysiert und mögliche Schwachstellen und Herausforderungen identifiziert. Darüber hinaus werden Vorschläge für zukünftige Verbesserungen formuliert.

Dieses Kapitel beantwortet auch die Forschungsfragen. Durch das implementierte Konzept wird veranschaulicht, wie Digitale Zwillinge im Energiemanagement eingesetzt werden können. Die Flexibilität der Stellgrößen einer Energiegemeinschaft wird dargestellt.

5.1 Basiskonfiguration der Energiegemeinschaft

In dieser Fallstudie wird eine geplante Energiegemeinschaft untersucht. Die Gebäude sind so aufgebaut, dass es ein Gymnasium gibt mit einer PV-Anlage von 300 kWp. Dazu kommen Baufeld 1 (BF1) mit einer PV-Anlage von 36 kWp und Baufeld 2 (BF2) mit einer PV-Anlage von 47 kWp. Die Gebäude werden Baufelder genannt, da sie geplante Bauten sind. BF1 und BF2 repräsentieren Miethäuser. Ziel ist es den Überschuss an elektrischer Energie der PV-Anlage des Gymnasiums in den Miethäusern BF1 und BF2 zu nutzen. Dazu wird eine Energiegemeinschaft gebildet.

Die Komponenten der Energiegemeinschaft sind in drei große Bereiche und einen Netzanschluss aufgeteilt. In Abbildung 5.1 ist die Konfiguration mit ihren Komponenten und Verbindungen zu sehen. Komponenten werden als Rechtecke oder andere Formen dargestellt und die Verbindungen mit Pfeilen.

Knotenpunkte der Konfiguration sind Kreise mit einem Kreuz. Die drei Bereiche der Komponenten sind aufgeteilt in Strom (pink), Wärme (blau) und Kälte (gelb). Zusätzlich gibt es noch die Netzanschlusskomponente. Sie wird oben in der Abbildung mit „Stromnetz“ bezeichnet und ist als graues Rechteck dargestellt. Sie ist mit den elektrischen Erzeugern und Verbrauchern verbunden.

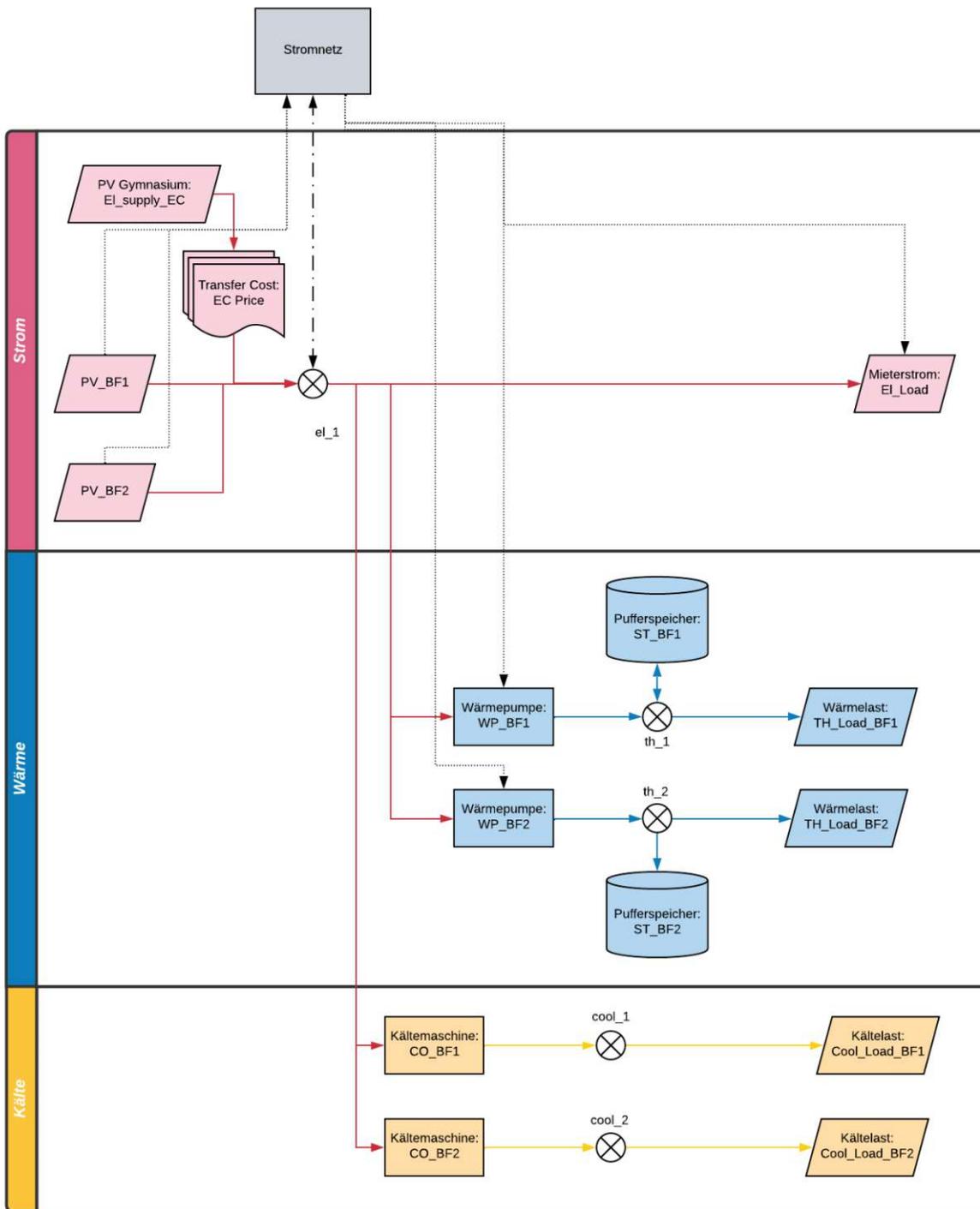


Abbildung 5.1: Übersicht der Konfiguration und Komponenten der Energiegemeinschaft von Ampeers Energy GmbH

Der pinke Bereich enthält alle elektrische Komponenten. Dazu gehören die PV-Anlagen des Gymnasiums (El_supply_EC), von Baufeld 1 (PV_BF1) und von Baufeld 2 (PV_BF2). Der Stromverbrauch der gesamten Energiegemeinschaft wird als Mieterstrom (El_Load) bezeichnet. Dazu gehören die elektrischen Verbräuche wie Kochen, Waschen und Beleuchtung. Dieser Mieterstrom hat auch eine eigene Komponente in der Darstellung der Konfiguration. Zusätzlich gibt es bei der PV-Anlage des Gymnasiums eine Strompreiseinstellung für den Transfer vom Gymnasium (EC_Price) zum Knotenpunkt (el_1). In Tabelle 5.1 sind die Komponenten des pinken Stromteils übersichtlich beschrieben.

Tabelle 5.1: Stromkomponenten in der Energiegemeinschaft

Strom	Komponentenname	Beschreibung
	El_supply_EC	PV-Anlage des Gymnasiums
	EC_Price	Strompreiseinstellungen für den Transfer vom Gymnasium zum Knotenpunkt
	PV_BF1	PV-Anlage von Baufeld 1
	PV_BF2	PV-Anlage von Baufeld 2
	el_1	Knotenpunkt der Energiegemeinschaft
	El_Load	Stromverbrauch der gesamten Energiegemeinschaft (Mieterstrom)

Die pinken Pfeile in Abbildung 5.1 stellen die elektrischen Verbindungen der Komponenten dar. Der Knotenpunkt „el_1“ ist die Verbindung zwischen dem Stromnetz, den Erzeugern und den Verbrauchern.

Die grauen strichlierten Pfeile sind die Verbindungen der elektrischen Komponenten zum übergeordneten Stromnetz. Die erzeugenden PV-Anlagen sind mit dem Stromnetz verbunden. Damit können sie die überschüssige Energie an das Netz verkaufen. Die Verbraucher, wie Mieterstrom (El_load), Wärmepumpen (WP_BF1 und WP_BF2) und Kältemaschinen (CO_BF1 und CO_BF2) sind mit dem Stromnetz verbunden, um bei Bedarf Strom zu verbrauchen.

Der blaue Bereich beinhaltet die Komponenten, die im Zusammenhang mit der Wärmeerzeugung stehen. Dazu gehören die Wärmepumpen und die Pufferspeicher (ST_BF1 und ST_BF2) der Baufelder. In Tabelle 5.2 sind die Komponenten des blauen Wärmeteils beschrieben.

Die blauen Pfeile in Abbildung 5.1 stellen die thermische Verbindung bezogen auf die Wärme der Komponenten dar. Die Knotenpunkte „th_1“ und „th_2“ sind die Verbindung zwischen Wärmepumpe, Wärmespeicher und Wärmelast (TH_Load_BF1 und TH_Load_BF2). Als Wärme- und Kältelast werden jene Lasten bezeichnet, die benötigt werden zur Aufrechterhaltung der gewünschten Raumtemperatur. Die Wärmepumpen erzeugen aus elektrischer Energie (pinker Pfeil) thermische Energie zum Heizen

Tabelle 5.2: Wärmekomponenten in der Energiegemeinschaft

Wärme	Komponentenname	Beschreibung
	WP_BF1	Wärmelast (elektrisch) von Baufeld 1
	ST_BF1	Pufferspeicher (Wärme) von Baufeld 1
	th_1	Knotenpunkt für Wärme von Baufeld 1
	TH_Load_BF1	Wärmelast (thermisch) von Baufeld 1
	WP_BF2	Wärmelast (elektrisch) von Baufeld 2
	ST_BF2	Pufferspeicher (Wärme) von Baufeld 2
	th_1	Knotenpunkt für Wärme von Baufeld 2
	TH_Load_BF2	Wärmelast (thermisch) von Baufeld 2

(blauer Pfeil). In den Pufferspeichern wird Wärme gespeichert.

Der gelbe Bereich beinhaltet die Komponenten der Kälteerzeugung. Dazu gehören die Kältemaschinen der Baufelder (CO_BF1 und CO_BF2). In Tabelle 5.3 sind die Komponenten des gelben Kälteteils beschrieben.

Tabelle 5.3: Kältekomponenten in der Energiegemeinschaft

Kälte	Komponentenname	Beschreibung
	CO_BF1	Kältelast (elektrisch) von Baufeld 1
	cool_1	Knotenpunkt für Kälte von Baufeld 1
	Cool_Load_BF1	Kältelast (thermisch) von Baufeld 1
	CO_BF2	Kältelast (elektrisch) von Baufeld 2
	cool_2	Knotenpunkt für Kälte von Baufeld 2
	Cool_Load_BF2	Kältelast (thermisch) von Baufeld 2

Die Pfeile in Abbildung 5.1, welche gelb dargestellt sind, symbolisieren die thermische Verbindung in Bezug auf die Kälte der Komponenten. Die Knotenpunkte „cool_1“ und „cool_2“ sind die Verbindungen zwischen Kältemaschine und Kältelast (Cool_Load_BF1 und Cool_Load_BF2). Die Kältemaschinen erzeugen aus elektrischer Energie (pinke Pfeile) thermische Energie zum Kühlen (gelbe Pfeile).

Diese Anordnung aus Abbildung 5.1 der Gebäude und Komponenten mit den Erzeugern, Speicher und Verbrauchern wird für diese Fallstudie als Basiskonfiguration betrachtet.

5.1.1 Erstellen der Inputdaten mittels BIFROST

Dieses Unterkapitel beschreibt die Erstellung der Inputdaten. Wie in Kapitel 4 beschrieben, handelt es sich bei den Inputdaten um ein Excelfile. Dieses muss mit Daten und Zeitreihen befüllt werden. Die Zeitreihen dienen als Stellgrößen für BST. Für diese Energiegemeinschaft sind die Stellgrößen:

- Mieterstrom (elektrischer Verbrauch der Wohnhäuser)
- Wärmelast für das Baufeld 1
- Wärmelast für das Baufeld 2
- Kältelast für das Baufeld 1
- Kältelast für das Baufeld 2
- PV-Erzeugung von Baufeld 1
- PV-Erzeugung von Baufeld 2
- PV-Erzeugung vom Gymnasium

BIFROST Inputdatenerstellung

Abbildung 5.2 zeigt die Energiegemeinschaft in der Benutzeroberfläche von BIFROST. Links ist das Gymnasium, rechts sind die zwei Baufelder und in der Mitte ist ein „Transformator“ zu sehen. Dieser Transformator bildet die Schnittstelle zum übergeordneten Stromnetz. In Abbildung 5.3 ist die Netzan-sicht in BIFROST dargestellt. Hier sind die elektrischen Verbindungen in türkis zu sehen. In BIFROST sind die Gebäude nur über das Stromnetz verbunden. Es gibt keine direkte Verbindung zwischen den Gebäuden. Sie sind über das Netz verbunden und generieren die PV-Erzeugungsprofile.



Abbildung 5.2: Energiegemeinschaft abgebildet in BIFROST

Die PV-Erzeugungsdaten errechnet das „Building Model“-Modul in BIFROST. Für die Berechnung werden verschiedene Parameter berücksichtigt. Zu diesen gehören Einflüsse des Wetters, Neigungswinkel der PV-Anlage, Wolkendichte und Effizienz der Anlage. Daraus werden während der Simulation zu

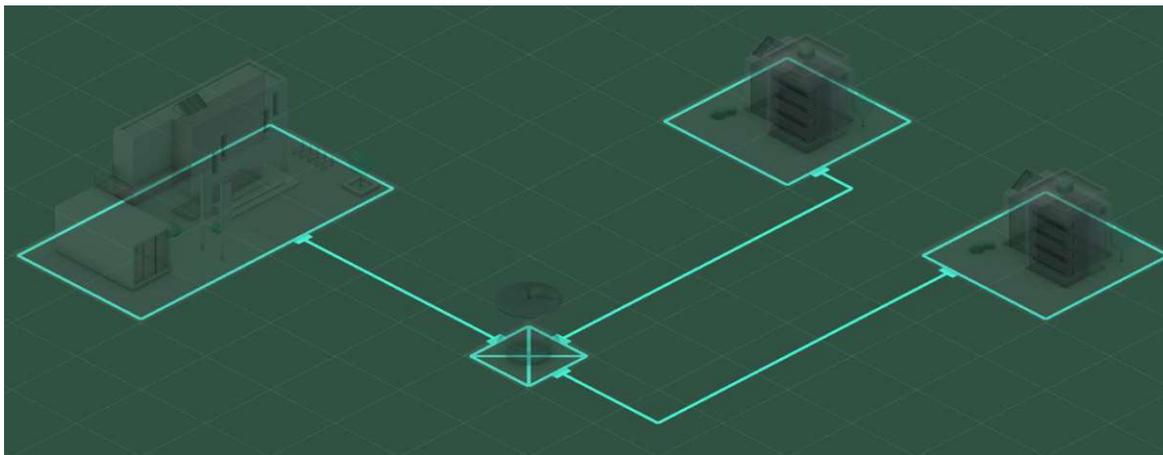


Abbildung 5.3: Powergrid View der Energiegemeinschaft

jedem Zeitschritt Daten generiert. In Abbildung 5.4 ist eine Visualisierung der erzeugten Energie von Baufeld 1 für einen Tag zu sehen.

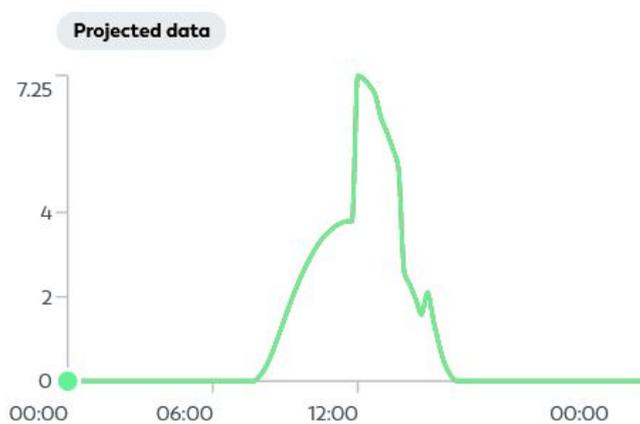


Abbildung 5.4: Ein Tag der PV-Erzeugung von Baufeld 1

Die Spitze der Erzeugung zu Mittag ist deutlich erkennbar. Die generierten Zeitreihen werden in das Inputfile gespeichert. Die Generierung der Daten hängt auch vom Datum der Simulation ab. Das hinterlegte Modell der Wetterdaten und Wolkendichte beruht auf realen Wetterdaten. So ist die Produktion von PV-Anlagen im Sommer deutlich höher als im Winter.

Inputdaten für Mieterstrom, Wärme- und Kältelast

Für die Stellgrößen Mieterstrom, Wärmelast und Kältelast werden Daten aus existierenden Standardlastprofilen genutzt. Hierbei ist der Simulationszeitpunkt von Bedeutung, da je nach Datum unterschiedliche Daten berücksichtigt werden. So kommt es zum Beispiel im Winter zu keiner Kältelast, da die Kältemaschine nicht in Betrieb genommen wird. Abbildung 5.5 zeigt beispielhaft die Verteilung des Mieterstroms der gesamten Energiegemeinschaft und die Wärmelast von Baufeld 1 für einen Tag.

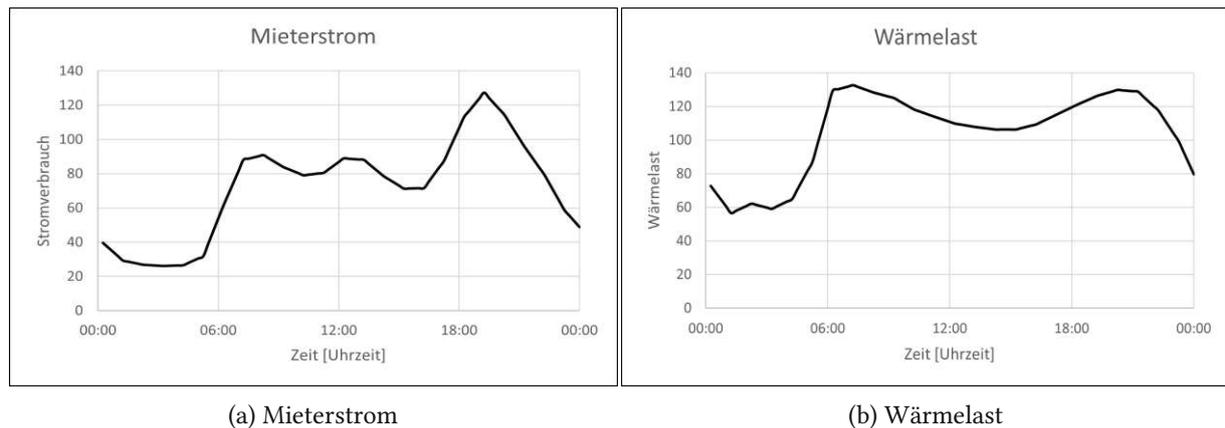


Abbildung 5.5: Inputdaten von Mieterstrom und Wärmelast BF1 für einen Tag

In Abbildung 5.5(a) ist ein typischer Verlauf von einem Haushaltsverbrauch zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die Spitzen morgens, mittags und abends. Über Nacht wird weniger Strom verbraucht. In Abbildung 5.5(b) ist die Wärmelast für das Baufeld 1 zu sehen. Es unterscheidet sich kaum vom Baufeld 2. Darum wird hier nur das Profil eines Baufeldes beispielhaft dargestellt. Morgens und abends sind hier die Spitzen.

Überblick der Inputdaten

Dieser Überblick fasst die wichtigen Inputdaten für die Basiskonfiguration zusammen. Dazu gehören die Konfiguration, Inputzeitreihen und Simulationszeitparameter. Der Zeitschritt in diesem Beispiel beträgt 15 Minuten und die Simulationsdauer ist eine Woche, vom 01.01. bis 08.01.

In Tabelle 5.4 sind die Kerndaten für BST zusammengefasst:

Tabelle 5.4: Überblick der Inputdaten für Simulationslauf im Januar

Inputparameter	Wert
Anordnung der Gebäude/Komponenten	Konfiguration der Energiegemeinschaft (siehe Abbildung 5.1)
Zeitschritt	15 Minuten
Simulationsdauer	1 Woche (01.01.-08.01)
Mieterstrom	Standardlastprofil
Wärmelast	Standardlastprofil
Kältelast	keine Kältelast für diesen Fall, da die erste Woche im Januar simuliert wird
PV Erzeugung	Generiert aus Bifrostsimulation

Abbildung 5.6 zeigt einen Ausschnitt des Inputfiles. Es zeigt die Mappe „Time Series“. Sie beinhaltet

die Zeitreihen, die für die Simulation in BST verwendet wird.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time Stamp	Mieterstrom	Wärmelast_BF1	Wärmelast_BF2	Kältelast_BF1	Kältelast_BF2	PV_BF1	PV_BF2	PV_EC
29	28	81,45174429	131,8608513	102,1130432	0	0	0	0	0
30	29	88,14891609	132,6643968	102,7353089	0	0	0	0	0
31	30	88,84715905	131,5883974	101,9020549	0	0	0	0	0
32	31	89,54540201	130,512398	101,068801	0	0	0	0	0
33	32	90,24364497	129,4363986	100,2355471	0	0	0	0	0
34	33	90,94188793	128,3603992	99,40229311	0	0	0,0835	0,0991	0,6491
35	34	89,18776537	127,5375761	98,76509893	0	0	0,2399	0,2849	1,8653
36	35	87,43364281	126,714753	98,12790475	0	0	0,4764	0,5659	3,705
37	36	85,67952026	125,89193	97,49071056	0	0	0,7635	0,9072	5,9392
38	37	83,9253977	125,0691069	96,85351638	0	0	1,0703	1,2721	8,3273
39	38	82,73753315	123,3601667	95,53011307	0	0	1,3773	1,6374	10,7176

Abbildung 5.6: Inputdaten in „Time Series“ Mappe

In der Abbildung 5.6 ist zu beobachten, dass die Kältelast gleich Null bleibt. Es wurde ein Zeitfenster am frühen Vormittag ausgewählt, wenn die PV-Anlagen mit der Stromerzeugung beginnen.

Nachdem die Inputdaten erstellt wurden, werden sie über die REST-Schnittstelle gesendet. Der Webservice bietet die Möglichkeit BST aufzurufen. Somit startet BST mit den gesendeten Inputdaten. Das Ergebnis sind kostenoptimierte Daten als Zeitreihen. Diese werden als JSON-File zurückgesendet.

5.1.2 Resultate von BST

Die Outputdaten von BST werden an BIFROST zurückgesendet und dort in der Benutzeroberfläche angezeigt. Jede Zeitreihe der Outputdaten kann einzeln betrachtet werden. Für die Entscheidungsfindung in der Energiegemeinschaft ist interessant, ob bzw. wie viel Strom vom Netz bezogen werden muss. Eventuell produziert die Energiegemeinschaft sogar einen Überschuss, was in diesem Beispiel allerdings nicht der Fall ist. Abbildung 5.7(a) zeigt beispielhaft den Netzbezug und Abbildung 5.7(b) die Einspeisung der Energiegemeinschaft in das übergeordnete Stromnetz. Auf den x-Achsen ist die Simulationszeit einer Woche aufgetragen. Die y-Achsen sind in der Einheit Kilowattstunden.

Die Energiegemeinschaft muss zu jedem Zeitpunkt Strom aus dem Netz beziehen. Es gibt somit auch keinen Überschuss der PV-Anlagen, der in das Netz eingespeist werden kann. Die Last der Energiegemeinschaft ist im Januar zu hoch für eine Selbstversorgung durch die installierte bzw. geplante PV-Anlage.

Tabelle 5.5: Überblick der Inputdaten für Simulationslauf im Juli

Inputparameter	Wert
Anordnung der Gebäude/Komponenten	Konfiguration der Energiegemeinschaft (siehe Abbildung 5.1)
Zeitschritt	15 Minuten
Simulationsdauer	1 Woche (01.07.-08.07)
Mieterstrom	Standardlastprofil
Wärmelast	Standardlastprofil
Kältelast	Standardlastprofil
PV Erzeugung	Generiert aus Bifrostsimulation

ist die Erzeugung im Sommer deutlich höher und sie findet pro Tag länger statt.

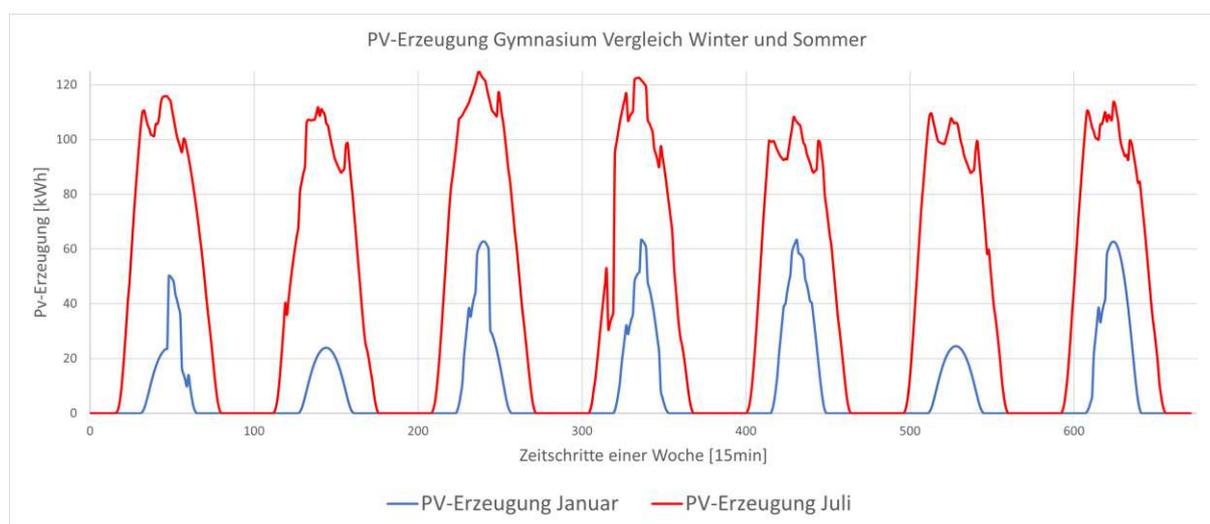


Abbildung 5.8: Vergleich der PV-Erzeugung des Gymnasiums im Januar und im Juli

Abbildung 5.9 zeigt den Vergleich des Netzbezugs für die Wochen im Januar und Juli. Auf der x-Achse sind die Zeitschritte der Simulation einer Woche. Auf der y-Achse ist der Netzbezug in kWh aufgetragen. Zu sehen ist, dass die Energiegemeinschaft es schafft, im Juli zu Mittag den Netzbezug auf null zu setzen, und dass sie sich selbst ausreichend mit Strom versorgt.

Die Einspeisung ins Netz der Energiegemeinschaft im Juli bleibt wie im Winter, auch auf Null. Somit wird der gesamte Strom, der erzeugt wird, durch die drei PV-Anlagen in der Energiegemeinschaft genutzt. Falls ein Überschuss existiert, werden die Pufferspeicher in Baufeld 1 und Baufeld 2 gefüllt. BST versucht aus Kostengründen die Einspeisung in das Stromnetz zu minimieren bzw. nicht vorkommen zu lassen.

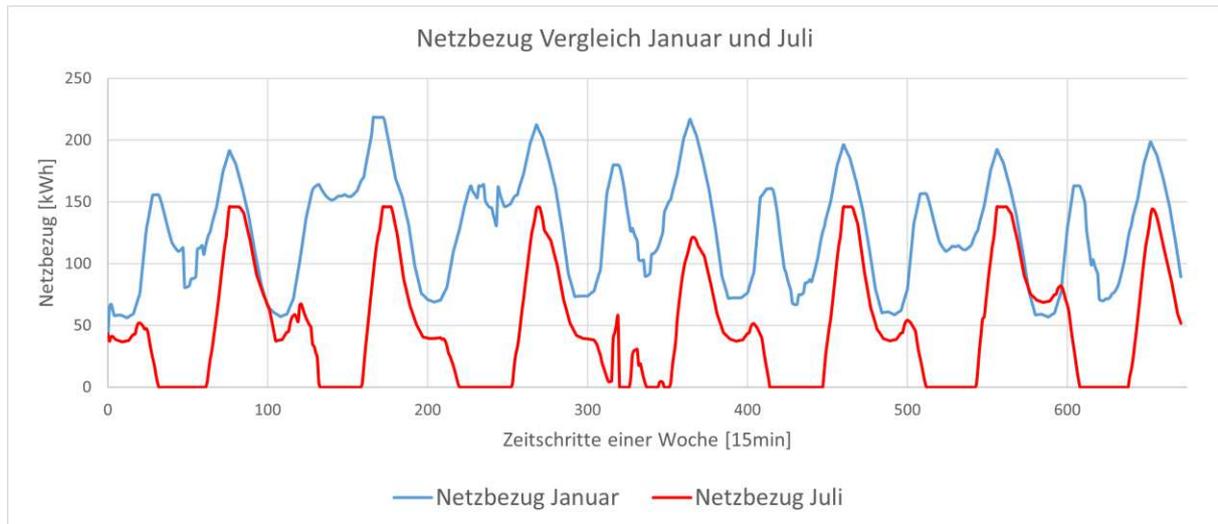


Abbildung 5.9: Vergleich Netzbezug der Energiegemeinschaften im Januar und im Juli

5.3 Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung der PV-Anlagen

Die Basiskonfiguration der PV-Anlagen ist mit einer Leistung von 383 kWp dimensioniert. Diese Größe wurde als Vorgabe festgelegt. Das Konzept kann helfen, die Größenordnung der erforderlichen PV-Anlagen zu bestimmen, um den Bezug vom Stromnetz zu verringern. Dazu werden drei verschiedene Dimensionierungen verglichen:

- Basiskonfiguration mit 383 kWp
- Doppelte Leistung der PV-Anlagen mit 766 kWp
- Zehnfache Leistung der PV-Anlagen mit 3830 kWp

Durch das Konzept ist es möglich diese PV-Anlagen mit verschiedenen Leistungen zu vergleichen. BST berücksichtigt bei der Optimierung die Betriebskosten und keine Anschaffungskosten der Anlagen. Durch dieses Konzept ist es einfach für eine fixe Konfiguration die Werte der Komponenten zu ändern. Durch die Simulation gibt es für Alternativen praktisch keine Grenzen der PV-Dimensionierung, wie die in der Realität etwa durch die Dachflächen der Gebäude gegeben sind.

Abbildung 5.10 zeigt den Netzbezug im Juli mit unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen für die Basiskonfiguration der Energiegemeinschaft. Auf der x-Achse sind die Zeitschritte der Simulation einer Woche. Auf der y-Achse ist der Netzbezug in kWh zu sehen. Die Spitzen am Abend eines Tages sind deutlich zu erkennen. Diese werden mit größerer Dimensionierung der PV-Anlagen nur minimal kleiner.

Tabelle 5.6 zeigt einen Vergleich der Netzbezüge bei unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen. Der Netzbezug verhält sich nicht linear zu der Dimensionierung der PV-Anlagen. Grund dafür ist das unregelmäßige Erzeugungsprofil einer PV-Anlage. Zu Mittag wird der meiste Strom produziert.

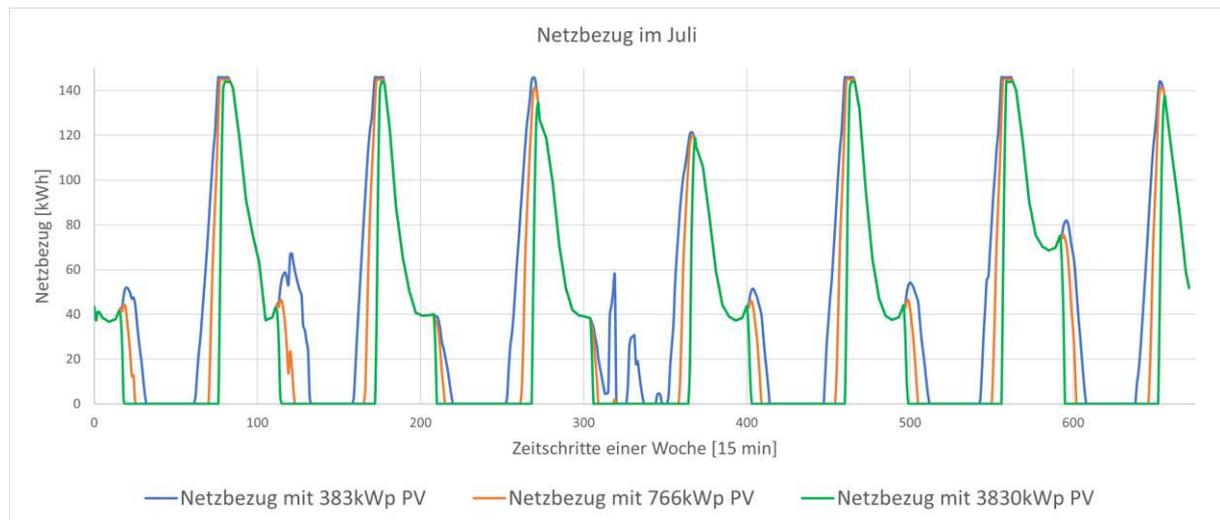


Abbildung 5.10: Netzbezug im Juli mit unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen

Die Erzeugung ist abhängig von der Sonneneinstrahlung. Dies macht es schwierig, den Bezug vom Stromnetz zu verringern, wenn die PV-Anlage keine Energie produziert, unabhängig von ihrer Dimensionierung. Dies trifft insbesondere auf Zeiten zu, in denen keine Stromproduktion stattfindet, wie am Abend und in der Nacht.

Tabelle 5.6: Vergleich der Netzbezüge bei unterschiedlichen Dimensionierungen der PV-Anlagen

	PV-Dimensionierung	Summe Netzbezug (1 Woche)	Mittelwert
Basiskonfiguration	383 kWp	8026 kWh	48 kWh /Tag
Doppelte Leistung der PV-Anlage	766 kWp	6353 kWh	38 kWh /Tag
Zehnfache Leistung der PV-Anlage	3830 kWp	4890 kWh	29 kWh /Tag

Für den Vergleich wird die Summe des Netzbezugs im Juli der Basiskonfiguration von 8026 kWh als Basis genommen. Wenn die Leistung der PV-Anlage verdoppelt wird, können nur 1673 kWh eingespart werden, was nur rund 20 Prozent ausmacht. Dies liegt daran, dass die doppelte PV-Erzeugungsleistung nicht kontinuierlich verfügbar ist, sondern nur zu Mittag. Eine höhere Dimensionierung der PV-Anlage kann die Spitzenverbräuche am Abend nicht ausgleichen. Selbst bei einer zehnfachen Vergrößerung der PV-Anlage können nur 3136 kWh oder rund 39 Prozent eingespart werden.

In Anbetracht dieser Ergebnisse empfiehlt es sich, bei der Basiskonfiguration zu bleiben, um die niedrigsten Anschaffungskosten der PV-Anlage zu erzielen.

5.4 Entscheidungshilfe bei der Konfiguration der Energiegemeinschaft

Das Konzept kann auch dazu verwendet werden, bei der Entscheidungshilfe für die Konfiguration zu helfen. Hier betrachten wir beispielsweise die Basiskonfiguration mit einem gemeinschaftlichen Batteriespeicher. Dieser wird mit einer Verbindung zum Knotenpunkt der Konfiguration aus Abbildung 5.1 im pinken Strombereich angebracht. Abbildung 5.11 zeigt einen Ausschnitt der Basiskonfiguration. Durch das Konzept soll abgeschätzt werden, wie sinnvoll ein Batteriespeicher in der Energiegemeinschaft während des Betriebs ist.

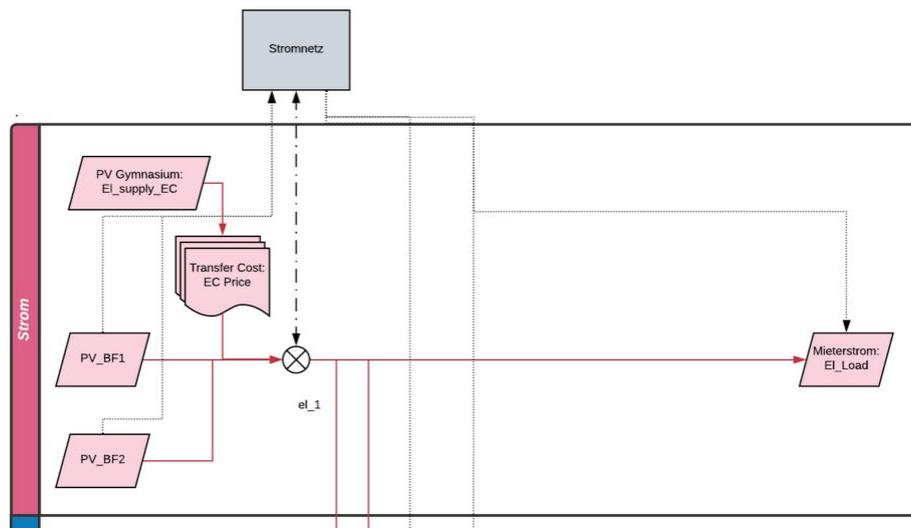


Abbildung 5.11: Ausschnitt der Basiskonifuration

Eine Faustformel besagt, dass die Speicherkapazität eines elektrischen Batteriespeichers in Kilowattstunden zwischen 0,9 bis 1,6 mal der Leistung der Anlage in kWp entsprechen soll [15]. Für diese Konfiguration wurde die Batteriekapazität auf das 1,5-fache der installierten PV-Anlage gesetzt. Seine Kapazität beträgt 544,5 kWh.

Für diesen Durchlauf müssen die Inputdaten angepasst werden. Im Excelfile wird dazu in der Mappe „Components“ ein Batteriespeicher angelegt. Die restlichen Inputdaten bleiben bestehen.

Das Konzept wird anschließend angewendet und die Ergebnisse von BST werden visualisiert. Es werden vier Datensätze verglichen:

- Netzbezug einer Woche im Januar ohne Batteriespeicher
- Netzbezug einer Woche im Januar mit Batteriespeicher
- Netzbezug einer Woche im Juli ohne Batteriespeicher
- Netzbezug einer Woche im Juli mit Batteriespeicher

Die Netzbezüge mit und ohne Batteriespeicher unterscheiden sich nur geringfügig. Tabelle 5.7 zeigt die Summe der Netzbezüge und einen Tagesmittelwert. Die Konfiguration mit einem Batteriespeicher

ermöglicht eine Reduzierung des Strombezugs aus dem Netz, allerdings nicht in einem Ausmaß, das eine Investition in einen Batteriespeicher rechtfertigt. Daher kann in diesem Fall durch dieses Konzept nicht zu einem Batteriespeicher geraten werden.

Tabelle 5.7: Vergleich der Netzbezüge mit unterschiedlichen Konfigurationen

	Summe Netzbezug (1 Woche)	Mittelwert
Januar ohne Batteriespeicher	21247,8 kWp	126,5 kWh /Tag
Januar mit Batteriespeiche	21236,9 kWp	126,4 kWh /Tag
Juli ohne Batteriespeicher	8025,5 kWp	47,8 kWh /Tag
Juli mit Batteriespeicher	8001,9 kWp	47,6 kWh /Tag

5.5 Evaluierung des Konzepts

Durch diese Fallstudie wurde gezeigt, wie das Konzept verwendbar ist. Die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit werden sichtbar. Eine konkrete Energiegemeinschaft wurde dabei analysiert.

Die Anforderungen, dass BIFROST und BST verwendet werden sollen, wurde erfüllt. BIFROST wird für die Erstellung der Inputdaten der PV-Anlagen verwendet. Eine Schnittstelle zum Webservice für BST wurde implementiert. Die Ergebnisdaten von BST können in BIFROST visualisiert werden.

Durch die Konfigurationsmöglichkeiten wurde gezeigt, wie flexibel das Konzept ist. Durch einfache Änderungen über die Benutzeroberfläche in BIFROST, oder der Anpassung der Inputdaten im Excelfile können unterschiedliche Konfigurationen erstellt werden.

Das Konzept kann zur Entscheidungshilfe für die Dimensionierung der Komponenten in einer Energiegemeinschaft verwendet werden. Dargestellt wurde die Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung der PV-Anlagen in der Energiegemeinschaft. Außerdem wurde gezeigt, wie das Konzept bei der Entscheidungsfindung der Komponenten der Konfiguration helfen kann. Die Möglichkeit einen Batteriespeicher hinzuzufügen wurde evaluiert.

5.6 Gewonnene Erkenntnisse

Das Konzept kann als Entscheidungshilfe einer Dimensionierung von PV-Anlagen in einer Energiegemeinschaft verwendet werden. Ein Vorteil des Konzepts ist seine Flexibilität. Es können schnell Alternativen der Dimensionierung der PV-Anlagen in der Energiegemeinschaft erstellt werden.

Zusätzlich kann das Konzept zur Entscheidungsfindung der Konfiguration einer Energiegemeinschaft benutzt werden. In dieser Fallstudie wurde beispielhaft gezeigt, wie ein möglicher elektrischer

Batteriespeicher sich auf den Netzbezug auswirken kann. Durch Anpassung des Excelfiles kann die Energiegemeinschaft mit seinen Komponenten konfiguriert werden.

Ein Limit dieses Konzepts besteht darin, dass ausschließlich die PV-Erzeugungsdaten aus BIFROST generiert werden. Nur diese können einfach in der Benutzeroberfläche geändert werden. Die restlichen Inputdaten werden aus statischen Standardlastprofilen ausgelesen. Um das Konzept zu verbessern, sollte in Zukunft die Integration des Mieterstroms, der Wärme- und Kältelast in BIFROST vorgenommen werden. Die Zeitreihen würden dann direkt aus BIFROST zur Simulationlaufzeit generiert werden. Dies würde eine umfassende Laststeuerung ermöglichen. Da die Daten in BIFROST dynamisch zur Laufzeit erzeugt werden, bietet sich hier auch die Möglichkeit, das Konzept zu erweitern.

Kapitel 6

Conclusio

6.1 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wurde eine Möglichkeit erarbeitet, wie Digitale Zwillinge zur Entscheidungshilfe im Energiemanagement für Energiegemeinschaften eingesetzt werden können. Durch das Konzept der Integration der Tools BIFROST und BST wurde ein Digitaler Zwilling einer Energiegemeinschaft mit optimierten Betriebskosten erstellt. Dieser bietet die Möglichkeit seine Daten in einer Benutzeroberfläche zu visualisieren. Dadurch können verschiedene Konfigurationen betrachtet und verglichen werden, was die Entscheidungsfindung bei der Dimensionierung der Komponenten in der Energiegemeinschaft unterstützt. Vor allem können Entscheidungen über die Dimensionierung einer PV-Anlage in einer Energiegemeinschaft unterstützt werden.

Die Flexibilität der Stellgrößen in einer Energiegemeinschaft wurden erarbeitet. Zu ihnen gehören die Erzeugung der PV-Anlagen, die elektrische Last, die Wärme- und Kältelast, sowie die Wärme- und elektrischen Speicher. Das Ergebnis dieser Arbeit kann bei der Projektierung von Energiegemeinschaften helfen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden die Grundlagen erläutert. Der REST-Architekturstil wurde erklärt. Die Simulationstools BIFROST und BST wurden präsentiert. Zusätzlich wurde der Begriff des Digitalen Zwilling vorgestellt. Danach wurde das Konzept an einem einfachen Beispiel erklärt. Darauf folgte die konzeptionelle Architektur und seine technische Umsetzung. Abschließend wurde in einer Fallstudie das Konzept evaluiert. Durch die Anwendung des implementierten Konzepts auf eine konkrete Energiegemeinschaft wurde die Machbarkeit des Konzepts bestätigt. Durch die Ergebnisse können verschiedene Dimensionierungen von PV-Anlagen einer Energiegemeinschaft verglichen werden.

6.2 Fazit

Die zu Beginn definierten Rahmenbedingungen wurden eingehalten. Die Gebäude der Energiegemeinschaft wurden digital modelliert. Das Konzept der Integration von BIFROST und BST stellt einen Digitalen Zwilling dar, der eine Energiegemeinschaft mit optimierten Betriebskosten modelliert.

Zu den Ergebnissen dieser Diplomarbeit gehört primär das implementierte Konzept. Es wurden zwei Module in BIFROST, eines für die Datenerstellung und eines für die Visualisierung entwickelt. Die Schnittstelle zu BST wurde implementiert. Das Konzept wurde evaluiert und ist verwendbar.

6.3 Ausblick

Eine Erweiterung der Datenerstellung in BIFROST ist geplant. Um das Konzept zu verbessern, sollten in Zukunft alle Zeitreihen für die Inputdaten für BST in BIFROST generiert werden. Dafür müssen Module für die Wärme- und Kältemaschinen in BIFROST entwickelt werden.

Derzeit erfolgt über BIFROST lediglich eine Visualisierung der optimierten Daten von BST. Ein Ziel ist, die optimierten Daten automatisch auszuwerten, eine automatische Entscheidungsfindung zu implementieren und diese mit einer Laststeuerung in der Energiegemeinschaft zu kombinieren.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Grieves, "Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises," *International Journal of Product Development - Int J Prod Dev*, vol. 2, 01 2005.
- [2] T. Fielding, "Architectural styles and the design of network-based software architectures," Ph.D. dissertation, University of California, Irvine, 2000.
- [3] S. Tilkov, *REST und HTTP: Entwicklung und Integration nach dem Architekturstil des Web*. dpunkt-Verl., 2015.
- [4] L. Gupta. (2022) What is REST. Letzter Zugriff: 26.11.2022. [Online]. <https://restfulapi.net/>
- [5] T. D. S. Augsten. (2017) Konzept, Aufbau und Funktionsweise von REST. Letzter Zugriff: 26.11.2022. [Online]. <https://www.dev-insider.de/konzept-aufbau-und-funktionsweise-von-rest-a-603152/>
- [6] W3C-Working-Group. (2004) Web services architecture. Letzter Zugriff: 25.11.2022. [Online]. <https://www.w3.org/TR/ws-arch/wsa.pdf>
- [7] S. Luber. (2017) Was ist eine API? Letzter Zugriff: 26.11.2022. [Online]. <https://www.dev-insider.de/was-ist-eine-api-a-583923/>
- [8] R. Mosshammer, K. Diwold, A. Einfalt, J. Schwarz, and B. Zehrfeldt, "Bifrost: A smart city planning and simulation tool," in *Intelligent Human Systems Integration 2019*, W. Karwowski and T. Ahram, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 217–222.
- [9] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108 952–108 971, 2020.
- [10] M. Grieves, "Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication," 03 2015.
- [11] O. Sauer. (2022) Digitaler Zwilling – das Schlüsselkonzept für Industrie 4.0. Letzter Zugriff: 17.11.2022. [Online]. <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/automatisierung-digitalisierung/anwendungsfelder/digitaler-zwilling.html>

- [12] Siemens. (2022) Digitaler Zwilling. Letzter Zugriff: 13.02.2023. [Online]. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/our-story/glossary/digital-twin/24465>
- [13] T. Kuhn, "Digitaler Zwilling," *Informatik-Spektrum*, vol. 40, no. 5, pp. 440–444, Oct 2017. [Online]. <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2>
- [14] H. Kaindl, M. Vallee, and E. Arnautovic, "Self-representation for self-configuration and monitoring in agent-based flexible automation systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 164–175, 2013.
- [15] D. Bischof. (2019) Die richtige Größe von Batteriespeichern. Letzter Zugriff: 03.02.2023. [Online]. <https://www.energieinstitut.at/die-richtige-groesse-von-batteriespeichern/>
- [16] BDEW. (2017) Standardlastprofile Strom. Letzter Zugriff: 17.11.2022. [Online]. <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>

Glossar

Digitaler Zwilling Digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mithilfe einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den Digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird [13]. 1

Energiesystem Ein Energiesystem ist ein Netzwerk von Anlagen, Geräten und Infrastrukturen, das Energie produziert, verteilt und verbraucht. 1, 9

Erzeugungsprofil Die zeitliche Verteilung der erzeugten Leistung über eine zeitliche Periode. 17, 18, 25, 38, 44

Konfiguration Anordnung der Gebäude und Komponenten mit den Erzeugern, Speicher und Verbrauchern. 18, 24–28, 30, 31, 33, 40, 42, 44, 46, 47, 49

Lastprofil Die zeitliche Verteilung der abgenommenen Leistung über eine zeitliche Periode. Hier handelt es sich um die elektrische Leistung, aber auch um Wärme- und Kältelast. 17, 18

Standardlastprofil Repräsentative Lastprofile, die für die unterschiedlichen Verbrauchergruppen (Haushalt, Landwirtschaft und Gewerbe) angewendet werden [16]. 11, 14, 17, 23, 25, 26, 39, 42, 48

Szenario Ein Szenario beschreibt die Konfiguration der Energiegemeinschaft, seine Verbindungen und Knotenpunkte und setzt fest, welche Zeitreihe für welche Komponente verwendet werden soll. Die Komponenten sind Erzeuger, Speichermöglichkeiten und Verbraucher. 26

Zeitreihe Zeitlich geordnete Daten. Eine Zeitreihe besteht aus relativen Zeitintervallen und Datenpunkten. 11, 17, 18, 20, 23, 25–30, 38, 39, 41, 48, 50

Zeitschritt Zeitlicher Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden berechneten Zuständen. Hier wird ein Zeitschritt zum Beispiel mit einem 15 Minuten Takt angegeben. 16, 17, 25–27, 30, 39, 40, 43, 44

Abkürzungsverzeichnis

API Application Programming Interface. 5, 8

BST Business Simulation Tool. 2, 5, 11, 14–16, 18–20, 23–31, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 49, 50

CSV Comma-separated values. 29

HTTP Hypertext Transfer Protocol. 5–9

ICT Institut für Computertechnik. vii, 2

JSON JavaScript Object Notation. 7, 9, 28, 29, 41

PV Photovoltaik. 1, 2, 15–20, 23, 25–30, 38

REST Representational State Transfer. 2, 5–11, 24, 27, 41

URI Uniform Resource Identifier. 7

URL Uniform Resource Locator. 8

XML Extensible Markup Language. 7