

Modellierung und Optimierung eines Lademanagementsystems an der DHBW Karlsruhe

—

Studienarbeit

für die Prüfung zum

Bachelor of Science

des Studienganges Informatik

an der

Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe

von

Lucie Weber

| | |
|-------------------------------|--------------------------|
| Abgabedatum | 16.05.2022 |
| Bearbeitungszeitraum | 300h |
| Matrikelnummer | 5691176 |
| Kurs | tin19B4 |
| Gutachter der Studienakademie | Prof. Dr. Heinrich Braun |

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema: "Modellierung und Optimierung eines Lademanagementsystem an der DHBW Karlsruhe" selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Ort Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung und Optimierung eines Lademanagement-Systems für die Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Karlsruhe. Die Idee ist den Stromeigenverbrauch an der Hochschule durch den Einsatz einer Solaranlage zu decken. Damit der überschüssige Solarstrom kosteneffizient genutzt wird, soll ein Ladesystem für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) in der Parkgarage der DHBW installiert werden. Ziel des Lademanagement-Systems ist die verlustfreie und faire Verteilung des überschüssigen Solarstroms. Zur Umsetzung dieser Ziele wird ein Lademanagement-Algorithmus entwickelt. Das Konzept des Algorithmus beruht auf einer Kombination aus dem Wartelisten-Prinzip und der Prognoserechnung. Die Prognose berechnet den fairen Solarenergie-Anteil für jedes BEV. Innerhalb der Arbeit wird der Algorithmus über eine passende Simulationsumgebung getestet und anschließend bewertet. Die Fairness des Algorithmus wird zudem diskutiert und weitere Optimierungsansätze angeführt.

Abstract

This thesis deals with the modeling and optimization of a charging management system for the Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Karlsruhe. The idea is to cover the electricity self-consumption at the university by using a solar system. In order to use the surplus solar power in a cost-efficient way, a charging system for battery-powered electric vehicles (BEVs) will be installed in the parking garage of the DHBW. The goal of the charging management system is to distribute surplus solar power in a loss-free and fair manner. A charging management algorithm is being developed to implement these goals. The concept of the algorithm is based on a combination of the waiting list principle and forecasting. The forecasting calculates the fair solar energy share for each BEV. Within the thesis, the algorithm is tested via a suitable simulation environment and then evaluated. The fairness of the algorithm is also discussed and further optimization approaches are indicated.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Motivation | 1 |
| 1.3 | Ziel | 2 |
| 1.4 | Vorgehensweise | 2 |
| 1.5 | Abgrenzung zu Verwandten Arbeiten | 3 |
| 2 | Theoretische Grundlagen | 4 |
| 2.1 | Dimensionierung und Leistung einer Solaranlage | 4 |
| 2.1.1 | Standort Eignung DHBW Karlsruhe | 5 |
| 2.2 | BEV | 5 |
| 2.2.1 | Definition BEV (Battery Electric Vehicle) | 6 |
| 2.2.2 | Ladeleistung BEV | 6 |
| 2.3 | Definition Fairness | 6 |
| 3 | Vorstellung der Lademanagement-Simulation | 7 |
| 3.1 | Ziele der Lademanagement-Simulation | 7 |
| 3.2 | Simulationsvereinfachungen | 8 |
| 4 | Technische Umsetzung | 9 |
| 4.1 | Entwicklungsumgebung Algorithmus | 9 |
| 4.2 | Simulationsumgebung | 9 |
| 4.3 | Schnittstelle zum Einlesen der Datensätze | 10 |
| 4.4 | Visualisierung | 11 |
| 5 | Vorstellung Lademanagement-Algorithmus | 13 |
| 5.1 | Ziele des Lademanagement-Algorithmus | 13 |
| 5.1.1 | Fairness | 13 |
| 5.1.2 | Lade-Wahrscheinlichkeit Solarenergie | 15 |
| 5.1.3 | Ungenutzte Solarenergie | 15 |
| 5.2 | Entwicklungsschritte | 16 |
| 5.3 | Idee des Algorithmus | 16 |
| 5.4 | Ablauf und Formalisierung des Algorithmus | 17 |
| 5.4.1 | Initialisierung | 18 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.4.2 | Prognose Berechnung | 19 |
| 5.4.3 | Ladezeit-Einplanung über Warteliste | 19 |
| 5.4.4 | Nachoptimierung | 23 |
| 6 | Auswertung Algorithmus und Diskussion | 25 |
| 6.1 | Simulationseingangsdaten zur Ergebnisauswertung | 25 |
| 6.2 | Parameter zur Ergebnisauswertung | 27 |
| 6.3 | Darstellung der Ergebnisse | 28 |
| 6.4 | Auswertung und Analyse der Ergebnisse | 30 |
| 6.4.1 | Fairness | 30 |
| 6.4.2 | Lade-Wahrscheinlichkeit Solarenergie | 31 |
| 6.4.3 | Ungenutzte Solarenergie | 33 |
| 6.5 | Diskussion der Fairness des Algorithmus | 34 |
| 7 | Reflexion und Ausblick | 35 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 35 |
| 7.2 | Ausblick | 36 |
| 7.2.1 | Erweiterung der Simulation | 36 |
| 7.2.2 | Optimierungen des Algorithmus | 37 |
| 7.2.3 | Überprüfung der Rentabilität einer Solaranlage an der DHBW Karlsruhe | 38 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Einstrahlungskategorie mit Legende | 5 |
| 2 | Simulationsparameter Schnittstelle im Jupyter Notebook | 10 |
| 3 | Umsetzung der Tabellarischen Übersicht des Park- und Ladeverlaufs der BEVs | 11 |
| 4 | Umsetzung des Diagramms zur Übersicht der Aufteilung der Ladezeiträume unter den BEVs | 12 |
| 5 | Interaktives Diagramm zum Anzeigen der Simulations Eingangsdaten | 12 |
| 6 | Ausgabe-Tabelle Lademanagementsimulation Parkzeiten | 19 |
| 7 | Simulationseingangsdaten | 26 |
| 8 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten | 27 |
| 9 | Ausgabe Ergebnisse | 29 |
| 10 | Ausgabe Abweichung A | 29 |
| 11 | Gleichmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten | 32 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 6.1 | Ergebnisse Lademanagement-Algorithmus | 30 |
| 6.2 | Lade-Wahrscheinlichkeit bei gleichmäßigerer Verteilung der Ankunftszeiten . | 32 |

Nomenklatur Variablen

| | |
|-------|--|
| A | Abweichung vom fairen Solarenergie-Anteil in % |
| D_L | Durchschnittliche Aufladung in kWh |
| E_G | Geladene Solarenergie in kWh |
| E_L | Ladeende |
| E_P | Parkzeit-Ende |
| E_R | Restladeenergie in kWh |
| E_U | Ungenutzte Solarenergie in kWh |
| E_V | Verfügbare Solarenergie in kWh |
| F | Fairer Solarstrom-Anteil in kWh |
| G | Geladener Solarstrom-Anteil in kWh |
| i | Interpolationsintervall in min |
| L_V | Verfügbare Solarleistung in kW |
| N | Anzahl BEVs insgesamt |
| N_G | Anzahl geladene BEVs |
| N_L | Anzahl ladender BEVs |
| N_P | Anzahl parkender BEVs |
| p_L | Lade-Wahrscheinlichkeit in % |
| R_L | Restladedauer in min |

| | |
|---------|-----------------------------|
| R_P | Restparkdauer in min |
| S_L | Ladestart |
| S_P | Parkzeit-Start |
| Sim_E | Simulationsende |
| Sim_S | Simulationsstart |
| t | aktueller Zeitpunkt in min |
| t_k | kommender Zeitpunkt in min |
| T_L | Ladedauer in min |
| T_P | Parkdauer in min |
| t_v | vorheriger Zeitpunkt in min |

Abkürzungsverzeichnis

BEV Battery Electrical Vehicle

DHBW Duale Hochschule Baden-Württemberg

KIT Karlsruher Institut für Technologie

kW Kilowatt

kWh Kilowattstunden

kWp Kilowatt-Peak

min Minuten

W Watt

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Mit der wachsenden Bevölkerungszahl und der voranschreitenden Digitalisierung steigt zunehmend die Nachfrage nach Strom. Fossile Energiequellen wie Erdgas, Kohle und Erdöl sind endliche Ressourcen, die bei ihrer Nutzung zu hohen CO₂-Emissionen führen. Damit werden neue Lösungen für eine klimafreundliche Zukunft benötigt - regenerative Ressourcen. Diese werden aus den sogenannten erneuerbaren Energien, wie Sonnen-, Wind- und Wasserkraft, gewonnen. [1]

Mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien entstehen neue Herausforderungen für das Stromnetz. Die Schwankung der Stromerzeugung durch erneuerbare Energieträger ist sehr hoch. Damit das Stromnetz zukünftig weiterhin stabil und zuverlässig bleibt, werden Konzepte wie das der Smart Grids (engl.: intelligente Stromnetze) entwickelt. Diese sollen die Frequenz regulieren, die Spannung stabilisieren und Spitzenlasten abbauen. Zusätzlich sollen sie dem Stromnetz für erneuerbare Energien schnelle Ausgleichsleistungen bieten. [2] Eine mögliche Ausgleichsleistung ist das Laden von Elektrofahrzeugen.

1.2 Motivation

Die Idee ist zukünftig den Stromeigenverbrauch der DHBW Karlsruhe über den Solarertrag einer Solaranlage zu decken. Dabei gibt es viele schwankende Faktoren. Die Sonneneinstrahlung ändert sich beispielsweise nicht nur im Tagesverlauf, sondern ebenfalls im Jahresverlauf. Im Winter steht die Sonne tiefer und damit ist auch die Sonneneinstrahlung geringer als im Sommer. Zudem variiert auch der Eigenstromverbrauch im Tagesverlauf. Diese schwankenden Faktoren sorgen

dafür, dass es in einem solchen System unregelmäßig überschüssige Solarenergie gibt. Diese überschüssige Solarenergie der Solaranlage kann beispielsweise ins Stromnetz eingespeist werden. Die Einspeisung ins Stromnetz bringt jedoch nicht viel Gewinn, weshalb eine kosteneffizientere Lösung gesucht wird. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Pufferspeichern. Diese haben wiederum hohe Kosten in der Anschaffung. Ein anderer Ansatz ist ein Lademanagement-System für Elektrofahrzeuge in der Parkgarage der DHBW Karlsruhe anzubieten und die Batterie der Elektrofahrzeuge als „Pufferspeicher“ zu verwenden. Diese Idee basiert auf der Annahme, dass die Verkehrswende in den nächsten Jahren kommt. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig Dozierende, Mitarbeitende und Studierende der DHBW Karlsruhe mit längerem Anfahrtsweg, anstelle eines herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor, ein Elektrofahrzeug als Anfahrtsmittel wählen. Der Ansatz des Lademanagement-Systems soll Grundlage dieser Arbeit sein.

1.3 Ziel

Ziel der Arbeit ist es das oben beschriebene Lademanagement-System zum Laden von Elektroautos durch Solarstrom zu modellieren und ein Algorithmus zur Verteilung des Solarstroms zu implementieren. Dafür soll eine Simulationsumgebung bereitgestellt werden, die das Einlesen der Simulationsparameter, das Ausführen des Algorithmus und dessen Visualisierung ermöglicht. Die Ergebnisse sollen auf einer grafischen Oberfläche ausgegeben werden und anhand geeigneter Diagramme aufgezeichnet werden. Ziel des Algorithmus ist eine verlustfreie und faire Verteilung des Solarstroms.

Neben der Implementierung liegt das Hauptaugenmerk der Arbeit auf der Einhaltung der Fairness und der Effektivität des Algorithmus. Dafür werden entsprechende Parameter aufgestellt. Nach Fertigstellung der Simulation sollen diese Parameter durch passende Simulationstestdurchläufe geprüft und analysiert werden.

1.4 Vorgehensweise

Zuerst werden passende Technologien für die Simulationsumgebung recherchiert und ausgewählt. Im zweiten Schritt wird die Simulationsumgebung mittels der gewählten Technologien implementiert. Dazu gehört eine Schnittstelle zum Einlesen von Simulationsdateien, das Eingeben von Simulationsparametern, die Ausführungsmöglichkeit des Algorithmus und die Möglichkeit zur Erstellung von Diagrammen.

Danach soll ein erster einfacher Algorithmus implementiert werden, der dann stückweise opti-

miert wird.

Zuletzt folgt die Durchführung der Simulationstestdurchläufe und die Auswertung der Ergebnisse.

1.5 Abgrenzung zu Verwandten Arbeiten

Die Idee der Lademanagement Optimierung für Elektrofahrzeuge ist nicht neu. Sarah Detzler beschäftigte sich bereits 2016 in ihrer Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit dem *Lademanagement für Elektrofahrzeuge* [3]. Der Fokus ihrer Arbeit liegt auf der Ladeoptimierung gegen den Strompreis und der optimierten Berechnung der Ladepläne auf Basis von Lastgrenzen [3]. Im Gegensatz dazu beschäftigt sich die vorliegende Arbeit hauptsächlich mit der Ladeoptimierung in Bezug auf die Fairness der Solarenergieverteilung. Das Lademanagment-System dieser Arbeit ist desweiteren an den Kontext und die Rahmenbedingungen der DHBW Karlsruhe geknüpft. Das in [3] vorgestellte System ist spezialisiert auf Privatkunden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen für das Verständnis des Aufbaus und der Durchführung der Simulation geschaffen werden. Dazu gehört das Basiswissen über die Dimensionierung einer Solaranlage und den Ladeprozess eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs (BEV). Der Begriff des BEV wird erläutert und die Bedeutung der Technologie für die Simulation herausgearbeitet. Im letzten Abschnitt wird die Fairness definiert, um im späteren Verlauf der Arbeit faire Kriterien für den Lademanagement-Algorithmus herausarbeiten zu können.

2.1 Dimensionierung und Leistung einer Solaranlage

Für die Dimensionierung muss die benötigte Leistung der Solaranlage berechnet werden. Die Leistung einer Solaranlage wird in Kilowatt-Peak (kWp) angegeben. Kilowatt-Peak ist keine normgerechte Maßeinheit, sondern beschreibt die Nennleistung einer Solaranlage, also wie viel Kilowatt (kW) unter genormten Testbedingungen erbracht werden. Sie gibt an, welche Höchstleistung in Kilowatt eine Solaranlage unter Standardbedingungen erbringen kann [4]. Eine 1 kWp Solaranlage mit Standort in Deutschland kann im Durchschnitt etwa 1.000 kWh jährlich erzeugen. Das sind 2,7 kWh pro Tag. Kilowattstunden (kWh) sind eine Maßeinheit für Energie und geben den Stromertrag einer Solaranlage an. Eine Kilowattstunde entspricht der Energie, die eine Solaranlage mit der Leistung von 1 kW in einer Stunde erzeugen kann [5]. Mit 1 kWh kommt ein Elektrofahrzeug ungefähr 6km weit [6].

Zur Erläuterung der Berechnung der Dimensionierung einer Solaranlage soll ein Beispiel durchgerechnet werden. Soll eine Solaranlage durchschnittlich 800 kWh Energie am Tag liefern, sind das $800 \text{ kWh} \cdot 365 = 292\,000 \text{ kWh}$ jährlich. Demnach müsste die Solaranlage eine Nennleistung von 292kWp haben. Ausgehend davon, dass 6m² Solarzellen einen Ertrag von

1kWp erbringen, bedeutet das, dass die Solaranlage $292 \cdot 6m^2 = 1752 m^2$ Fläche benötigt.

2.1.1 Standort Eignung DHBW Karlsruhe

Ob sich eine Solaranlage rentiert, hängt überwiegend vom Standort und der Dachausrichtung ab. Da die DHBW Karlsruhe ein Flachdach hat, ist die Dachausrichtung in dem Fall irrelevant. Nach den Daten der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg ist das Dach der DHBW Karlsruhe der Einstrahlungskategorie „sehr hohe Einstrahlung“ (siehe Abbildung 1) zugeordnet und ist damit sehr gut geeignet für die Verwendung einer Solaranlage als Stromlieferant. Mit einer Dachfläche von ungefähr $3700m^2$ könnte eine Solaranlage mit maximal 334 kWp installiert werden [7].

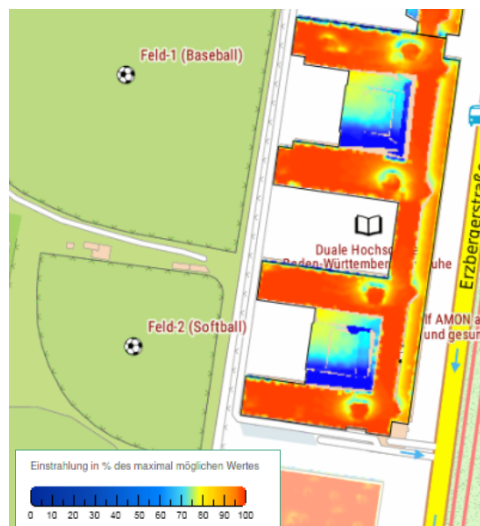


Abbildung 1: Einstrahlungskategorie mit Legende
[7]

2.2 BEV

Vor der Auseinandersetzung mit dem Ladeprozess eines Battery Electrical Vehicle (BEV), sollte zunächst definiert werden was unter dem Begriff des BEVs und seiner Ladeleistung verstanden wird.

2.2.1 Definition BEV (Battery Electric Vehicle)

In dieser Arbeit wird durchgängig zur Umschreibung der Fahrzeuge der Kund:innen des Lademanagement-Systems der Begriff des BEVs verwendet. Ein BEV (deutsch: batteriebetriebenes Elektrofahrzeug) ist ein reines Elektrofahrzeug, das ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet ist. Es erhält seine Energie aus der Batterie des Fahrzeuges, die über das Stromnetz aufgeladen wird. Die Abkürzung BEV stammt von dem Englischen Begriff „Battery Electric Vehicle“ und hat sich mittlerweile auch im Deutschen eingebürgert [8].

2.2.2 Ladeleistung BEV

Die Ladeleistung des BEV spielt für die Dauer eines Ladevorgangs eine entscheidende Rolle. Je größer die Ladeleistung des Fahrzeugs und der Ladestation, desto schneller lädt das Elektroauto. Die Ladeleistung wird in Kilowatt (kW) angegeben und hängt von zwei Faktoren ab. Zum Einen von der Ladeleistung, die durch das interne Ladegerät des Elektroautos abgerufen werden kann und die von der Ladeelektronik gesteuert wird. Zum Anderen von der maximalen Ladeleistung der Ladestation. Mit welcher Ladung tatsächlich geladen wird ist abhängig davon welcher der beiden Faktoren eine geringere Ladeleistung bereitstellt [9].

Da in der Lademanagement-Simulation für die DHBW Karlsruhe von einer geringen Ladeleistung des Ladepunktes auszugehen ist, ist die Ladeleistung der Ladestation maßgebend für die Ladeleistung des BEVs sein.

2.3 Definition Fairness

Bevor Fairness in Bezug auf Lademanagement-Algorithmen definiert wird, soll zuerst der grundlegende Begriff der Fairness geklärt werden. Der Duden definiert Fairness als „anständiges Verhalten“ beziehungsweise als „gerechte, ehrliche Haltung andern gegenüber“ [10]. Das Cambridge Dictionary beschreibt in Fairness zu handeln damit, alles zu berücksichtigen, was sich auf eine Situation auswirkt, damit ein gerechtes Urteil gefällt werden kann [11]. Der allgemeine Begriff der Fairness ist demnach nicht auf klare Richtlinien zurückzuführen, sondern hängt von der Auslegung und des Gerechtigkeitssinns der jeweiligen Person ab.

Bezüglich Fairness im Zusammenhang mit Lademanagement-Algorithmen finden sich in der Literatur keine Definitionen oder Kriterien. Deshalb wird in Kapitel 5 bei der Vorstellung des Lademanagement-Algorithmus das Kriterium der Fairness in Abschnitt 5.1.1 definiert.

Kapitel 3

Vorstellung der Lademanagement-Simulation

In diesem Kapitel wird das Lademanagement-System mit seinen Zielen und Vereinfachungen vorgestellt. Dieses Kapitel ist eine theoretische Beschreibung des Systems. Die technische Umsetzung der Simulation folgt in Kapitel 4.

3.1 Ziele der Lademanagement-Simulation

In der Einleitung wurde bereits die Motivation für ein Lademanagement-System an der DHBW Karlsruhe geschildert (vgl. Abschnitt 1.2). Jetzt sollen die Ziele des Lademanagement-Systems vorgestellt werden.

Das Hauptziel des Lademanagement-Systems besteht darin, die überschüssige Solarenergie fair zu verteilen, damit die BEV-Kund:innen zufrieden sind und weiterhin den Solarstrom an der DHBW Karlsruhe zum Aufladen ihrer Akkus verwenden wollen. Pro BEV soll die Aufladung 2 - 10kWh betragen, damit die Kund:innen ungefähr ihren einfachen Anfahrtsweg zur DHBW Karlsruhe abdecken können. Die maximale Ladeleistung pro BEV soll 11kW betragen. Eine geringere Ladeleistung würde sich nicht lohnen, da bei der Aufladung über die Verlustleistung bereits ein Teil der Ladeleistung verloren gehen. Des Weiteren soll das parallele Laden von 1-5 BEVs möglich sein.

3.2 Simulationsvereinfachungen

Der erste Schritt bei der Modellierung eines komplexen Systems sind die Vereinfachungen die aus der Realität ein Modell machen. Für die Lademanagement-Simulation sollen die nachfolgenden Vereinfachungen und Abstraktionen der Realität durchgeführt werden.

Betrachtet wird in der Simulation als Bezugsgröße ein durchschnittlicher Sonneneinstrahlungstag im Frühjahr oder Herbst. Somit muss weder das Maximum der Sonneneinstrahlung im Sommer oder das Minimum der Sonneneinstrahlung im Winter berücksichtigt werden. Die Ertragsspitzen im Sommer können beispielsweise über den Einsatz von Klimaanlage geglättet werden.

Zudem wird die Modellierung auf einen Hochschultag unter der Woche beschränkt. Am Wochenende könnte der Solarstrom verbilligt an BEVs verkauft werden, die das Parkhaus der DHBW Karlsruhe als Stellplatz verwenden. Eine weitere Option wäre am Wochenende Carsharing-Unternehmen die Möglichkeit zu geben, ihre BEVs über das Lademanagement-System zu laden.

Eine weitere Vereinfachung ist die Nicht-Beachtung der Batterieladung. Im Modell ist die Batterie der BEVs unendlich groß, sodass der berechnete Auflade-Anteil immer wahrgenommen werden kann.

Die BEVs sollen nur einmal geladen werden, da zu jedem Start der Aufladung eine manuelle Bestätigung erforderlich ist. In der Simulation werden des Weiteren keine Kurz-Parker modelliert, die beispielsweise nur 10-30 Minuten parken. Die BEVs im Modell parken 3-8 Stunden lang. In der Realität sind solche Kurz-Parkzeiten durchaus denkbar, wenn beispielsweise unerwarteterweise eine Vorlesung ausfällt und die Studierenden das Gelände der DHBW unmittelbar wieder verlassen.

Die folgenden zwei Vereinfachungen der Lademanagement-Simulation sollen ebenfalls die Entwicklung des Algorithmus erleichtern. Die erste Vereinfachung gibt vor, dass die zu einem festen Zeitpunkt verfügbare Solarenergie in gleichen Anteilen unter den ladenden BEVs verteilt wird. Die zweite Vereinfachung beschäftigt sich mit der Interpolation der Werte der verfügbaren Solarenergie. Anstatt zu jedem Zeitpunkt die exakt verfügbare Solarenergie zu ermitteln, werden die Werte zwischen einem fest vorgegebenen Intervall, dem Interpolationsintervall i , interpoliert. Bei der Implementierung der Lademanagement-Simulation wird die lineare Interpolation angewendet. Das heißt es wird immer der Wert in der Mitte des Intervalls zur Festlegung der verfügbaren Solarenergie im Intervall gewählt.

Kapitel 4

Technische Umsetzung

Dieses Kapitel widmet sich den gewählten Technologien für die Umsetzung der Lademanagement-Simulation. Jede Technologie wird kurz vorgestellt und es wird erläutert warum die Entscheidung auf diese gefallen ist.

4.1 Entwicklungsumgebung Algorithmus

Als Implementierungssprache für den Algorithmus wird die Sprache *Python* verwendet. Python ist eine interpretierte, interaktive, objektorientierte Programmiersprache. Des Weiteren unterstützt Python die prozedurale und funktionale Programmierung. Ein Grund für die Verwendung von Python ist die Portabilität. Python läuft auf vielen Unix-Varianten, darunter Linux und macOS, und auf Windows [12]. Ein weiterer Vorteil von Python birgt sich in den zahlreichen Bibliotheken, die zur Verfügung stehen. Bereits die Standard-Bibliothek von Python bringt eine Vielzahl an mathematischen Funktionen mit sich. Zur Umsetzung der linearen Interpolation wird die Bibliothek *Scipy* und zur automatischen Generierung der Parkzeiten der BEVs die Bibliothek *Numpy* verwendet. Als Entwicklungsumgebung wird *Pycharm* eingesetzt.

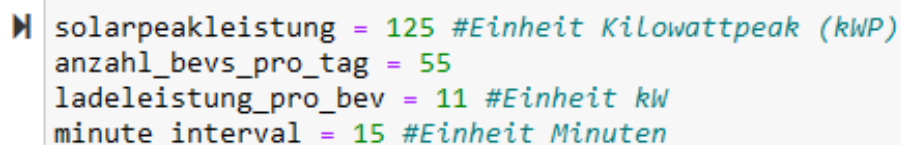
4.2 Simulationsumgebung

Bei der Auswahl der Technologie für die Simulationsumgebung ist darauf zu achten, dass diese ohne großen Aufwand von anderen Personen installiert oder ausgeführt werden kann, dass die Lademanagement-Simulation einfach zu bedienen ist und dass sie einen effizienten Überblick über die Ergebnisse liefert.

Eine verbreitete Open-Source-Anwendung für die Datenwissenschaft und -simulation ist die

webbasierte Client-Server-Anwendung *Jupyter Notebook*. Sie wird vom Project Jupyter entwickelt und betreut. Ein Jupyter Notebook wird standardmäßig mit einem Python Kernel betrieben und eignet sich deshalb besonders für die Programmierung mit Python. Ein Jupyter Notebook wird aus verschiedenen Bausteinen zusammengebaut, den sogenannten Zellen. Diese Zellen können ausführbaren Code oder erklärenden Text enthalten. Eine Zelle lässt sich schnell hinzufügen oder entfernen. Jede Zelle kann einzeln oder mit allen Zellen zusammen ausgeführt werden.

Die Anforderungen des Lademanagement-Systems an die Simulationsumgebung werden durch den Einsatz von Jupyter Notebook erfüllt. Über die Möglichkeit der Manipulation der Zellen kann eine Schnittstelle zur Eingabe beziehungsweise Veränderung der Simulationsparameter bereitgestellt werden (siehe Abbildung 2). Die Möglichkeit zur Visualisierung des Algorithmus ist durch die Unterstützung von Grafik-Bibliotheken gegeben. Ebenso ist das Kriterium für die Installation ohne großen Aufwand erfüllt. Jupyter Notebooks lassen sich einfach teilen, entweder durch exportieren des Jupyter-Dokumentes als HTML-, PDF-, Markdown- oder Python-Dokumente oder das Jupyter-Notebook wird per E-Mail, GitHub oder dem sogenannten Jupyter Notebook Viewer geteilt [13].



```
solarpeakleistung = 125 #Einheit Kilowattpeak (kWp)
anzahl_bevs_pro_tag = 55
ladeleistung_pro_bev = 11 #Einheit kW
minute_interval = 15 #Einheit Minuten
```

Abbildung 2: Simulationsparameter Schnittstelle im Jupyter Notebook

4.3 Schnittstelle zum Einlesen der Datensätze

Damit die Lademanagement-Simulation flexibel anpassbar bleibt, sollen die benötigten Datensätze für die Simulation in Dateien gespeichert werden können. Zu den Simulationseingangsdaten gehören folgende Datensätze:

- Tagesverlauf der Sonneneinstrahlung in Karlsruhe
- Stromeigenverbrauch der DHBW Karlsruhe
- Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Ankunftszeit von BEVs im Tagesverlauf

Die Simulationseingangsdaten werden in Excel-Dateien gespeichert und mithilfe der Bibliothek *Pandas* in den Programmcode eingelesen. Anschließend werden die eingelesenen Datensätze ebenfalls mit der Hilfe von *Pandas* in ein für den Algorithmus verwendbares Datenformat gebracht.

4.4 Visualisierung

Zur Visualisierung des Algorithmus wird eine Tabelle ausgegeben, die die Daten für die sich in der Simulation befindenden BEVs anzeigt (siehe Abbildung 4). Über einen Schieberegler kann der Tagesverlauf der Simulation manuell nachgestellt werden. Der Schieberegler ermöglicht über die Simulationsintervalle zu wandern und schickt Events zum zeitgleichen rendern der passenden Tabelle zum entsprechenden Zeitpunkt. Außerdem wird ein Diagramm erstellt, dass die Ladeleistung pro Ladezeitraum eines BEVs angibt und die verschiedenen Ladezeiträume über- und nebeneinander stapelnd unter die Kurve der verfügbaren Solarleistung legt (siehe Abbildung 3).

Für die Umsetzung dieser Anforderungen ist die Open Source Grafik-Bibliothek *Plotly* ausgewählt worden. Mit *Plotly Python* sind die Diagramme dieser Arbeit und der Simulation erstellt. Mit Hilfe von *Plotly Dash* ist die interaktive Auswahl über Checkboxes der Simulationseingangsdaten umgesetzt (siehe Abbildung 5).

Tabellarische Übersicht Park- und Ladeverlauf der BEVs

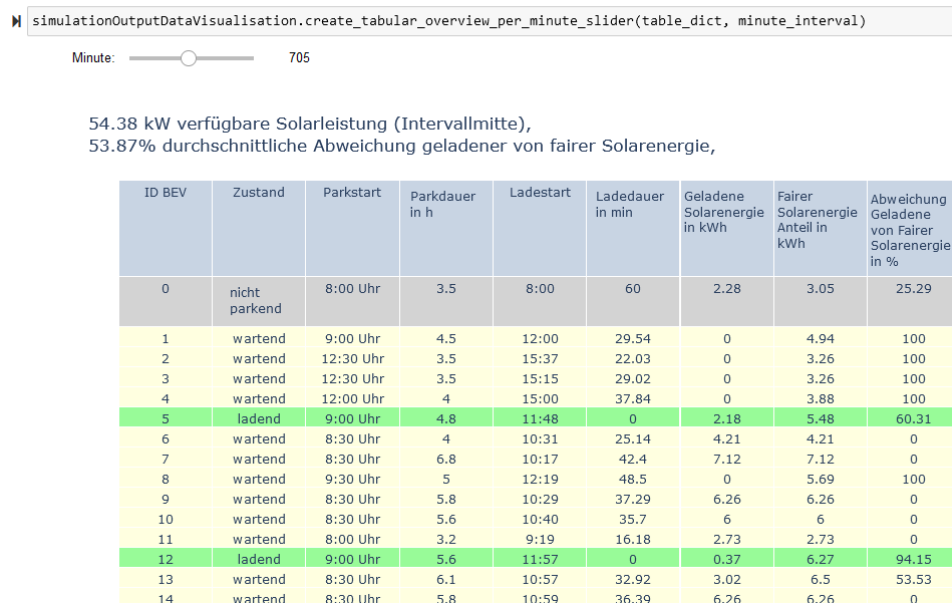


Abbildung 3: Umsetzung der Tabellarischen Übersicht des Park- und Ladeverlaufs der BEVs

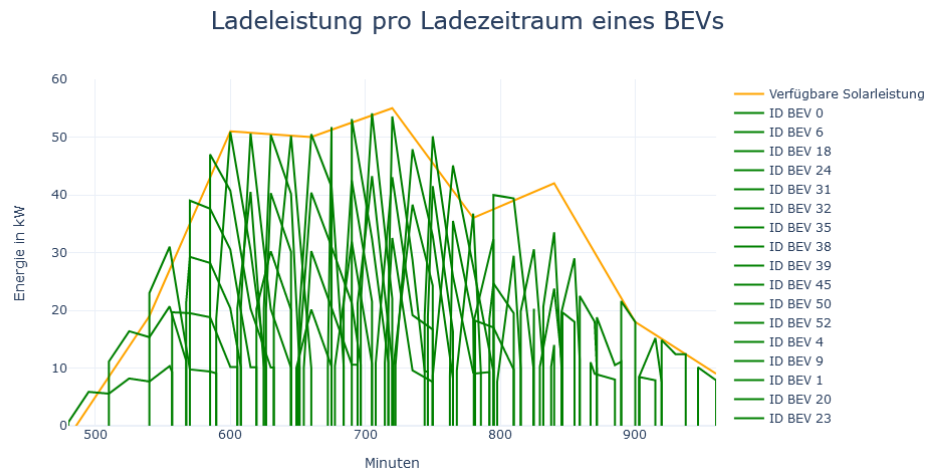


Abbildung 4: Umsetzung des Diagramms zur Übersicht der Aufteilung der Ladezeiträume unter den BEVs

Simulations Eingangsdaten

```
import simulationInputDataVisualisation
simulationInputDataVisualisation.create_jupyter_dash_app(solarpeakleistung)
```

☐ Solarleistung ☒ Stromeigenverbrauch DHBW Karlsruhe ☒ Verfügbare Solarleistung

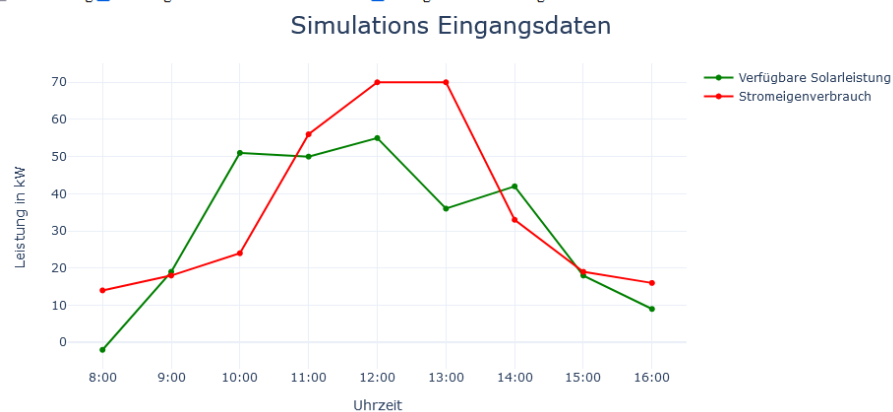


Abbildung 5: Interaktives Diagramm zum Anzeigen der Simulations Eingangsdaten

Kapitel 5

Vorstellung

Lademanagement-Algorithmus

In diesem Kapitel soll der Lademanagement-Algorithmus vorgestellt werden. Zuerst werden die Ziele des Algorithmus aufgezeigt, anhand derer Parameter für die anschließende Analyse in *Kapitel 6 Auswertung Algorithmus und Diskussion* aufgestellt werden. Hinführend zum finalen Lademanagement-Algorithmus der Arbeit werden die Entwicklungsschritte skizziert. Es folgt die Beschreibung des Konzeptes und der Idee des Algorithmus, bevor dieser formal dargestellt wird.

5.1 Ziele des Lademanagement-Algorithmus

Aus den Zielen der Lademanagement-Simulation (vgl. Abschnitt 3.1) lassen sich konkrete Ziele für den Lademanagement-Algorithmus ableiten. Neben dem Hauptziel der Fairness sind das, eine hohe Wahrscheinlichkeit Solarenergie zu laden und ein minimaler Betrag der ungenutzten Solarenergie.

5.1.1 Fairness

Das zentrale Ziel dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Erstellen eines fairen Lademanagement-Algorithmus. In Abschnitt 2.3 wurde Fairness definiert. Nun soll dargelegt werden, was Fairness konkret für den Algorithmus bedeutet.

Der Algorithmus ist fair, wenn ein BEV genau seinen berechneten fairen Solarenergie-Anteil erhält. Eine Ausnahme tritt nur in dem Fall ein, wenn kein weiteres BEV parallel zu dem betrachteten BEV lädt. Dann bekommt dieses BEV mehr als seinen versprochenen fairen

Anteil, um das Ziel des minimalen Betrags der ungenutzten Solarenergie nicht zu verletzen (vgl. 5.1.3). In diesem Fall ist der Algorithmus auch fair, wenn das BEV mehr als seinen versprochenen Anteil erhält.

Als Parameter für die Fairness soll die Abweichung A in % der tatsächlich geladenen Solarenergie G von dem fairen Solarenergie-Anteil F berechnet werden.

$$A = \frac{|G - F|}{F} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Der faire Solarenergie-Anteil F in Kilowattstunden (kWh) kann vereinfacht als Summe der für ein BEV verfügbaren Solarenergie über der Parkzeit mit Parkzeit-Start S_P und Parkzeit-Ende E_P berechnet werden. Sollte der Parkzeit-Start S_P oder das Parkzeit-Ende E_P außerhalb des Simulationszeitraumes liegen, wird der jeweilige Wert mit dem Start oder dem Ende des Simulationszeitraumes überschrieben. Der Parkzeit-Start S_P und das Parkzeit-Ende E_P müssen als Zeitintervall-Nummer notiert werden, damit sie als Grenzen der Summenfunktion gesetzt werden können. Jeder Nummer t_k wird ausgehend vom Simulationsstart Sim_S eine Uhrzeit im Abstand vom Interpolationsintervall i zugeordnet. Dadurch ergibt sich folgende Zahlenreihe:

$$\begin{aligned} t_0 &= Sim_S \\ t_{k+1} &= t_k + i \\ \text{mit } k &= 0, 1, 2, \dots, (Sim_E - Sim_S) \cdot \frac{60}{i} - 1 \end{aligned}$$

Zur Umwandlung des Parkzeit-Starts S_P und des Parkzeit-Endes E_P muss der entsprechende t-Wert aus der Zeitintervall-Nummerierung rausgesucht werden, der dem Wert von S_P bzw. E_P entspricht. Der Wert des Indizes des t-Wertes ist der neue Zeitintervall codierte Wert $z(S_P)$ bzw. $z(E_P)$.

Die verfügbare Solarenergie eines BEVs berechnet sich, indem die für das Zeitintervall i zum Zeitpunkt t verfügbare Solarleistung $L_V(t)$ durch die Anzahl parkender BEVs $N_P(t)$ im Zeitintervall i zum Zeitpunkt t geteilt wird. Zur Umrechnung des Solarleistungs-Anteils in kW in den Solarenergie-Anteil in kWh wird dieser mit dem in Stunden umgerechneten Zeitintervall i multipliziert. Es ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des fairen Solarenergie-Anteils F :

$$F = \sum_{t=z(S_P)}^{z(E_P)} \frac{L_V(t)}{N_P(t)} \cdot \frac{i}{60} \quad (5.2)$$

Zur Erreichung des Fairness Ziels des Algorithmus wird eine Abweichung A von 0% erwartet. Mit der zusätzlichen Bedingung, dass die Abweichung im erwähnten Fall, indem das BEV als

einzigster Solarenergie-Abnehmer in Frage käme, von den 0% abweichen kann.

5.1.2 Lade-Wahrscheinlichkeit Solarenergie

Die Lade-Wahrscheinlichkeit p_L in % gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein BEV während seiner Parkdauer mit Solarenergie geladen wird. Sie berechnet sich über die Anzahl tatsächlich geladener BEVs N_G geteilt durch die Anzahl parkender BEVs N_P am Tag.

$$p_L = \frac{N_G}{N_P} \quad (5.3)$$

Für den Lademanagement-Algorithmus soll eine Lade-Wahrscheinlichkeit von über 90% als Ziel in Bezug auf die Kundenzufriedenheit gesetzt werden. Ausgehend von der Bedingung und Annahme, dass alle parkenden BEVs eine Parkdauer von mindestens drei Stunden haben, wie sie im Abschnitt der Simulationsvereinfachungen festgelegt wird (vgl. Abschnitt ??). Die Zahl basiert auf keinen theoretischen Untersuchungen, sondern ist ein geschätzter Richtwert. Im Zuge einer Verbesserung der Simulationsdaten könnte eine Umfrage über die Wahrscheinlichkeit von einem Kundenverlust bei mehrmaligem Parken ohne versprochene Aufladung, zu einer Konkretisierung der Zahl führen.

Damit das Ziel der Fairness von 0% erreicht werden kann, ist allerdings eine Lade-Wahrscheinlichkeit von 100% notwendig. Denn die Lade-Wahrscheinlichkeit beeinflusst die Fairness, da BEVs, die nicht geladen werden, eine Abweichung A von geladener zu fairer Solarenergie von 100% haben.

5.1.3 Ungenutzte Solarenergie

Wie in *Abschnitt 3.1 Simulationsziele* beschrieben, soll das Lademanagementsystem dazu dienen, überschüssige Solarenergie kosten-einbringend zu verwerten. Zur Überprüfung dieses Zieles wird der Parameter der ungenutzten Solarenergie E_U in kWh durch Subtraktion der verfügbaren Solarenergie E_V in kWh von der Summe der aufgeladenen Solarenergie aller BEVs $E_{G_{ges}}$ in kWh berechnet.

$$E_U = E_V - E_{G_{ges}} \quad (5.4)$$

Ein absoluter Wert als Ziel für die ungenutzte Solarenergie ist an Bedingungen geknüpft. Wenn während des gesamten Simulationszeitraumes zu jedem Zeitpunkt ein BEV zum Laden zur Verfügung steht, soll die ungenutzte Solarenergie E_U einen Wert von 0kWh haben. Befinden sich Parklücken im Simulationszeitraum, darf der absolute Wert der ungenutzten Solarenergie der Summe der verfügbaren Solarenergie dieser Lücken entsprechen.

5.2 Entwicklungsschritte

Bevor die finale Version des Lademanagement-Algorithmus dieser Arbeit vorgestellt wird, sollen die einzelnen Entwicklungsschritte des Algorithmus grob skizziert werden.

In einem ersten Schritt wurde die Verteilung des Solarstroms über eine Warteliste und dem Festlegen einer Ladestrom-Obergrenze durchgeführt. Im Parkhaus ankommende BEVs werden an das Ende einer Warteliste gesetzt. Für jedes Zeitintervall werden die freien Ladeplätze bestimmt und mit den BEVs aus der Warteliste gefüllt. Die BEVs dürfen solange laden, bis die festgelegte Ladestrom-Obergrenze erreicht wird. Die Ladestrom-Obergrenze ist hierbei ein konstanter Wert, der für alle BEVs gleich ist, unabhängig von ihrer Parkdauer.

Da dies nicht dem Ziel der definierten Fairness entspricht (vgl. 5.1.1), wurde in einem zweiten Schritt das Konzept der Prognose eingeführt. Bei der Prognose wird vorab für jedes BEV der faire Solarenergie-Anteil berechnet. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die prognostizierten Parkzeiten der BEVs nicht von den tatsächlichen Parkzeiten abweichen. Anstatt den Aufladevorgang beim Erreichen einer festgelegten Ladestrom-Obergrenze abubrechen, wird der Vorgang beim Erreichen des fairen Solarenergie-Anteils abgebrochen.

Hauptproblem in dieser Entwicklungsstufe des Algorithmus war, dass die Parkzeiten der BEVs bei der Einplanung über die Warteliste nicht berücksichtigt werden. Zur Veranschaulichung dieses Problems soll folgender Fall betrachtet werden: Ein BEV mit einem späten Parkzeit-Ende von beispielsweise 16 Uhr und ein BEV mit Parkzeit-Ende um 11 Uhr erreichen kurz nacheinander das Parkhaus. Das BEV mit späterem Parkzeit-Ende ist etwas früher da und kommt vor dem anderen BEV mit früherem Parkzeit-Ende in die Warteliste. In diesem Fall wird es zuerst geladen und blockiert möglicherweise die Ladestation aufgrund seines hohen fairen Solarenergie-Anteils solange, dass das BEV mit Parkzeit-Ende um 11 Uhr vor Erreichung seines Parkzeit-Endes nicht mehr zum Laden kommt. Oder weitere BEVs befinden sich zwischen den zwei betrachteten BEVs in der Warteliste, sodass es wiederum nicht mit Solarstrom geladen wird.

Dieses Problem führte zu der finalen Version des Algorithmus, in der nach Berechnung des fairen Solarenergie-Anteils ein Nachoptimierungsschritt eingefügt wurde. Der genaue Ablauf des Algorithmus soll in den nächsten zwei Abschnitten beschrieben werden.

5.3 Idee des Algorithmus

Wie bereits im vorherigen Abschnitt der Beschreibung der Entwicklungsschritte (vgl. 5.2) erwähnt, basiert der Algorithmus aus einer Kombination der Konzepte *Warteliste*, *Prognose* und

Nachoptimierung. Die aktuell parkenden BEVs werden über eine Warteliste freien Ladestationen zugeteilt. Sie dürfen solange laden, bis ihr prognostizierter fairer Solarstrom-Anteil erreicht wird. Die Nachoptimierung schiebt BEVs mit langer Parkdauer an das Ende des Simulationszeitraumes, das heißt in den Nachmittag. Dafür wird der Algorithmus zur Einteilung der Ladeplätze zeitlich gesehen rückwärts durchlaufen. Das bedeutet Start ist das Simulationsende und die BEVs mit spätestem Parkzeit-Ende gelangen als erstes auf die Warteliste und damit auch zum Laden. Der faire Solarenergie-Anteil aus der Prognose-Rechnung wird wieder zum Abbruch der Ladezeit verwendet. Die über den rückwärtslaufenden Algorithmus berechneten Ladestart- und Ladeend-Zeiten für die BEVs werden gespeichert. Danach kann der Algorithmus vorwärts durchlaufen werden und die nicht von der Nachoptimierung eingeplanten BEVs können zu den freien Ladezeiten geladen werden. Diese freien Ladezeiten sind hauptsächlich im Vormittag, aufgrund der vom Nachmittag ausgehenden Nachoptimierung. Die Abarbeitungsreihenfolge wird über die Warteliste festgelegt. Auf der Warteliste befinden sich allerdings nur noch parkende BEVs, die noch nicht von der Nachoptimierung eingeplant wurden. Die von der Optimierung eingeplanten BEVs werden zu den abgespeicherten Zeiten geladen.

5.4 Ablauf und Formalisierung des Algorithmus

Nach Vorstellung der grundsätzlichen Idee des Lademanagement-Algorithmus soll nun der genaue Ablauf beschrieben werden. Er lässt sich in vier Phasen unterteilen: der Initialisierung mit dem Erstellen eines zufälligen Parkverlaufs der BEVs, der Prognose Berechnung zur Bestimmung des fairen Solarenergie-Anteils, der Nachoptimierung zur Berücksichtigung der Parkdauer und dem Hauptprogramm, der Ladezeit-Einplanung über die Warteliste.

Das Hauptprogramm des Algorithmus besteht aus der Iteration über den gesamten Simulationszeitraum. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben wird die verfügbare Solarleistung linear interpoliert. Das heißt für das vorgegebene Intervall i , z.B. bei $i = 15$ alle 15 Minuten, wird nur ein Wert für die verfügbare Solarleistung betrachtet. Da es sich um eine lineare Interpolation handelt, wird der Wert in der Mitte des Intervalls i verwendet. Während der Iteration über den Simulationszeitraum wird demnach immer nur zum Start des neuen Intervalls bestimmt, wie viele Ladeplätze für das nächste Intervall zur Verfügung stehen. Die Vorgabe ist hierbei eine gleichmäßige Verteilung der verfügbaren Solarleistung auf alle ladenden BEVs (vgl. Abschnitt ??).

Vor Ablauf des Hauptprogramms muss der Tagesverlauf der parkenden BEVs inklusive der berechneten fairen Solarenergie-Anteile vorliegen, weswegen die Initialisierung und Prognose Berechnung zuerst ausgeführt werden. Die Nachoptimierung wird ebenfalls vor dem Hauptpro-

gramm, der Ladezeit-Einplanung, ausgeführt. In der folgenden Ablaufbeschreibung wird die Optimierung nach der Beschreibung des Hauptprogramms erläutert. Dies soll dem Verständnis der Nachoptimierung dienen, da sie Teile der Ladezeit-Einplanungs-Logik verwendet.

5.4.1 Initialisierung

Bei der Initialisierung des Algorithmus wird eine Liste von BEVs angelegt, deren Länge der angegebenen Anzahl an BEVs pro Tag entspricht. Für jedes BEV aus der Liste wird ein zufälliger Parkzeit-Start und eine zufällige Parkdauer berechnet. Zur Einhaltung der Simulationsvereinfachungen gibt es bei der zufälligen Generierung Einschränkungen.

Der Parkzeit-Start darf sich nur innerhalb des Simulationszeitintervalls befinden. Für die Beschreibungen und Auswertungen dieser Arbeit ist das Simulationszeitintervall von 8 bis 16 Uhr festgelegt. Für eine realistischere Darstellung der Parkzeit-Starts wird die Wahrscheinlichkeit der Ankunftszeiten für eine bestimmte Uhrzeit innerhalb des Simulationszeitintervalls betrachtet (vgl. Abschnitt 3.2). Durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Uhrzeit $p_{Uhrzeit}$ mit der gesamten Anzahl an BEVs N wird die Anzahl der Uhrzeit $n_{Uhrzeit}$ berechnet.

$$n_{Uhrzeit} = p_{Uhrzeit} \cdot N \quad (5.5)$$

Diese Anzahl sorgt für die Gewichtung der Uhrzeit nach dem „Lostopf-Prinzip“. Ist die Anzahl höher, ist auch die Wahrscheinlichkeit höher, dass eines der BEVs diese Uhrzeit als Parkzeit-Start zu gewiesen bekommt. Demnach funktioniert auch die Funktion für die Zuweisung der Parkzeit-Starts nach dem „Lostopf-Prinzip“. Der „Lostopf“ entspricht dabei einer Liste aller möglichen Parkzeit-Starts. Alle Uhrzeiten kommen so oft in diese Liste wie ihre berechnete Anzahl $n_{Uhrzeit}$. Die Funktion wählt zufällig einen Parkzeit-Start aus der Liste aus. Somit wird eine unterschiedliche Verteilung der Parkzeit-Starts für verschiedene Simulationsdurchläufe ermöglicht.

Für die Parkzeitdauer wird ein zufälliger Wert zwischen drei bis acht Stunden mit einer 1-Minuten-Schrittweite ausgewählt.

Die Tabelle 6 zeigt das Ergebnis der Initialisierung bei der gesamten Anzahl an BEVs $N = 5$

| ID BEV | Zustand | Parkstart | Parkdauer in h |
|--------|---------------|-----------|----------------|
| 0 | wartend | 13:00 Uhr | 3 |
| 1 | nicht parkend | 8:30 Uhr | 6.3 |
| 2 | wartend | 8:00 Uhr | 5 |
| 3 | nicht parkend | 8:30 Uhr | 6.6 |
| 4 | wartend | 8:00 Uhr | 3.5 |
| 5 | wartend | 13:00 Uhr | 3 |
| 6 | wartend | 8:30 Uhr | 7.5 |
| 7 | nicht parkend | 9:00 Uhr | 5.3 |
| 8 | wartend | 8:30 Uhr | 5.5 |
| 9 | nicht parkend | 9:00 Uhr | 7 |

Abbildung 6: Ausgabe-Tabelle Lademanagementsimulation Parkzeiten

5.4.2 Prognose Berechnung

Im nächsten Schritt des Algorithmus wird für jedes BEV aus der Initialisierung der faire Solarenergie-Anteil (Formel 5.2) berechnet und gespeichert. Dieser Wert dient als Abbruchbedingung des Ladevorgangs.

5.4.3 Ladezeit-Einplanung über Warteliste

Bei der Ladezeit-Einplanung der BEVs werden für jeden Zeitintervall-Start folgende Schritte ausgeführt:

Aktualisierung der Warteliste

Bei der Aktualisierung der Warteliste wird überprüft, ob neue BEVs auf dem Parkplatz angekommen sind und zur Warteliste hinzugefügt werden müssen. Dafür wird über die Liste der BEVs iteriert und der gesetzte Parkzeit-Start mit der aktuell betrachteten Minute verglichen.

Überprüfung des Parkzeit-Endes

Bevor die neuen Ladeplätze berechnet und vergeben werden können, werden BEVs, die zum betrachteten Zeitpunkt den Parkplatz verlassen von der Warte- und Ladeliste genommen. Die Ladeliste enthält alle momentan ladenden BEVs. Dafür wird das Parkzeit-Ende E_P in Minuten berechnet, indem die gespeicherte Parkdauer T_P in Minuten auf den gespeicherten

Parkzeit-Start S_P in Minuten addiert wird.

$$E_P = S_P + T_P \quad (5.6)$$

Dieser Wert wird mit der aktuell betrachteten Minute verglichen. Ist die Parkzeit vorbei, wird das BEV von der Warte- beziehungsweise Ladeliste gelöscht und bekommt den Status *nicht parkend*.

Neuberechnung der Ladezeit und aufgeladenen Solarenergie

Die Ladezeit und die aufgeladene Solarenergie muss für jedes aktuell ladende BEV Neuberechnet und gesetzt werden. Die Ladezeit T_L berechnet sich über die aktuelle betrachtete Minute t und dem Ladstart S_L nach folgender Rechnung:

$$T_L = t - S_L \quad (5.7)$$

Zur Neuberechnung der aufgeladenen Solarenergie E_G wird das vergangene Intervall t_v betrachtet. Da die verfügbare Solarleistung L_V linear interpoliert wird (vgl. Abschnitt 3.2), muss hier die Mitte des Intervalls betrachtet werden, weshalb das Interpolationsintervall i halbiert wird. Die aufgeladene Solarenergie E_G in kWh berechnet sich letztlich anhand der verfügbaren Solarleistung des vergangenen Intervalls $L_V(t_v)$ in kW und der Anzahl ladender BEVs des vergangenen Intervalls $N_L(t_v)$ nach folgender Formel:

$$E_G = \frac{L_V(t_v)}{N_L(t_v)} \cdot \frac{i}{60} \quad (5.8)$$

$$\text{mit } t_v = t - \frac{i}{2}$$

Aktualisierung der Ladeliste

Vor Aktualisierung der ladenden BEVs werden die Anzahl verfügbarer Ladeplätze für das kommende Intervall bestimmt. Als Berechnungsbasis dienen die verfügbare Solarleistung zum betrachteten Zeitpunkt und die angegebene Ladeleistung pro BEV. Der Pseudo-Code 1 soll die Bestimmung der verfügbaren Ladeplätze visualisieren.

Pseudo-Code 1 Bestimmung der verfügbaren Ladeplätze

```

1: if verfügbare Solarleistung  $\leq 0$  then
2:   return 0
3: if verfügbare Solarleistung  $\leq$  Ladeleistung pro BEV then
4:   return 1
5: if verfügbare Solarleistung modulo Ladeleistung pro BEV  $= 0$  then
6:   return verfügbare Solarleistung / Ladeleistung pro BEV
   return verfügbare Solarleistung / Ladeleistung pro BEV + 1

```

Durch Abzug der bereits ladenden BEVs von den verfügbaren Ladeplätzen wird die Anzahl freier Ladeplätze berechnet. Anhand dieser und der Anzahl wartender und ladender BEVs wird auf Basis der Logik des Pseudo-Codes 2 die Anzahl an neu ladenden BEVs bestimmt.

Pseudo-Code 2 Bestimmung der Anzahl neu ladender BEVs

```

1: if Anzahl freier Ladeplätze  $> 0$  und Anzahl wartender BEVs  $>$  Anzahl freier Ladeplätze then
   return Anzahl freier Ladeplätze
2:   return Anzahl freier Ladeplätze
3: if  $0 <$  Anzahl wartender BEVs  $<$  Anzahl freier Ladeplätze then
4:   return Anzahl wartender BEVs

```

Wenn die Anzahl freier Ladeplätze größer als Null ist und keine BEVs zum Laden zur Verfügung stehen, wird die für das Zeitintervall verfügbare Solarenergie als ungenutzte Solarenergie gespeichert.

Anschließend wird die ermittelte Anzahl neu zu ladender BEVs vom Anfang der Warteliste, den freien Ladeplätzen für das neue Intervall zugeteilt.

In einem zweiten Schritt wird überprüft, ob das Ladeende eines der ladenden BEVs im nächsten Intervall zwischen den betrachteten Zeitpunkten liegt. Dafür wird die Restladeenergie E_R und die verfügbare Solarenergie pro BEV zum kommenden Zeitpunkt $E_V(t_k)/BEV$ bestimmt. Der kommende Zeitpunkt t_k entspricht dem Zeitpunkt in der Mitte des nächsten Intervalls. Die verfügbare Solarleistung pro BEV $L_V(t_k)/BEV$ berechnet sich über den Quotienten aus verfügbarer Solarleistung zum kommenden Zeitpunkt $L_V(t_k)$ und der Anzahl ladender BEVs zum kommenden Zeitpunkt $N_L(t_k)$. Die Restladeenergie E_R entspricht der Menge an Solarenergie, die dem BEV noch fehlen bis zur Erreichung des berechneten fairen Solarenergie-Anteils F . Somit muss die Differenz aus dem fairen Solarenergie-Anteil F in kWh und der bereits geladenen Solarenergie G in kWh berechnet werden.

$$L_V(t_k)/BEV = \frac{L_V(t_k)}{N_L(t_k)} \quad (5.9)$$

$$E_V(t_k)/BEV = L_V(t_k)/BEV \cdot \frac{i}{60} \quad (5.10)$$

$$\text{mit } t_k = t + \frac{i}{2}$$

$$E_R = F - G \quad (5.11)$$

Ist die Restladeenergie E_R kleiner als die verfügbare Solarenergie pro BEV zum kommenden Zeitpunkt $E_V(t_k)/BEV$ und größer oder gleich Null, ist das Ladeende des BEVs vor dem nächsten betrachteten Zeitpunkt. Wenn die verfügbare Solarleistung pro BEV zum kommenden Zeitpunkt $L_V(t_k)/BEV$ größer als Null ist, wird zusätzlich bestimmt, wie die frei werdende Solarleistung eingeplant wird (vgl. Pseudo-Code 3).

Pseudo-Code 3 Einplanung der frei werdenden Solarleistung

```

1: function GET AUSGEWÄHLTES BEV(möglicher Ladestart)
2:   if Warteliste nicht leer then
3:     return Wähle das erste BEV aus der Warteliste, dessen Parkzeit-Ende nicht vor
       dem möglichen Ladestart im nächsten Intervall liegt
4:   if ausgewähltes BEV existiert then
5:     Setze den Ladestart für das ausgewählte BEV
6:   else
7:     if Ladeliste nicht leer then
8:       Teile die frei gewordene Solarleistung unter den ladenden BEVs auf
9:     else
10:      Setze die frei gewordene Solarleistung als ungenutzte Solarleistung
  
```

Zum Setzen des Ladeendes des BEVs, das aufhört zu laden und zum Setzen des Ladestarts des BEVs, das anfängt zu laden, wird die Restladedauer R_L in Minuten jedes BEVs ermittelt. Sie berechnet sich mithilfe der Restladeenergie E_R in kWh (vgl. 5.2) und der verfügbaren Solarleistung pro BEV zum kommenden Zeitpunkt $L_V(t_k)/BEV$ kW (vgl. 5.9).

$$R_L = \frac{E_R}{L_V(t_k)/BEV} \cdot 60 \quad (5.12)$$

$$\text{mit } t_k = t + \frac{i}{2}$$

Somit kann für das BEV, das aufhört zu laden, das Ladeende $E_L = t + R_L$ gesetzt werden und die berechnete Restladeenergie E_R auf die bereits geladene Solarenergie E_G addiert werden. Für das BEV, das den frei gewordenen Ladeplatz einnimmt, entspricht der Ladestart S_L dem

Ladeende E_L des aufhörenden BEVs. Zur Aktualisierung der geladenen Solarenergie nach Ladestart S_L und vor dem nächsten betrachteten Zeitpunkt $t + i$, wird die Ladezeit T_L des BEVs wie folgt berechnet:

$$T_L = (t + i) - S_L \quad (5.13)$$

Mittels der Ladezeit T_L kann die geladene Solarenergie G berechnet werden.

$$G = L_V(t_k)/BEV \cdot \frac{T_L}{60} \quad (5.14)$$

$$\text{mit } L_V(t_k)/BEV = 5.9$$

Im dritten Schritt der Aktualisierung der Ladeliste wird überprüft, ob die Parkzeit eines der ladenden BEVs im nächsten Intervall endet. Dafür wird kontrolliert, ob sich das Parkende E_P zwischen dem aktuellen Zeitpunkt t und dem kommenden Zeitpunkt t_k befindet. Ist das der Fall wird für das BEV berechnet, wie viel Solarenergie G es in der restlichen Parkzeit T_P laden wird.

$$T_P = E_P - t \quad (5.15)$$

$$G = L_V(t_k)/BEV \cdot \frac{T_P}{60} \quad (5.16)$$

$$\text{mit } L_V(t_k)/BEV = 5.9$$

Diese Solarenergie G wird auf die bereits geladene Solarenergie addiert. Wie auch bei Ende der Ladezeit, wird die frei werdende Solarleistung, wie im Pseudo-Code 3 beschrieben, eingeplant.

5.4.4 Nachoptimierung

Die Nachoptimierung entspricht der Ladezeit-Einplanung (vgl. 5.4.3) mit Rückwärts-Terminierung und minimalen Abweichungen.

Anstatt vorwärts über den Simulationszeitraum zu iterieren, werden die Zeitintervalle rückwärts abgelaufen. Das heißt der Algorithmus startet zum Simulationszeitraumende am Nachmittag und läuft Richtung Simulationszeitraumstart in den Vormittag. In der Logik bedeutet das, dass aus dem Parkzeit-Start das Parkzeit-Ende und aus dem Parkzeit-Ende der Parkzeit-Start wird. Die Einplanungsschritte werden mit den veränderten Werten abgelaufen. Wichtig ist vor allem die Speicherung des Ladestarts und der Ladedauer, damit die Vorwärts-Einplanung

weiß, wann welche Ladeplätze belegt sind. Dafür wird das Ende der Aufladung während dem Rückwärtsdurlauf als Ladestart für den Vorwärtsdurchlauf der Ladezeit-Einplanung gespeichert.

Bedeutung für den Durchlauf der Ladezeit-Einplanung mit Warteliste

Für den Durchlauf des Hauptprogramms (vgl. 5.4.3) bedeutet das, dass zu jedem Intervallstart überprüft werden muss, ob die eingeplanten BEVs aus der Nachoptimierung zum betrachteten Zeitpunkt oder im nächsten Intervall ihr Ladestart oder -ende haben. Ist das der Fall werden die gleichen Schritte durchlaufen wie beim Ladeende eines BEVs ohne Einplanung durch die Nachoptimierung (vgl. Absatz 5.4.3).

Damit die entsprechenden BEVs nicht zur Einplanung in den Vormittag in Betracht gezogen werden, werden sie bei ihrer Ankunft auf dem Parkplatz nicht zur Warteliste hinzugefügt.

Zusätzlich muss bei der Aktualisierung der Ladeliste die Anzahl eingeplanter BEVs aus der Nachoptimierung von der Anzahl freier Ladeplätze abgezogen werden (vgl. 5.4.3).

Durch das Hinzufügen der Nachoptimierung in den Lademanagement-Algorithmus konnten signifikant bessere Ergebnisse erzielt werden, die im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

Kapitel 6

Auswertung Algorithmus und Diskussion

Im vorherigen *Kapitel 5 Vorstellung Lademanagement-Algorithmus* werden die Ziele und der Ablauf des implementierten Lademanagement-Algorithmus beschrieben. In diesem Kapitel soll der Algorithmus anhand der definierten Kriterien aus der Zieldefinition (vgl. Abschnitt 5.1) bewertet werden. Die Kriterien sind neben der Fairness die Lade-Wahrscheinlichkeit und der Betrag an ungenutzter Solarenergie. Zur Auswertung der Ergebnisse wird die Simulation eine bestimmte Anzahl mal durchlaufen. Im ersten Abschnitt des Kapitels werden die Parameter für die Ergebnissdurchläufe festgelegt. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt, analysiert und letztlich diskutiert. Es soll die Frage nach der Fairness des Algorithmus beantwortet werden. Zusätzlich sollen Vorteile und Schwachstellen des Algorithmus herausgearbeitet werden, um mögliche Optimierungsvorschläge zur Weiterentwicklung des Lademanagement-Algorithmus zu finden.

6.1 Simulationseingangsdaten zur Ergebnisauswertung

Wie in der technischen Umsetzung der Simulations Visualisierung beschrieben (vgl. Abschnitt 4.4) ist es möglich die Simulationseingangsdaten über Dateien mit den jeweiligen Datensätzen zu bestimmen beziehungsweise anzupassen. Für die Ergebnisauswertung der Simulation wird mit approximierten Datensätzen gearbeitet. Sie basieren auf keinen tatsächlichen Daten der DHBW Karlsruhe oder einer Wetterstation. Hier kann im Zuge einer Verbesserung der Simulation angeknüpft werden, mehr dazu wird im Ausblick beschrieben (vgl. Ausblick Verbesserungen der Simulation Abschnitt 7.2.1).

Der für die Ergebnisauswertung verwendete Datensatz für den Stromeigenverbrauch wird durch

das Diagramm 7 visualisiert. Der zusehende Verlauf der Solarleistung wird über den Datensatz der Sonneneinstrahlung und der angegebenen Solarpeakleistung berechnet. Dafür werden die Prozentwerte der Sonneneinstrahlung mit dem Wert der Solarpeakleistung multipliziert. Die Bestimmung der notwendigen Solarpeakleistung wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Die verfügbare Solarenergie ergibt sich durch Subtraktion des Verlaufs des Stromeigenverbrauchs von der Solarleistung der Solaranlage.

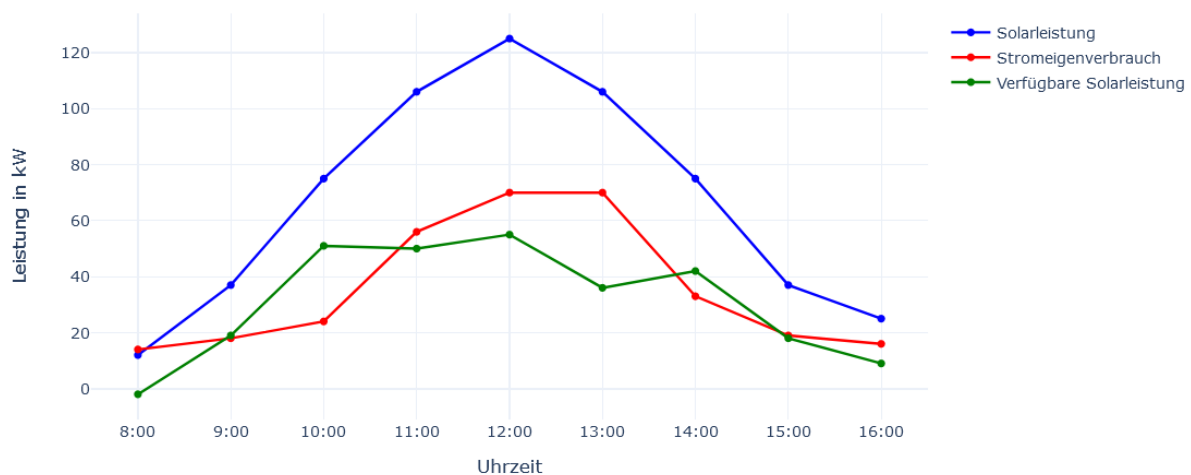


Abbildung 7: Simulationseingangsdaten

Für die Generierung der zufälligen Parkzeiten (vgl. Initialisierung des Algorithmus Abschnitt 5.4.1) wird für die Gewichtung der Parkzeit-Starts die in der Abbildung 8 visualisierte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten verwendet.

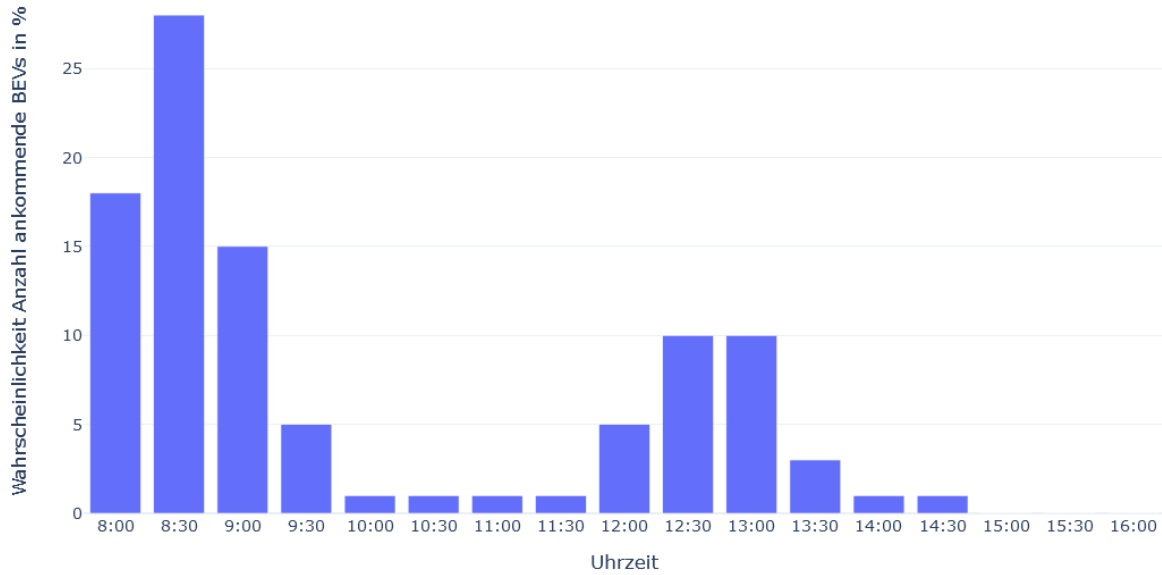


Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten

6.2 Parameter zur Ergebnisauswertung

Ziel der Simulation ist es das Laden von 1-5 BEVs mit einer durchschnittlichen Ladeleistung von 11kW zu ermöglichen (vgl. Ziele der Lademanagement-Simulation Abschnitt 3.1). Demnach muss die Solaranlage so skaliert werden, damit zu Spitzenzeiten 55kW Solarleistung für das Lademanagement-System zur Verfügung stehen. Spitzenzeit nach den Simulationseingangsdaten (vgl. Abschnitt 6.1) ist 12 Uhr mit einer Sonneneinstrahlung von 100%. Zur Berechnung der notwendigen Solarpeakleistung muss die gewünschte Spitzen-Solarleistung von 55kW mit dem Stromeigenverbrauch, der zur Spitzenzeit um 12 Uhr benötigt wird, addiert werden. Dieser Wert beträgt 70kW, weshalb sich somit eine Solarpeakleistung von $55 + 70 = 125$ kWp ergibt. Im Simulationsdurchlauf der Ergebnisauswertung sollen die BEVs durchschnittlich mit 5kWh aufgeladen werden. Mithilfe der insgesamt verfügbaren Solarenergie E_V und der durchschnittlichen Aufladung D_L lässt sich die Anzahl BEVs pro Tag N ermitteln, die der Kapazität des Lademanagement-Systems entspricht. Die insgesamt verfügbare Solarenergie E_V lässt sich näherungsweise durch die Summe der verfügbaren Solarleistungen zum Zeitpunkt t vom Simulationsstart Sim_S bis zum Simulationsende Sim_E berechnen.

$$N = \frac{E_V}{D_L} = \frac{276,47kWh}{5kWh} \approx 55 \quad (6.1)$$

$$\text{mit } E_V = \sum_{t=Sim_S}^{Sim_E} L_V(t) * \frac{i}{60}$$

Danach ergibt sich eine Anzahl von 55 BEVs für den Ergebnisdurchlauf.

Zusammenfassend sind die Parameterwerte in folgender Tabelle dargestellt:

| Simulationsparameter | Wert |
|-------------------------|--------|
| Solarpeakleistung | 125kWp |
| Ladeleistung pro BEV | 11kW |
| Interpolationsintervall | 15min |
| Anzahl BEVs pro Tag | 55 |

6.3 Darstellung der Ergebnisse

Für die Ergebnisauswertung werden 10 Simulationsdurchläufe durchgeführt, um eine Mittelung der Ergebnisse zu erhalten. Dabei werden pro Simulationslauf die in 5.1 definierten Kriterien zur Auswertung des Algorithmus ausgelesen oder berechnet. Zur Automatisierung der Auswertung werden die Berechnungen ebenfalls mit Python durchgeführt und im Jupyter Notebook angezeigt (vgl. Abbildung 9 und 10).

Die Abweichung A (vgl. Tabelle 6.1 Spalte 2) der tatsächlich geladenen Solarenergie G von dem fairen Solarenergie-Anteil F wird mittels 5.1 berechnet. Die Abweichung A ist ein Parameter für die Fairness und berechnet die Abweichung nur für BEVs, bei denen zum Ladezeitpunkt weitere Solarenergie-Abnehmer in Frage kommen. Bei den BEVs, die während dem Laden alleiniger Solarenergie-Abnehmer sind, wird die Abweichung A auf Null gesetzt. Der Betrag der ungenutzten Solarenergie (vgl. Tabelle 6.1 Spalte 3) wird über 5.4 ermittelt. Die Lade-Wahrscheinlichkeit (vgl. Tabelle 6.1 Spalte 3) gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein BEV während seiner Parkdauer mit Solarenergie geladen wird. Sie wird über 5.3 bestimmt.

Ergebnis

Geladene BEVs: 55 von 55

Verfügbare Solarenergie insgesamt: 276.47 kWh

Aufgeladene Solarenergie insgesamt: 214.61 kWh

Ungenutzte Solarenergie insgesamt: 61.86 kWh

Abbildung 9: Ausgabe Ergebnisse

23.63% durchschnittliche Abweichung geladener von fairer Solarenergie,

| ID BEV | Zustand | Parkstart | Parkdauer in h | Ladestart | Ladedauer in min | Geladene Solarenergie in kWh | Fairer Solarenergie Anteil in kWh | Abweichung Geladene von Fairer Solarenergie in % |
|--------|---------------|-----------|----------------|-----------|------------------|------------------------------|-----------------------------------|--|
| 0 | nicht parkend | 8:30 Uhr | 4 | 10:37 | 22.91 | 1.33 | 3.94 | 66.33 |
| 1 | wartend | 8:30 Uhr | 3.2 | 9:51 | 18.34 | 3.01 | 3.01 | 0 |
| 2 | nicht parkend | 9:00 Uhr | 4.5 | 11:01 | 13.08 | 2.21 | 4.74 | 53.42 |
| 3 | wartend | 8:00 Uhr | 7.4 | 8:00 | 75.48 | 7.06 | 7.06 | 0 |
| 4 | wartend | 8:30 Uhr | 7.1 | 9:58 | 31.18 | 2.73 | 7.04 | 61.25 |
| 5 | nicht parkend | 12:30 Uhr | 3.5 | 15:38 | 21.88 | 5.77 | 3.24 | 0 |
| 6 | wartend | 8:30 Uhr | 4.2 | 10:02 | 24.78 | 4.19 | 4.19 | 0 |
| 7 | wartend | 8:30 Uhr | 4.2 | 10:10 | 19.78 | 0.81 | 4.19 | 80.64 |

Abbildung 10: Ausgabe Abweichung A

| Nr. | Ø Abweichung A in % | Ungenutzte Solar- energie in kWh | Lade- Wahrscheinlichkeit in % |
|-----|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 21.2 | 61.4 | 98.2 |
| 2 | 20.3 | 49.7 | 98.2 |
| 3 | 23.0 | 60.5 | 100 |
| 4 | 22.6 | 52.9 | 96.4 |
| 5 | 25.0 | 70.5 | 96.4 |
| 6 | 25.3 | 56.8 | 96.4 |
| 7 | 20.6 | 59.9 | 100 |
| 8 | 25.1 | 72.8 | 100 |
| 9 | 20.0 | 56.3 | 98.2 |
| 10 | 21.1 | 56.0 | 100 |
| Ø | 22.4 | 59.7 | 98.4 |

Tabelle 6.1: Ergebnisse Lademanagement-Algorithmus

6.4 Auswertung und Analyse der Ergebnisse

In der Zieldefinition des Algorithmus 5.1 wurden neben den Kriterien auch Werte definiert. Diese sollen mit den Ergebnissen aus den durchgeführten Simulationsdurchläufen (vgl. Tabelle 6.1) verglichen werden.

6.4.1 Fairness

Die Fairness des Lademanagement-Algorithmus wird als Abweichung A der tatsächlich geladenen Solarenergie G von dem fairen Solarenergie-Anteil F (5.2) definiert. Zur Erreichung des Fairness Ziels wird eine Abweichung von 0% erwartet. Ausgenommen sind die BEVs, die zum Ladezeitpunkt als einziger Solarenergie-Abnehmer in Frage kommen. Diese wurden bei der Ergebnisberechnung durch Setzen der Abweichung auf Null rausgerechnet. Das gesetzte Fairness Ziel von $A = 0\%$ wurde mit einer tatsächlichen durchschnittlichen Abweichung A von 22,4% nicht erreicht.

Die Hauptursache hierfür liegt im Zusammenspiel zwischen der Ladezeit-Einplanung über die Warteliste (vgl. Abschnitt 5.4.3) und der Nachoptimierung (vgl. Abschnitt 5.4.4). Beim Durchlauf der Ladezeit-Einplanung wird die Aufladung von BEVs aus der Warteliste gestoppt, sobald die Aufladung der fest eingepplanten BEVs aus der Nachoptimierung beginnt. Der Aufladestopp ist unabhängig davon, ob die BEVs bereits ihren fairen Solarenergie-Anteil erreicht

haben. Da ein zweites Laden der BEVs in dem aktuellen Lademanagement-Algorithmus nicht vorgesehen ist, ist die Abweichung der tatsächlich geladenen BEVs von dem versprochenen fairen Solarenergie-Anteil unter Umständen sehr hoch, z.B. bei 80%. Neben diesen Werten setzen auch BEVs, die nicht zum Laden gekommen sind, die durchschnittliche Gesamt-Abweichung hoch.

6.4.2 Lade-Wahrscheinlichkeit Solarenergie

Die Lade-Wahrscheinlichkeit gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein BEV während seiner Parkdauer mit Solarenergie geladen wird. Als Ziel für die Kundenzufriedenheit gegenüber dem Lademanagement-System ist eine Lade-Wahrscheinlichkeit von über 90% angesetzt. Mit einer tatsächlichen durchschnittlichen Lade-Wahrscheinlichkeit von 98,4% ist dieses Ziel somit erreicht worden. Wie in Abschnitt 5.1.2 erwähnt, ist der Ziel-Wert für die Lade-Wahrscheinlichkeit abhängig vom betrachteten Ziel. Ist das Ziel nicht die Kundenzufriedenheit, sondern die Fairness des Algorithmus, ist eine Lade-Wahrscheinlichkeit von 100% als Ziel-Wert definiert. Das liegt daran, dass die Lade-Wahrscheinlichkeit die Abweichung von geladener zu fairer Solarenergie beeinflusst. Dieses Ziel ist somit mit dem Durchschnittswert der Lade-Wahrscheinlichkeit von 98,4% um 1,6% verfehlt worden. Allerdings kann an dieser Stelle angemerkt werden, dass es Simulationsdurchläufe gibt, die das Ziel von 100% erreichen (vgl. Tabelle 6.1 Simulationsdurchlauf Nr. 3, 7, 8, 10).

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die Schwankung der Lade-Wahrscheinlichkeit auf der zufälligen Verteilung der Parkhaus-Ankunftszeiten beruht. Die Vermutung liegt nahe, da dies der einzige Parameter ist, der zwischen den durchgeführten Simulationsdurchläufen verändert wird. Zur Überprüfung der Hypothese wird diese Verteilung durch Änderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten (vgl. Abbildung 8) geändert. Nach dem Ausprobieren verschiedenster Wahrscheinlichkeitsverteilungen, fällt auf, dass die Lade-Wahrscheinlichkeit bei einer gleichmäßigen Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Ankunftszeiten, wie in Abbildung 11, signifikant sinkt.

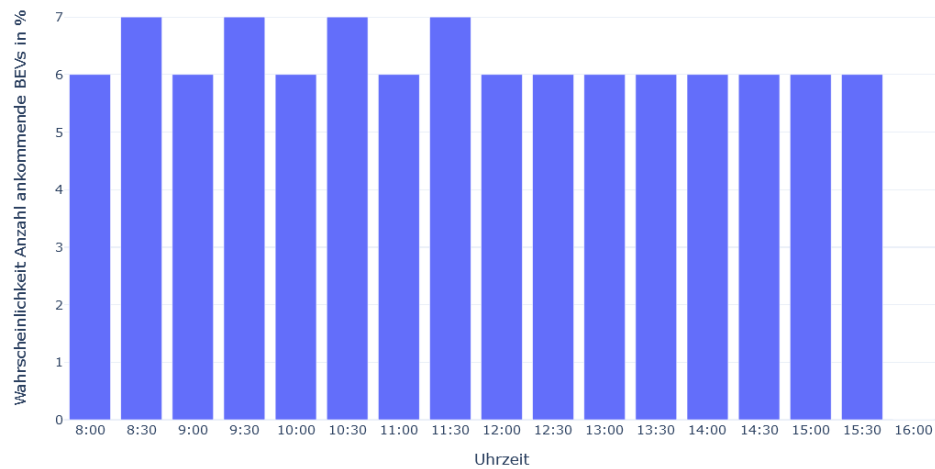


Abbildung 11: Gleichmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ankunftszeiten

Die Lade-Wahrscheinlichkeiten bei 10 Simulationsdurchläufen mit obiger Wahrscheinlichkeitsverteilung (11) sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

| Nr. | Lade-Wahrscheinlichkeit in % |
|-----|------------------------------|
| 1 | 90.9 |
| 2 | 85.5 |
| 3 | 94.5 |
| 4 | 92.7 |
| 5 | 85.5 |
| 6 | 81.8 |
| 7 | 80.0 |
| 8 | 87.3 |
| 9 | 85.5 |
| 10 | 85.5 |
| Ø | 86.9 |

Tabelle 6.2: Lade-Wahrscheinlichkeit bei gleichmäßigerer Verteilung der Ankunftszeiten

Der durchschnittliche Wert der Lade-Wahrscheinlichkeit beträgt 86.9% und hat sich damit um 11.5% verschlechtert im Vergleich zu den Simulationsdurchläufen für die Ergebnisauswertung (Tabelle 6.1). Um den Grund für die Verschlechterung der Lade-Wahrscheinlichkeit nachzuvollziehen, müssen die Konsequenzen einer gleichmäßigeren Verteilung der Ankunftszeiten betrachtet werden. Kommen in regelmäßigen Abständen immer ungefähr gleich viele BEVs

in das Parkhaus, nimmt die Warteliste stetig zu. Deshalb ist die Anzahl parkender BEVs im Nachmittag im Vergleich zum Vormittag etwa doppelt so hoch. Das trägt dazu bei, dass die Beträge der fairen Solarenergie-Anteile zwischen den BEVs mehr Schwanken. Beispielsweise hat ein BEV mit Ladestart um 8 Uhr einen fairen Solarenergie-Anteil von 11 kWh garantiert und ein BEV mit Ladestart um 13 Uhr nur 2,7 kWh. BEVs mit überdurchschnittlich hohem Solarenergie-Anteil, die am Morgen einen Ladeplatz zugeteilt bekommen, blockieren diesen solange bis ihr fairer Solarenergie-Anteil erreicht ist. Dadurch wird überdurchschnittlich lange ein Ladeplatz belegt. Dies hat zur Konsequenz, dass insgesamt weniger BEVs laden können und erklärt somit die niedrigere Lade-Wahrscheinlichkeit.

Die unterschiedlichen Lade-Wahrscheinlichkeitswerte aus den Simulationsdurchläufen für die Ergebnis-Auswertung, können mit diesem Effekt erklärt werden. Soll ein Durchschnittswert der Lade-Wahrscheinlichkeit von 100% erreicht werden, muss der Effekt der Blockierung von Ladeplätzen verhindert werden.

6.4.3 Ungenutzte Solarenergie

Der Ziel-Wert der ungenutzten Solarenergie hängt davon ab, ob es Zeitintervalle während des Simulationszeitraumes gibt, in denen kein BEV auf dem Parkplatz parkt. Beim Durchlauf der Simulation für die Ergebnisauswertung ist dies nicht der Fall, das heißt zu jedem Zeitpunkt parkt mindestens ein BEV auf dem Parkplatz. Demnach soll die ungenutzte Solarenergie nach der Zieldefinition (vgl. Abschnitt 5.1.3) einen Wert von 0kWh haben. Dieser Wert wird nicht erreicht, die ungenutzte Solarenergie liegt bei einem durchschnittlichen Wert von 59,7kWh in den Ergebnissen der Auswertung des Algorithmus (vgl. Tabelle 6.1). Das sind 17,3% ungenutzte Solarenergie der verfügbaren Solarenergie.

Die Analyse des Algorithmus und seiner Schwachstellen lässt zwei Gründe vermuten. Zum Einen stehen in Wirklichkeit nicht zu jedem Zeitpunkt parkende BEVs zur Einteilung von Solar-Energie zur Verfügung. Denn der Algorithmus teilt jedes BEV nur einmal zum Laden ein. Hintergrund ist neben der Vereinfachung des Algorithmus, dass ein mehrfaches Laden eines BEVs technische Hürden hat. Dadurch können Lücken in der Solarenergie-Einteilung entstehen, die zu ungenutzter Solarenergie führen. Als Verbesserungsvorschlag könnte für die Lösung dieses Problems ein weiterer Optimierungsschritt eingeführt werden. In diesem könnten die Lücken geschlossen werden, indem BEVs, die beispielsweise noch nicht ihren fairen Solarenergie-Anteil erhalten haben, ein zweites Mal zum Laden eingeteilt werden.

Zum Anderen beinhaltet die aktuelle Version des Lademanagement-Algorithmus keine Verlängerung der Ladezeit eines BEVs. Wenn dieses bereits seinen fairen Solarenergie-Anteil erreicht

hat, aber kein weiteres BEV zum Laden zur Verfügung steht, sollte die Ladezeit verlängert werden. Somit werden vermeidbare Lücken in der Einteilung der verfügbaren Solarenergie geschlossen und der Betrag der ungenutzten Solarenergie erhöht sich nicht.

6.5 Diskussion der Fairness des Algorithmus

Das definierte Kriterium der Fairness für den Lademanagement-Algorithmus (5.1.1) wird mit einer Abweichung von 22,4% von geladener zu fairer Solarenergie nicht erreicht. Nach einer Überarbeitung des Algorithmus mit dem Fokus der Verbesserung des Zusammenspiels zwischen der Ladezeit-Einplanung über die Warteliste und der Nachoptimierung und möglicherweise weiteren Optimierungsiterationen (vgl. Ausblick Verbesserungen des Algorithmus 7.2.2), wird davon ausgegangen, dass die Abweichung minimiert und damit die definierte Fairness des Algorithmus erhöht beziehungsweise erreicht werden kann.

Die Berechnung des fairen Solarenergie-Anteils dieser Arbeit und somit der Fairness des Algorithmus beruht auf der Länge der Parkdauer eines BEVs. Die verfügbare Solarenergie ist demnach fair verteilt, wenn länger parkende BEVs eine größere Lademenge an Solarenergie bekommen als kürzer parkende BEVs. Neben diesem definierten Kriterium für Fairness, sind weitere Kriterien für den Lademanagement-Algorithmus zur Überprüfung der Fairness denkbar. In Kapitel 2 wird das faire Handeln damit definiert, alles zu berücksichtigen was sich auf eine Situation auswirkt, damit ein gerechtes Urteil gefällt werden kann. Ausgehend von dieser Definition könnte ein fairer Solarenergie-Anteil alternativ über die für die Strecke von Wohnort zur DHBW Karlsruhe benötigte Ladeenergie-Menge berechnet werden. Damit wäre der faire Solarenergie-Anteil abhängig von der Entfernung anstatt von der Parkdauer. Kund:innen mit längerem Anfahrtsweg bekommen in der Prognose mehr faire Solarenergie zugeteilt als Kund:innen mit kürzerem Anfahrtsweg.

Kapitel 7

Reflexion und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ziele der Simulation, die Vorgehensweise und wesentliche Ergebnisse der Arbeit zusammenfassend dargestellt und kritisch reflektiert. Auf Basis der in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse soll ein Ausblick auf Erweiterungen und Optimierungen des Lademanagementsystems die Arbeit abschließen.

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Modellierung, Umsetzung und Optimierung einer Lademanagement-Simulation durchgeführt und anschließend bewertet. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Algorithmus, der den Strom aus einer Solaranlage im Hochschulkontext der DHBW Karlsruhe verlustfrei und fair auf batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) verteilt. Dafür werden die grundlegende Begriffe der Hauptkomponenten des Lademanagementsystems, der Solaranlage und der BEVs, geklärt. Zur Simulation des Lademanagementsystems und zum Testen des Algorithmus werden die benötigten Simulationsanforderungen in einem Jupyter Notebook umgesetzt. Dieses stellt eine Schnittstelle zum Einlesen der Simulationsparameter- und daten bereit und erlaubt die Visualisierung der Ergebnisse. Zuvor werden die Anforderungen an das Lademanagementsystem abstrahiert und Vereinfachungen für die Entwicklung des Modells vorgenommen.

Die Ziele des Lademanagement-Algorithmus werden definiert und formalisiert. Der über mehrere Iterationen entwickelte Algorithmus wird mit den entsprechenden Berechnungen vorgestellt. Es folgt die Durchführung von Simulationstestdurchläufen, um die Funktionsweise und Ziele des Algorithmus zu überprüfen. Anhand der Ergebnisse der Testdurchläufe wird der Algorithmus auf Schwachstellen und Vorteile analysiert und bewertet. Anschließend wird die Fairness des Algorithmus Kriterium auf Basis der Fairness Definition diskutiert.

Die Ziele des Algorithmus sind neben der Fairness, eine hohe Wahrscheinlichkeit Solarenergie zu laden und ein minimaler Betrag der ungenutzten Solarenergie. Der implementierte Lademanagement-Algorithmus ist eine Kombination aus der Einteilung von Ladeplätzen über eine Warteliste und einer Nachoptimierung. Die Nachoptimierung übernimmt mittels Rückwärts-terminierung eine Voreinplanung der BEVs mit langen Parkzeiten. Das Abbruchkriterium des Ladevorgangs eines BEVs ist der zuvor berechnete faire Solarenergie-Anteil. Dieser berechnet sich vereinfacht als Summe der für ein BEV verfügbaren Solarenergie über der Parkzeit. Die verfügbare Solarenergie eines BEVs zu einem konkreten Zeitpunkt berechnet sich über die für das Lademanagement verfügbare Solarleistung zu diesem Zeitpunkt und der Anzahl parkender BEVs. Die Auswertung der Ergebnisse des Algorithmus zeigt weiteres Optimierungspotenzial. Die durchschnittliche Abweichung der geladenen Solarnergie vom prognostizierten fairen Solarenergie-Anteil beträgt 22,4% und sollte für die Erreichung des Ziels der Fairness bei 0% liegen. Die angezielte Lade-Wahrscheinlichkeit von 100% konnte fast erreicht werden. In der Analyse wurde zudem die Abhängigkeit der Lade-Wahrscheinlichkeit von der Verteilung der Ankunftswahrscheinlichkeiten herausgearbeitet. Das Ziel der verlustfreien Verteilung der überschüssigen Solarenergie konnte über den aktuellen Stand des Lademanagement-Algorithmus nicht erreicht werden. Dazu wäre eine weitere Optimierungsiteration notwendig. Neben dem in der Arbeit definierten Kriterium der Fairness über die Länge der Parkdauer wird ein weiteres Kriterium über die Länge des Anfahrtsweges vorgeschlagen.

Die Lademanagement-Simulation kann in verschiedene Richtungen optimiert werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern und damit beispielsweise die Rentabilität einer Solaranlage für die DHBW Karlsruhe zu überprüfen.

7.2 Ausblick

Die möglichen Erweiterungen und Optimierungen des Lademanagement-Systems sind vielfältig. Auf Basis der Erkenntnisse der Ergebnisauswertung soll ein kurzer Überblick über die Optimierungsmöglichkeiten geschaffen werden.

7.2.1 Erweiterung der Simulation

Die in der Arbeit vorgestellte Simulation ist eine erste stark vereinfachte Modellierung eines realen Lademanagementsystems. Diese Modellierung kann schrittweise erweitert werden, um die Realität genauer abzubilden. Beispielsweise kann eine Störfunktion auf den Tagesverlauf der

BEVs angewendet werden, um das Verhalten des Algorithmus bei Abweichungen des prognostizierten Verlaufs zu testen. Zudem kann eine Ladestandüberprüfung der Batterie der BEVs in den Ablauf der Simulation miteingebaut werden. Diese würde ein zweites Abbruchkriterium für den Aufladevorgang einführen: eine vollgeladene Batterie. Vor allem bei Ausweitung der Simulation auf das Wochenende, Feiertage oder Urlaube könnte die Ladestandüberprüfung sinnvoll sein. Da an diesen Tagen aufgrund der anzunehmenden höheren verfügbaren Solarleistung durch den geringeren Stromeigenverbrauch mit einer höheren Ladeleistung des BEVs zu rechnen ist.

7.2.2 Optimierungen des Algorithmus

Um die gesetzten Ziele des Lademanagement-Algorithmus zu erreichen, sind weitere Optimierungsschritte notwendig. Zum Einen muss in einem ersten Schritt das Zusammenspiel zwischen der Ladezeit-Einplanung über die Warteliste und der Nachoptimierung verbessert werden. Momentan wird beim Durchlauf der Ladezeit-Einplanung die Aufladung von BEVs gestoppt, sobald die Aufladung der fest eingeplanten BEVs aus der Nachoptimierung beginnt. Ein Ansatz wäre die feste Einplanung zu lockern und das Aufladen der Nachoptimierung erst zu starten, wenn die aktuell ladenden BEVs ihren fairen Solarenergie-Anteil erreicht haben. Dies würde allerdings dazuführen, dass die eingeplanten BEVs zeitlich nach hinten geschoben werden. Dadurch kann die Aufladung des fairen Solarenergie-Anteils für alle eingeplanten BEVs nicht mehr garantiert werden. In einem zweiten Ansatz könnte die Ladezeit-Einteilung über die Warteliste früher terminiert werden. Statt die Einplanung bis zum Ende des Simulationsintervalls durchzuführen, könnte diese bei Kollision mit der Einteilung der Nachoptimierung terminieren. Im nächsten Schritt könnten die zwei Einplanungszeiträume wieder miteinander kombiniert werden und überprüft, ob in den Übergangszeiträumen Lücken mit verfügbarer Solarenergie entstanden sind. Diese Lücken können dann mit weiteren, noch nicht eingeplanten BEVs gefüllt werden.

Zur Verhinderung, dass beispielsweise gegen Ende der Simulation überschüssiger Solarstrom nicht mehr eingeteilt wird, weil kaum noch BEVs zum Laden zur Verfügung stehen, sollte die Möglichkeit auf Verlängerung der Ladezeit implementiert werden. Das heißt, wenn ein BEV seinen fairen Solarenergie-Anteil erreicht hat, aber kein weiteres BEV zum Laden zur Verfügung steht, darf dieses weiterladen.

Um die Abhängigkeit der Lade-Wahrscheinlichkeit von den Schwankungen der Ankunftszeiten der BEVs zu verringern, muss ein Mechanismus zur Verhinderung der Blockierung von Ladepätzen entwickelt werden. BEVs mit überdurchschnittlich hohem fairem Solarenergie-Anteil,

könnten eine Grenze für diesen Anteil bekommen. Dazu könnte zum Beispiel das Ermitteln eines passenden Durchschnittswertes dienen, der dann als neuer prognostizierte Solarenergie-Anteil gesetzt wird. Hier muss sich die Frage gestellt werden, ob damit weiterhin die Fairness der Ladezeit-Einplanung gewährleistet ist.

Damit die Entwicklung und Erweiterung des Lademanagement-Algorithmus einfach möglich ist, muss die Visualisierung der Ergebnisse optimiert werden. Die Fehler der Darstellung des Diagramms der Ladeleistung pro Ladezeitraum eines BEVs müssen aufgelöst werden. Zudem könnte das Diagramm durch Einführung von Blöcken für die Aufladung, anstelle der übereinander gestapelten Graphen, eine Erhöhung der Übersichtlichkeit bedeuten.

7.2.3 Überprüfung der Rentabilität einer Solaranlage an der DHBW Karlsruhe

Ein weiteres Ziel im Rahmen der Lademanagement-Simulation ist die Rentabilität der Solaranlage am Standort der DHBW Karlsruhe zu analysieren und zu bewerten. Damit dies durchgeführt werden kann, müssen die bisher nur approximierten Simulationsdaten durch reale Datensätze ersetzt werden. Beispielsweise kann der genaue Datensatz des Stromeigenverbrauchs der DHBW Karlsruhe angefordert werden. Der Datensatz der Sonneneinstrahlung kann über die Daten der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg [7] angepasst werden. Eine realitätsgerechtere Darstellung der Verteilung der Ankunfts wahrscheinlichkeiten könnte mittels einer Analyse der Vorlesungspläne der Studierenden und Dozierenden, sowie der Arbeitszeiten der Mitarbeitenden erreicht werden. Des Weiteren wird bereits eine Mobilitätsanalyse der Studierenden an der DHBW Karlsruhe durchgeführt. Mit dieser Umfrage soll die Anzahl an Studierenden ermittelt werden, die mit einem Auto an die DHBW Karlsruhe kommen. Diese Anzahl kann im Anschluss verwendet werden, um die Anzahl an BEVs, die das System pro Tag im Durchschnitt erwarten kann, anzupassen. Diese Verbesserung der Datenlage ist ein Schritt, um die Rentabilität der Solaranlage besser überprüfen zu können.

Ein weiterer Schritt ist die Simulation mit verschiedenen Datensätzen zu durchlaufen, die unterschiedliche Szenarien abdecken. Wie reagiert der Algorithmus, wenn die Sonneneinstrahlung geringer ist oder wenn kaum verfügbare Solarenergie vorhanden ist?

Auch bei der Überprüfung der Rentabilität soll weiterhin der Fokus auf der Fairness des Algorithmus liegen.

Literatur

- [1] Ariane Kujau. *Erneuerbare Energien – klimafreundlich und zukunftsfähig*. <https://reset.org/knowledge/erneuerbare-energien---klimafreundlich-und-zukunftsfahig>. [Einsichtnahme am 18.10.2021].
- [2] Jingshuang Shen/Chuanwen Jiang/Bosong Li. »Controllable Load Management Approaches in Smart Grids«. In: Okt. 2015. DOI: 10.3390/en8101187.
- [3] Dipl.-Phys. Sarah Katharina Detzler. »Lademanagement für Elektrofahrzeuge«. In: 2016. DOI: 10.5445/KSP/1000057.
- [4] Jens Burkhardt. *Die Bedeutung von kWp*. <https://echtsolar.de/kwp-bedeutung-kwh-rechnung/>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [5] Nadine Kümpel. *kWp und kWh: So unterscheiden sich die Kennzahlen bei einer Photovoltaikanlage*. <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/kwp-kwh/>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [6] o.V. *Wie weit kommt man mit 1 kWh?* https://mobile-reviewz.com/de/qa/page=9b907352261d41aefb7f321a45931522_qa. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [7] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. *Solarpotenzial auf Dachflächen*. <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflächen/solarpotenzial-auf-dachflächen>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *BEV (Battery Electric Vehicle)*. <https://www.erneuerbar-mobil.de/glossar/bev-battery-electric-vehicle>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [9] EnBW Magazin. *Die Ladeleistung eines Elektroautos*. <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/laden/die-ladeleistung-eines-elektroautos/>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [10] Duden. *Fairness*. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Fairness>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].

- [11] Cambridge Dictionary. *Fairness*. <https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/fairness>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [12] o.V. *What is Python?* <https://docs.python.org/3/faq/general.html#what-is-python>. [Einsichtnahme am 14.05.2022].
- [13] Ionos. *Jupyter Notebook: Webdokumente für Datenanalyse, Live-Coding und mehr*. <https://www.ionos.de/digitalguide/websites/web-entwicklung/jupyter-notebook/>. [Einsichtnahme am 15.05.2022].