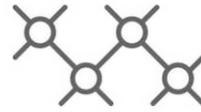




TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Institut für
Computertechnik
Institute of
Computer Technology

EINE DIPLOMARBEIT ÜBER

Simulation und Vergleich von Lademanagement-Konzepten aus der Sicht von Betreibern und Kunden

ZUR ERBRINGUNG DER ANFORDERUNGEN FÜR DEN GRAD DES

Diplom-Ingenieur

in

Embedded Systems (066 504)

von

Valentin Alber, BSc

01612959

Betreuer_Innen:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thilo Sauter

Projektass. Dipl.-Ing. Daniel Hauer, BSc

Projektass. Dipl.-Ing. Stefan Wilker, B.Eng

Wien, Österreich

Juni 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.

Kurzfassung

Der Klimawandel und die Endlichkeit der fossilen Rohstoffe zwingen unsere Gesellschaft im Bereich der Mobilität umzudenken. Eine Lösung hierfür kann der Umstieg auf Elektrofahrzeuge sein, welcher jedoch neue Herausforderungen mit sich bringt. So ist aktuell unser Stromnetz, insbesondere während Spitzenzeiten, nicht auf die prognostizierte Anzahl an Elektrofahrzeugen ausgelegt. Abhilfe schaffen Ladestationen, die mit Lademanagement-Konzepte ausgestattet sind. Sie ermöglichen es, die verfügbare Leistung unter der Verwendung verschiedener Algorithmen auf die angeschlossenen Fahrzeuge zu verteilen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen ausgewählter Konzepte für Ladestations-Betreiber und den/der einzelnen Fahrzeugnutzer:in zu untersuchen. Dies erfolgt mithilfe von Simulationen, welche repräsentative Eingangsparameter haben. Dazu zählen unter anderem verschiedene Fahrzeugtypen, unterschiedliche Standorte der Ladestationen und beispielhafte Preismodelle. Die Ergebnisse der Simulationen ermöglichen einen Vergleich der Ladezeit, benötigten Energie und Ladekosten der unterschiedlichen Lademanagement-Konzepte.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die verschiedenen Konzepte nur geringfügige Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Standorte aufweisen. Die Auslastung der Station hat jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Ladezeit der Fahrzeuge und zeigt klare Differenzen zwischen den Lademanagement-Konzepten auf. Es wurde auch deutlich, dass die Ladezeit und Energie von der Reihenfolge und Anzahl der Fahrzeuge abhängen, die bereits an der Ladestation laden. Dadurch ergeben sich sehr variable und für die/den Kundinn:en schwer nachvollziehbare Ladekosten.

Abstract

The climate change and the finite nature of fossil resources are forcing our society to rethink mobility. One solution to this can be the transition to electric vehicles, which brings new challenges. Currently our power grid, especially during peak times, is not designed to handle the projected number of electric vehicles. Charging stations equipped with charging management concepts provide a solution. They allow the available power to be distributed among connected vehicles using various algorithms.

The aim of this work is to examine the impacts of selected charging station concepts on operators and individual vehicle users. This will be achieved through simulations using representative input parameters, including different vehicle types, various charging station locations, and exemplary pricing models. The simulation results enable a comparison of charging time, energy consumption, and charging costs among different charging management concepts.

The comparison shows that the various concepts exhibit only minor differences in relation to different locations. However, the station's utilization has a significant impact on vehicle charging time and reveals clear distinctions between the charging management concepts. It has also become evident that charging time and energy consumption depend on the order and number of vehicles already charging at the station. As a result, charging costs vary greatly and are difficult for customers to ascertain.

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, Valentin Alber, BSc, 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: _____

Valentin Alber

Vienna, Austria, Juni 2023

Valentin Alber, BSc

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsfrage	2
1.3 Gliederung der Arbeit	3
2 Stand der Wissenschaft und Forschung	5
2.1 Antriebskonzepte	5
2.2 Systemansätze zum Laden	6
2.3 Lademodi und Steckertypen	7
2.4 Batterietypen und Ladeverfahren	9
2.5 Lademanagement Konzepte	10
2.6 Simulation	12
3 Methodik und Systemarchitektur	13
3.1 Methodik	13
3.2 Simulationsumgebung	14
3.3 Elektrofahrzeug-Simulationsmodell	16
3.3.1 Ladeverfahren	16
3.3.2 Fahrzeug-Zuweisung	19
3.4 Lademanagement-Konzepte	22
3.4.1 Sequenzielles Lademanagement-Konzept	23
3.4.2 Gleichmäßig Verteiltes Lademanagement-Konzept	24
3.4.3 Gleichmäßig Verteiltes Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung	25

3.4.4	Ladezustands abhängiges Lademanagement-Konzept	27
3.4.5	Gegenüberstellung der Lademanagement-Konzepte	28
4	Ergebnisse	33
4.1	Eingangsparameter	33
4.1.1	Mobilitätsverhalten	33
4.1.2	Fahrzeugmodelle	36
4.1.3	Ladetarif	37
4.1.4	Ladewirkungsgrad	40
4.1.5	Anschlussleistung der Ladestation	41
4.1.6	Überblick Eingangsparameter	41
4.2	Ausgangsgrößen (KPIs)	43
4.2.1	Ladezeit	44
4.2.2	Energie	45
4.2.3	Ladekosten	46
4.2.4	Überblick der Ausgangsgrößen (KPIs)	46
4.3	Simulationsergebnisse und Diskussion	47
4.3.1	Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte aus Sicht des Betreibers	47
4.3.2	Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte aus Sicht des Fahrzeugnutzer	54
5	Zusammenfassung und Ausblick	65
	Danksagung	67
	Literaturverzeichnis	68

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter der Fahrzeuge für die Gegenüberstellung der Lademanagement-Konzepte . . .	29
4.1	Ladetarif StromMOBIL TIME von Linz AG [42]	37
4.2	Ladetarif ÖAMTC ePower Zeitbasiert [43]	38
4.3	Ladetarif StromMOBIL EASY POWER von Linz AG [42]	38
4.4	Ladetarif ÖAMTC ePower Energiebasiert [43]	38
4.5	Überblick der Eingangsparameter für die Simulation	42
4.6	Überblick der Ausgangsgrößen für die Simulation	46
4.7	Zusammenfassung der Parameter für identische Fahrzeuge	55
4.8	Zusammenfassung der Parameter für unterschiedliche Fahrzeuge	57
4.9	Parameter der Fahrzeuge für die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher End-Ladezustände	62

Abbildungsverzeichnis

2.1	Überblick verschiedener Antriebskonzepte	6
2.2	Schematische Darstellung der AC und DC-Ladung	8
2.3	Schematische Darstellung einer Ladestation mit vier Ladepunkten	11
3.1	Überblick des Simulationsmodells	14
3.2	Architektur der BIFROST Simulationsumgebung	15
3.3	Simulation einer Siedlung im BIFROST-Frontend	15
3.4	Aufladeverhalten einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Zelle [29]	17
3.5	Vergleich verschiedener Ladevorgänge mit unterschiedlichen Ladeleistungen	19
3.6	Gegenüberstellung der zufällig generierten Startladezeiten für Fahrzeuge einer Ladestation in der Nähe von Arbeitsplätzen in der Innenstadt einer Großstadt	22
3.7	Ablaufdiagramm des Sequenziellen Lademanagement-Konzeptes	24
3.8	Ablaufdiagramm des Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzeptes	25
3.9	Ablaufdiagramm des Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzeptes mit Grenzleistung	27
3.10	Ablaufdiagramm des Ladezustands abhängigen Lademanagement-Konzeptes	28
3.11	Ladezustand und Wirkleistung beim unkontrollierten Laden	29
3.12	Ladezustand und Wirkleistung beim Sequenziellen Lademanagement-Konzept	30
3.13	Ladezustand und Wirkleistung beim Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept	30
3.14	Ladezustand und Wirkleistung beim Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung	31
3.15	Ladezustand und Wirkleistung beim Ladezustands Abhängigen Lademanagement-Konzept	31
4.1	Standardlastprofile der Standorte Typ 1, Typ 3 und Typ 6	35
4.2	Beispiele für den ladeleistungsabhängigen Wirkungsgrad des OBC	40
4.3	Konfiguration über das BIFROST-Frontend	43

4.4	Durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge einer Ladestation im inneren Stadtbereich einer Großstadt an unterschiedlichen Standorten	48
4.5	Durchschnittliche Ladezeit in Minuten pro Fahrzeug der Standardlastprofile Typ 1 bis Typ 6	50
4.6	Durchschnittliche Ladezeit mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrzeugen pro Tag und Ladepunkt bei einer Anschlussleistung der Ladestation von 20 kW und 50 kW	51
4.7	Durchschnittliche benötigte Energie und Energie-Faktor unter Berücksichtigung leistungsabhängiger OBC-Wirkungsgrade	53
4.8	Ladezeit der Fahrzeuge bei unterschiedlichen Konzepten	56
4.9	Ladezeit beim Gleichmäßig Verteilten und Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung	58
4.10	Ladekosten des zeitbasierten und energiebasierten Tarifs bei unterschiedlichen Konzepten	59
4.11	Ladekosten des angepassten zeitbasierten und linearen Tarifs bei unterschiedlichen Konzepten	61
4.12	Ladekosten bei unterschiedlichen Konzepten in Abhängigkeit vom End-Ladezustand der Fahrzeuge	63

Acronyms

- AC** Wechselstrom. xi, 7, 8, 9, 21, 36, 38, 47, 49, 57
- API** Application Programming Interface. 15
- BEF** Batterieelektrischen Fahrzeugen. 5, 6
- CAN** Controller Area Network. 9
- CSS** Combined Charging System. 9, 36
- CSV** Comma-Separated Values. 36, 40
- DC** Gleichstrom. xi, 7, 8, 9, 21, 36, 38, 57
- IC-CPD** In-cable Control and Protection Device. 8
- JSON** JavaScript Object Notation. 15, 20, 36, 37, 42
- KI** Künstliche Intelligenz. 11
- KPI** Key-Performance-Indicator. 13, 14, 43, 44, 47
- OBC** On Board Charger. xi, 7, 36, 40, 42, 52, 54
- PKW** Personenkraftwagen. 7, 66
- PLC** Powerline Communication. 8, 9
- PWM** Pulsweitenmodulation. 8
- REST** Representational State Transfer. 15
- SoC** State of Charge. 17, 19, 27, 28, 29, 30, 31, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65
- TRNG** True Random Number Generators. 22
- UI** User Interface. 14

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Unsere Gesellschaft steuert aktuell auf große Herausforderungen zu. Eine Schwierigkeit stellen die schwindenden Ressourcen von fossilen Rohstoffen dar. Besonders davon betroffen ist das Ölvorkommen, welches bei einem unveränderten Verbrauch noch für etwa 51 Jahre ausreichen wird. Es wäre jedoch fatal, wenn dieser Energieträger vollkommen ausgebeutet wird, da dieser immer mit dem Ausstoß von Kohlenstoffdioxid einhergeht [1]. Bereits jetzt haben die Emissionen von Treibhausgasen zu einer Steigerung der globalen Oberflächentemperatur zwischen 2011 und 2020 um 1,1 °C geführt. Die Folgen dieser Erwärmung zeigen sich schon heute in Wetterextremen, auch hier in Österreich. Außerdem hat die Klimakrise Auswirkungen auf die weltweite Nahrungsmittel- und Wassersicherheit, sowie die menschliche Gesundheit [2]. Die Abwendung des Klimawandels und die damit verbundene Lösung von fossilen Treibstoffen ist somit essenziell für die Zukunft unserer Gesellschaft. Aus diesem Grund ist die Dekarbonisierung des Verkehrssektors, unter anderem durch den Ausbau von Elektromobilität, unerlässlich.

Es gibt eine Vielzahl an Plänen für den Verkehrssektor, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens und die Klimaneutralität bis 2040 zu erreichen. So wurde in Österreich der Mobilitätsmasterplan 2030 erarbeitet, der die ausschließliche Neuzulassung von emissionsfreien Fahrzeugen bis spätestens 2030 vorsieht [3]. Die Umsetzungsstrategie des Mobilitätsmasterplans 2030 für die Energiewende im Straßenverkehr zielt darauf ab, dass bis 2030 mindestens 1,6 Millionen vollelektrische Fahrzeuge auf Österreichs Straßen fahren [4]. Schon jetzt steigen die Verkaufszahlen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Österreich deutlich. So wurden im Jahr 2022 rund 34.200 Fahrzeuge mit Elektroantrieb neu zugelassen. Ende Jänner 2023 gab es in Österreich 112.675 rein elektrisch betriebene Fahrzeuge [5] [6].

Diese steigenden Zahlen im Bereich der Elektromobilität bringen jedoch auch neue Herausforderungen mit sich. Insbesondere das Stromnetz wird durch den Zuwachs leistungsintensiver Verbraucher wie Elektrofahrzeuge in Zukunft stark beansprucht. Es ist zu erwarten, dass es aufgrund des Ausbaus der Elektromobilität zu einer Überbeanspruchung des Stromnetzes, besonders während Spitzenzeiten, kommen wird [7]. Ein damit notwendig werdender Ausbau des Stromnetzes ist jedoch sehr teuer und sollte daher vermieden werden. Um dennoch die Stromversorgung zu sichern, müssen die Lastspitzen abgeflacht werden. Daher ist es in Zukunft notwendig, dass das Laden der Elektrofahrzeuge koordiniert wird. Das ermöglichen Lademanagement-Konzepte. Diese begrenzen die Anschlussleistung einer gesamten Ladestation, indem die verfügbare Leistung auf die angeschlossenen Fahrzeuge verteilt wird. Dabei ist nicht die private Wallbox zu Hause gemeint, sondern es handelt sich um Ladestationen mit mehreren regulierbaren Ladepunkten.

1.2 Forschungsfrage

Lademanagement-Konzepte ermöglichen somit die vorhandene Netzinfrastruktur optimal zu nutzen und werden benötigt, um die Stabilität des Netzes zu gewährleisten. Diese Konzepte haben unterschiedliche Konsequenzen für den Ladestationsbetreiber und die Fahrzeugnutzer¹. Diese Arbeit will daher die Frage beantworten:

Welche Auswirkungen hat das Laden von PKWs mit unterschiedlichen Lademanagement-Konzepten auf Stationsbetreiber und Fahrzeugnutzer?

Um diese Frage beantworten zu können, müssen zunächst die Rahmenbedingungen und Eingangsparameter identifiziert werden, die auf das Ladeverhalten einwirken. Hierbei ist zu beachten, dass der Fokus auf Personenkraftwagen (PKWs) liegt und die zu betrachtende Ausgangssituation variabel ist. So kann beispielsweise eine Ladestation in einem Wohngebiet oder in einer Innenstadt betrachtet werden. Gleichzeitig können unterschiedliche Parameter wie die verfügbare Anschlussleistung der Ladestation oder die Start-Ladezeit das Ladeverhalten der Fahrzeuge beeinflussen.

¹Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

Des Weiteren ist wichtig zu klären, welche Indikatoren relevant sind, um einen Vergleich und eine anschließende Bewertung der verschiedenen Lademanagement-Konzepte zu ermöglichen. Schließlich sollen die Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte mit Hilfe von Simulationen aus den beiden Perspektiven untersucht werden: Zum einen aus dem Blickwinkel des Ladestation-Betreibers und zum anderen aus der Sicht des Fahrzeugnutzers.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Teilfragen:

- Welche Rahmenbedingungen und Eingangsparameter beeinflussen das Ladeverhalten im Zusammenhang mit den Lademanagement-Konzepten?
- Welche Indikatoren sind relevant, um die Lademanagement-Konzepte vergleichen und bewerten zu können?
- Welche konkreten Auswirkungen haben die Lademanagement-Konzepte aus Sicht des Ladestationsbetreibers und des Fahrzeugnutzers?

1.3 Gliederung der Arbeit

Zunächst werden verschiedene Aspekte zum Stand der aktuellen Forschung behandelt, darunter Antriebskonzepte, Systemansätze zum Laden, Lademodi und Steckertypen, Batterietypen und Ladeverfahren sowie verschiedene Lademanagement-Konzepte. Anschließend wird in Kapitel 3 die Methodik und Simulationsumgebung beschrieben, welche zur Beantwortung der Forschungsfrage verwendet wird. Im weiteren Verlauf wird die Architektur der Simulation sowie das entwickelte Simulationsmodul erläutert. In den darauf folgenden Abschnitten wird die Implementierung des Ladeverfahrens und die Fahrzeugzuweisung näher erklärt. Im Anschluss daran werden die ausgewählten Lademanagement-Konzepte mathematisch formuliert, darunter das sequenzielle Lademanagement-Konzept, das gleichmäßig verteilte Lademanagement-Konzept, das gleichmäßig verteilte Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung und das Ladezustands-abhängige Lademanagement-Konzept. Im Kapitel 4 werden die Eingangsparameter identifiziert, die das Ladeverhalten der Fahrzeuge beeinflussen. Zudem werden die für den Vergleich erforderlichen Indikatoren erarbeitet und detailliert beschrieben. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der Simulation diskutiert und Schlussfolgerungen gezogen. Einerseits werden die Auswirkungen der Konzepte auf den Ladestations-Betreiber und andererseits das Ladeverhalten der einzelnen Fahrzeuge untersucht. Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft und Forschung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung präsentiert. Zur Einführung werden die aktuell geläufigen Antriebskonzepte von Fahrzeugen gegenübergestellt. Anschließend werden unterschiedliche Ansätze zum Laden von Elektrofahrzeugen und das typische Ladeverfahren für Lithium-Ionen-Batterien besprochen. Am Ende dieses Kapitels werden in der Forschung diskutierte Lademanagement-Konzepte erläutert und näher auf die Simulation eingegangen.

2.1 Antriebskonzepte

Bei der Betrachtung verschiedener Antriebskonzepte von Fahrzeugen kann zwischen den konventionellen Verbrennungsmotoren und rein Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEF) unterschieden werden. Die Kombination aus beiden Konzepten wird Hybrid genannt, von denen unterschiedliche Arten vorkommen. Ein Überblick der verschiedenen Konzepte ist in Abbildung 2.1 zu finden.

Eine Ausprägung des Hybrid-Fahrzeugs ist der Parallele Hybrid. Dieser kann sowohl elektrisch als auch mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden. Die Batterie wird dabei nur durch Bremsenergie und den Verbrennungsmotor geladen. Das Fahrzeug kann also nicht an eine Ladestation angeschlossen werden. Dadurch wird das Auto fast ausschließlich durch fossile Energie betrieben. Der Plug-in Hybrid kann im Gegensatz zum Parallelen Hybrid auch extern geladen werden, weshalb er Kurzstrecken rein elektrisch fahren kann. Bei Langstrecken hingegen wird auf den Verbrennungsmotor zurückgegriffen. Rein elektrisch angetrieben wird der Serielle Hybrid, welcher über einen kleinen Generator samt Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie verfügt. Dieser wird verwendet, um die Reichweite bei fehlenden Ladepunkten zu erhöhen, weshalb er auch Range Extender genannt wird [8].

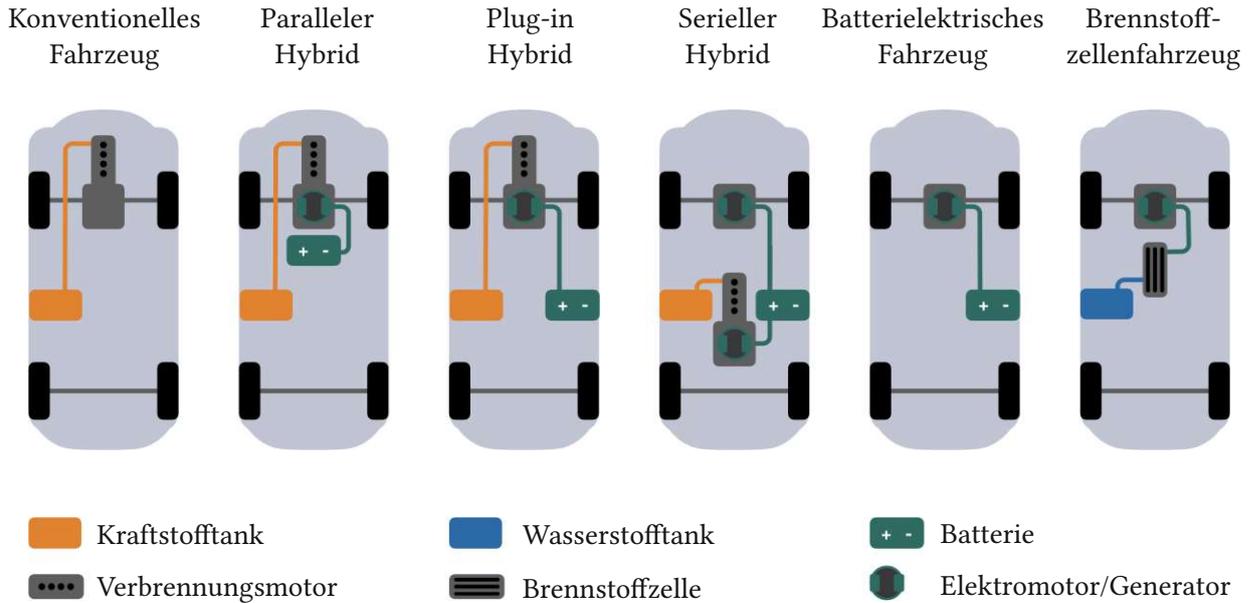


Abbildung 2.1: Überblick verschiedener Antriebskonzepte

BEFs haben keinen Verbrennungsmotor und werden ausschließlich elektrisch betrieben. Die Reichweite ist von der Kapazität der Batterie und einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur abhängig. Ein weiteres Antriebskonzept ist das Brennstoffzellenfahrzeug, das über eine Brennstoffzelle Wasserstoff und Sauerstoff in elektrische Energie umwandelt und dadurch den Elektromotor betreibt. Der Wasserstoff kann entweder in flüssiger oder gasförmig Form im Tank gespeichert werden. Dieses Fahrzeug-Konzept findet in dieser Arbeit keine weitere Berücksichtigung, da es eine grundlegend andere Ladeinfrastruktur benötigt. Für weitere Literatur dazu sei hier auf das Buch von Sterner und Stadler *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration* [8] verwiesen.

2.2 Systemansätze zum Laden

Ein Großteil der genannten Fahrzeuge-Konzepte wird teilweise oder vollständig durch eine Batterie betrieben. Für das Laden dieser Fahrzeuge gibt es unterschiedliche Ansätze. Grundsätzlich wird zwischen Batteriewechsel sowie induktivem und konduktivem Laden unterschieden.

Beim Batteriewechsel wird die komplette Batterie durch eine geladene Batterie in einer Wechselstation ausgetauscht. Dort erfolgt die Ladung und Wartung des Energiespeichers, weshalb eine schnelle Weiterfahrt möglich ist. Allerdings gibt es bei diesem Ansatz technische Schwierigkeiten, da die Batterien bis jetzt nicht für einen regelmäßigen Austausch standardisiert sind [9].

Beim induktiven Laden hingegen erfolgt die Energieübertragung mittels eines elektromagnetischen Feldes über zwei gekoppelte Spulen [10]. Diese Art des Ladens ist für den Nutzer sehr komfortabel, die Realisierung ist jedoch mit hohen Herausforderungen verbunden. Beispielsweise müssen die Spulen optimal positioniert sein, um zuverlässiges und effizientes Laden zu ermöglichen [11].

Am meisten verbreitet ist das Kabelgebundene-Laden, auch konduktives Laden genannt. Hierbei wird das Fahrzeug mit einem Kabel und einem geeigneten Stecker an eine Ladesäule angeschlossen und anschließend geladen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ausschließlich auf dieses Ladeverfahren eingegangen, da dies das aktuell meist verwendete Ladeverfahren ist.

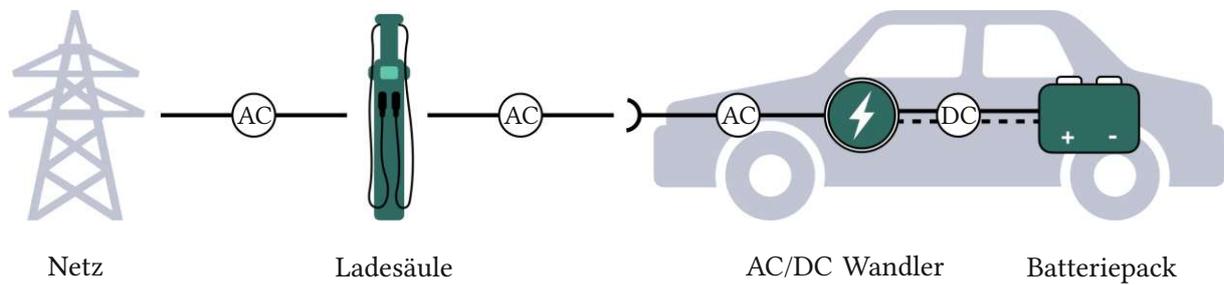
2.3 Lademodi und Steckertypen

Beim Kabelgebundenem-Laden von Elektrofahrzeugen gibt es verschiedene Lademodi und Steckertypen, welche in der internationalen Norm IEC 62196 beziehungsweise in Österreich in der ÖVE/ÖNORM EN 62196 definiert sind. Grundsätzlich wird zwischen Wechselstrom (AC)-Laden und Gleichstrom (DC)-Laden differenziert. Der Hauptunterschied ist der Ort der Umwandlung von AC auf DC. Eine Umwandlung auf DC ist notwendig, da Batterien immer mit Gleichstrom geladen werden, das Netz jedoch Wechselstrom liefert.

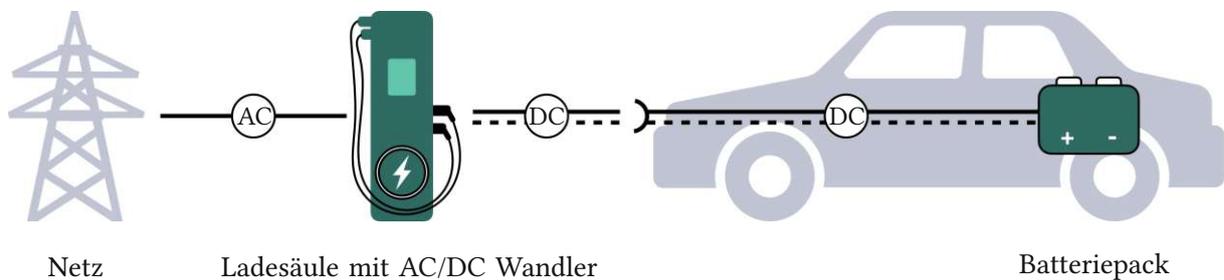
Wie in Abbildung 2.2(a) ersichtlich wird beim AC-Laden der Wechselstrom erst im Fahrzeug mit einem AC/DC-Wandler gleichgerichtet. Dieser wird auch On Board Charger (OBC) bezeichnet. Beim DC-Laden hingegen ist der Gleichrichter in der Ladesäule untergebracht, wie in Abbildung 2.2(b) gezeigt. In einer Ladesäule kann ein größerer und somit leistungstärkerer Wandler als in einen PKW eingebaut werden. So ermöglicht eine DC-Ladesäule eine Ladung mit höherer Leistung, weshalb sie auch Schnellladesäule genannt wird.

Neben der Unterscheidung zwischen der AC- und DC-Ladung können vier verschiedene Modi differenziert werden. Bei den Lademodi 1 bis 3 erfolgt die Ladung mit Wechselstrom, bei Modus 4 hingegen wird mit Gleichstrom geladen.

Beim Lademodus 1 erfolgt das Laden an einer gewöhnlichen Haushaltssteckdose mit maximal 11 kW. Bei diesem Lademodus erfolgt keinerlei Kommunikation zwischen Fahrzeug und Steckdose. Aus diesem



(a) Schematische Darstellung der AC-Ladung an einer Ladestation



(b) Schematische Darstellung der DC-Ladung an einer Schnellladestation

Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der AC und DC-Ladung

Grund unterstützt die europäische Automobilindustrie den Modus nicht mehr, weshalb er bei Neuzulassungen nicht mehr verwendet wird.

Auch beim Lademodus 2 erfolgt das Laden des Elektrofahrzeugs über eine Haushaltssteckdose, jedoch mit einer erhöhten maximalen Ladeleistung von 22 kW. Hier enthält das Ladekabel ein In-cable Control and Protection Device (IC-CPD), das Sicherungstechnik und eine Kommunikationseinheit integriert hat. Das IC-CPD übernimmt die Funktion einer Ladestation, indem es das Laden steuern kann.

Im Gegensatz zu den bereits genannten Lademodi wird beim Modus 3 das Fahrzeug nicht mehr direkt an eine Haushaltssteckdose angeschlossen. Das Laden erfolgt nun über ein Ladesteckersystem. Mittels Pulsweitenmodulation (PWM) wird der maximal zulässige Ladestrom über einen Duty Cycle eingestellt. Der Duty Cycle kann außerdem signalisieren, dass eine digitale Kommunikation, in Europa eine Powerline Communication (PLC), das Laden regelt.

Der Lademodus 3 kann mit einem Typ-2-Stecker erfolgen, welcher der europäische Standard für Ladesteckersysteme ist. Er enthält fünf Leistungskontakte, drei Außenleiterkontakte, einen Kontakt für den Neutralleiter und ein Schutzkontakt. Zudem gibt es noch einen Kontakt zur Feststellung der Anwesenheit eines Steckers, den Proximity-Pilot, und einen Kontrollkontakt. Der Steckertyp ist für eine Ladeleistung von 3,7 kW bis 43 kW ausgelegt und unterstützt mehrere Betriebsarten. Er kann nicht nur beim ein- und dreiphasigen Wechselstrom-Laden, sondern auch beim Gleichstrom-Laden verwendet werden [12], welcher nun beschrieben wird.

Der Lademodus 4 standardisiert das Gleichstrom-Laden und unterscheidet sich damit von den bisher beschriebenen Modi. Aus diesem Grund ist der AC/DC-Wandler und das Ladegerät in der Ladesäule verbaut und nicht, wie in den anderen Modi, im Fahrzeug. Hier erfolgt die Kommunikation zwischen der Ladestation und dem Batteriemanagement-System über ein Controller Area Network (CAN)-Bus oder PLC-Bus. Für den europäischen Markt gibt es zwei relevante Stecker, das CHAdeMO-System und das Combined Charging System (CSS), welches AC- und DC-Laden unterstützt. Über den CSS-Stecker kann mit einer maximalen Leistung von 350 kW und über den CHAdeMO-Stecker mit maximal 50 kW geladen werden [13].

2.4 Batterietypen und Ladeverfahren

Da viele Batterietypen als Energiespeicher in Fahrzeugen verwendet werden können, sind heute verschiedene Batterien in Elektroautos verbaut. Einige Batterietypen bewährten sich in der Praxis nicht und werden nicht mehr in Fahrzeugen verbaut. Zu diesen zählen Blei- und Nickel-Metallhydrid Batterien, da diese eine geringe gewichtsbezogene Energiedichte aufweisen. So liegt bei Nickel-Metallhydrid Batterien die Energiedichte bei 80 Wh/kg. [14].

Ein deutlich besserer Energiespeicher für Elektroautos sind Batterien auf Lithiumbasis wie Lithium-Ionen-, Lithium-Polymer-, Lithium-Titanat- und Lithium-Eisenphosphat Batterien. Sie weisen eine deutlich bessere gewichtsbezogene Energiedichte mit Werten im Bereich von 100 bis 200 Wh/kg auf [15].

Daneben gibt es Hochtemperaturakkus wie Natrium-Nickelchlorid Batterien, die eine lange Lebensdauer haben. Dafür haben sie aber eine geringe spezifische Leistung und benötigen hohe Betriebstemperaturen, was mit großen Aufwand verbunden ist [16].

Die Energiespeicher-Forschung der letzten Jahre konzentriert sich vor allem auf Lithium-Schwefel-Batterien, die eine erheblich größere Reichweite von Elektrofahrzeugen ermöglichen würden. Theoretisch könnten sie eine Energiedichte von 2600 Wh/kg erreichen. Damit könnte sie der Nachfolger der heute verwendeten Lithium-Ionen-Batterie werden, die eine theoretisch mögliche Energiedichte von 287 Wh/kg aufweisen. Bis jetzt ist die Batterie jedoch noch nicht marktreif [17].

Für Lithium-Ionen-Batterien wird ein Ladeverfahren benötigt, das die von der Zellchemie abhängigen Spannungsgrenzen einhält. Wird die Spannungsgrenze unterschritten, tritt eine Tiefentladung der Zelle ein, was zur einer Schädigung der Elektrode führt. Im schlimmsten Fall kann dabei eine thermische Zerstörung eintreten. Um dies zu verhindern, wird für Lithium-Ionen-Batterien das IUa-Ladeverfahren, auch CCCV-Ladeverfahren genannt, empfohlen [18]. Die Ladung setzt sich dabei aus zwei Ladephasen zusammen, einer Konstantstromphase, auch I-Phase genannt, und einer Konstantspannungsphase, auch U-Phase genannt. Die Ladung beginnt mit der Konstantstromphase die so lange anhält, bis eine für das System typische Spannung, die Ladeschlussspannung, erreicht wird. Nun folgt die Konstantspannungsphase, bei der die Batterie mit der konstanten Spannung, der Ladeschlussspannung, geladen wird. Dabei sinkt der Ladestrom ab, und wenn dieser den Ladeschlussstrom erreicht, ist die Ladung beendet [8].

2.5 Lademanagement Konzepte

Konzepte für das Lademanagement von Elektrofahrzeugen müssen eine gerechte Leistungsaufteilung gewährleisten, ohne dass die Mobilität der Fahrzeugnutzer zu stark eingeschränkt wird. Ein weiteres Ziel ist es, die Dateneingabe der Nutzer auf ein Minimum zu reduzieren, damit das Lademanagement-Konzept akzeptiert wird. Um beide Anforderungen miteinander verknüpfen zu können, muss ein Kompromiss gefunden werden.

Es existieren in der Forschung unterschiedliche Konzepte, um die Ladeleistung von Elektrofahrzeugen zu verteilen. Beispiele hierfür sind das First-Come-First-Serve Prinzip, welches die Reihenfolge der Ankunft berücksichtigt, ein Ansatz zur gleichmäßigen Verteilung der verfügbaren Ladeleistung sowie das bevorzugte Laden von komplett entleerten Fahrzeugen. Zudem wird die Kombination mehrerer Konzepte untersucht, wie beispielsweise das bevorzugte Laden entleerter Fahrzeuge in Verbindung mit First-Come-First-Serve oder die Berücksichtigung einer angegebenen maximalen Ladezeit in Kombination mit bevorzugtem Laden [19].

Außerdem gibt es Ideen und Entwicklungen von Künstliche Intelligenz (KI)-basierten Konzepten, um die Dateneingabe der Fahrzeugnutzer überflüssig zu machen. Damit jedes Fahrzeug trotzdem pünktlich geladen ist, berechnet die KI die Priorisierung der Fahrzeuge anhand historischer Ladedaten, Energiemengen und Standzeiten [20]. Es gibt auch Forschungsarbeiten, die mittels eines verteilten neurodynamischen Algorithmus versuchen, Lademanagement-Konzepte zu optimieren [21].

Andere Ansätze betrachten das Elektrofahrzeug nicht allein als Verbraucher, sondern auch als potenziellen Energiespeicher. Dabei sollen die Batterien der Fahrzeuge beispielsweise bei Netzengpässen als zusätzlicher Speicher für den Netzbetreiber dienen. Das Fahrzeug kann bei hoher volatiler Erzeugung Strom speichern und ihn bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen. Dieses Konzept ist auch unter dem Begriff Vehicle-to-Grid oder bidirektionales Laden bekannt. Mit diesem Ladeverfahren gehen einige, noch nicht endgültig beantwortete, rechtliche Fragestellungen einher. Beispielsweise muss geklärt werden, wer für die Kosten des Akkuverschleißes aufkommt [22]. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich jedoch nicht auf bidirektionales Laden.

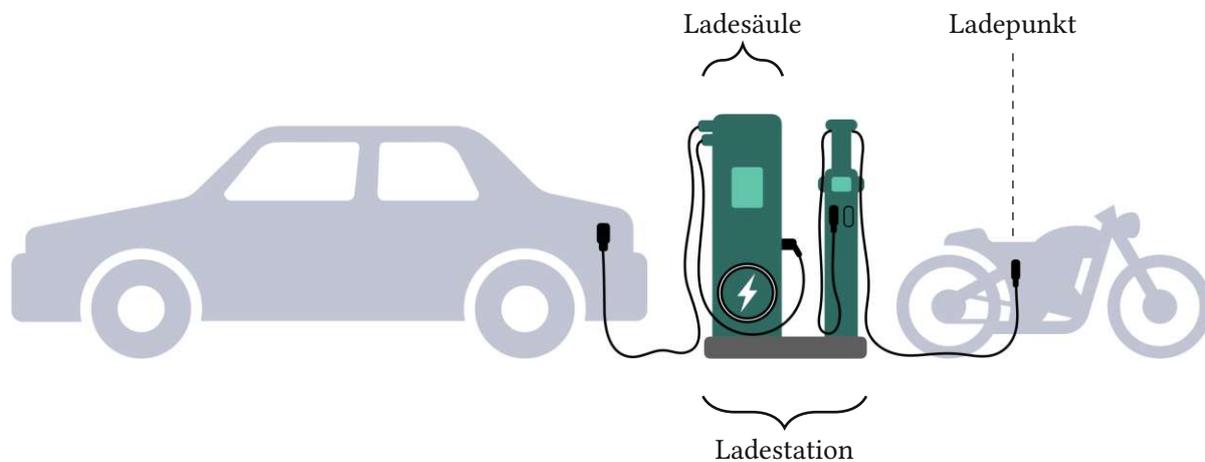


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer Ladestation mit vier Ladepunkten

Zur Klarstellung der in dieser Arbeit verwendeten Terminologie dient Abbildung 2.3, welche eine Ladestation mit zwei Ladesäulen und jeweils mehreren Ladepunkten zeigt. In diesem Zusammenhang wird die Ladestation als eine Einheit betrachtet, die das Lademanagement-Konzept anwendet und die zur Verfügung stehende Leistung auf ihre genutzten Ladepunkte verteilt.

2.6 Simulation

Zum Vergleichen verschiedener Lademanagement-Konzepte in bestimmten Situationen bietet sich eine Simulation oder eine mathematische Optimierung an. Bei der mathematischen Optimierung wird das Problem mit einem formalen Ansatz gelöst. Dabei wird versucht, ein mathematisches Modell unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen so zu optimieren, dass die Zielfunktion maximiert oder minimiert wird.

In dieser Arbeit wird jedoch eine Simulation verwendet, da die Autos mit einer stochastischen Wahrscheinlichkeit an der Ladestation ankommen sollen. Zudem werden viele Parameter verwendet, welche die Verwendung einer Simulation nahelegt. Als Basis der Simulation dienen dennoch mathematische Modelle, wie das Ladeverfahren.

Bei der Beantwortung der Forschungsfrage mittels Simulation bieten sich Simulationsumgebungen von unterschiedlichen Entwicklern an. Eine davon ist *Matlab* des Herstellers *The MathWorks*. Sie ist primär für die Berechnung numerischer Probleme mithilfe von Matrizen ausgelegt, kann die Ergebnisse aber auch graphisch darstellen. Die Eingabe erfolgt entweder über eine Kommandozeile oder einer Skriptdatei [23].

Matlab ist auch die Basis der zeitgesteuerten Simulationsumgebung *Simulink*. Dieses Simulationstool ist für ein Model-Based-Design ausgelegt und bietet wiederverwendbare Komponenten und Bibliotheken an. Es werden kontinuierliche und diskrete Schaltblöcke zur Verfügung gestellt, zusätzlich kann auch *Matlab* Code im Modell integriert werden. Dabei wird der Datenfluss zwischen den Blöcken über Verbindungslinien visualisiert. Das Problem wird dann numerisch durch einen Solver gelöst [24].

In der vorliegenden Arbeit wird die Simulationsumgebung BIFROST der Firma *Siemens AG Österreich* [25] verwendet, da diese zusätzlich eine anschauliche Visualisierung der Ergebnisse bietet. Ein weiterer Grund für diese Auswahl ist, dass das erstellte Simulationsmodell in laufenden Forschungsprojekten der TU Wien verwendet werden kann. So wurde diese Arbeit im Kontext des Forschungsprojekts DiPS4EV@work abgewickelt. DiPS4EV@Work erhält Förderung vom Klima- und Energiefonds im Rahmen des Forschungsprogramms Zero Emission Mobility (5. Ausschreibung), welches von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter Projektnummer 899909 abgewickelt wird. Eine Vorstellung der BIFROST-Simulationsumgebung erfolgt in Kapitel 3.

Kapitel 3

Methodik und Systemarchitektur

In diesem Kapitel wird zu Beginn die Methodik und anschließend die Simulationsumgebung beschrieben. Dabei wird auf die Architektur und den Ablauf einer BIFROST-Simulation eingegangen. Des Weiteren wird das Simulationsmodell des Ladeverfahrens erklärt und die Implementierung der Fahrzeug-Zuweisung beschrieben. Am Ende dieses Kapitels werden die verschiedenen Lademanagement-Konzepte anhand der mathematischen Formulierung und Ablaufdiagramme definiert.

3.1 Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein Simulationsmodell entworfen, das in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Das Modell dient als Framework, das durch eine automatisierte Simulation Ladekonzepte untereinander vergleicht. Dabei kann die Simulation durch die Veränderung von Eingangsgrößen beeinflusst und angepasst werden. Die Ausgangsgrößen sind die Ergebnisse dieser parametrisierten Simulation und dienen als Leistungskennzahlen der Lademanagement-Konzepte. Deshalb werden diese im weiteren Verlauf der Arbeit Key-Performance-Indicators (KPIs) genannt. Durch das Fixieren von bestimmten Eingangsgrößen und Veränderungen anderer Eingangsparameter können gezielt spezifische Aspekte der Konzepte untersucht werden.

Zu den Eingangsparametern zählt das Mobilitätsverhalten, die Fahrzeugmodelle, der Ladetarif, der Ladewirkungsgrad und die maximale Anschlussleistung der Ladestation. Eine genaue Erklärung dieser Eingangsgrößen ist im Abschnitt 4.1 zu finden. Die KPIs des Simulationsmodells sind die Ladezeit, Ladekosten und die benötigte Energie, die im Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben werden. Die automatisierte Simulation modelliert das Verhalten mehrerer Ladestationen mit unterschiedlichen Lademanagement-Konzepten. Für die Umsetzung des Simulationsmodells wurde ein BIFROST-Modul entwickelt,

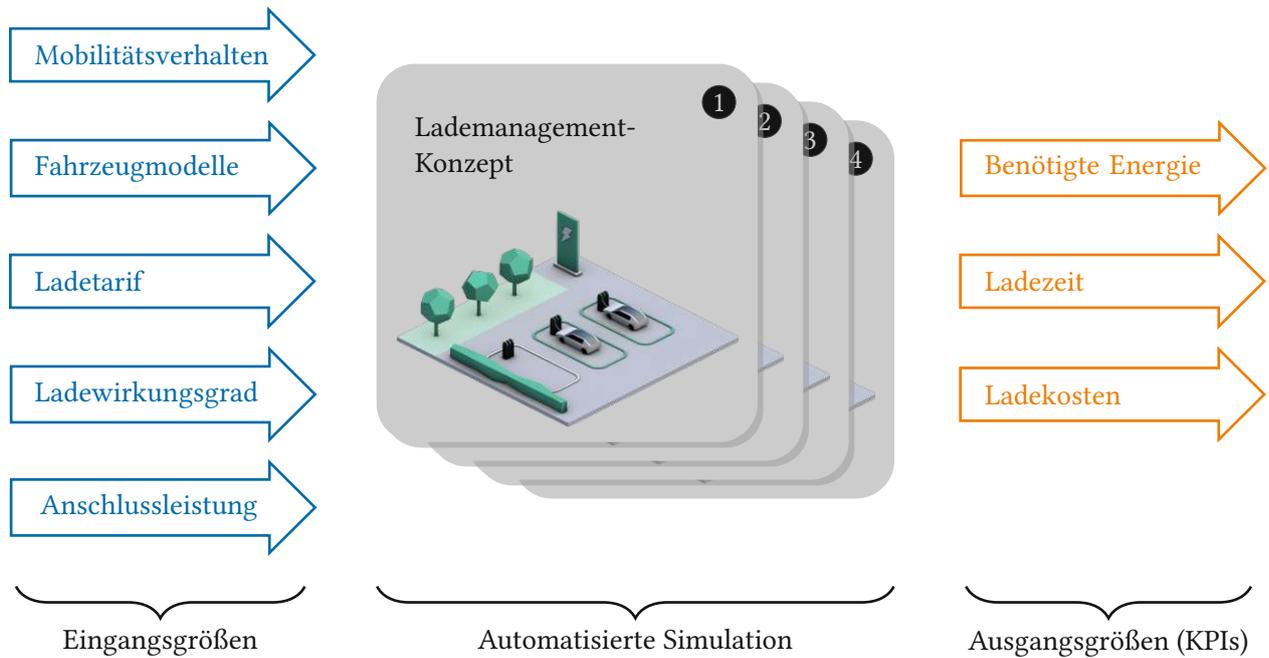


Abbildung 3.1: Überblick des Simulationsmodells

das unter anderem die Logik der Lademanagement-Konzepte und das Verhalten der CCCV-Ladung implementiert. Im folgenden Abschnitt der Arbeit 3.2 wird auf die Simulationsumgebung BIFROST und deren Architektur eingegangen.

3.2 Simulationsumgebung

BIFROST ist ein webbasiertes zeitgesteuertes Simulationstool von der Firma Siemens AG-Österreich, das die verschiedenen Möglichkeiten intelligenter Energieinfrastruktur veranschaulicht. Anhand der Simulation können die Auswirkungen von verschiedenen Einflüssen, wie die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, in einer ausdrucksvollen Benutzeroberfläche dargestellt werden [26].

Die Hauptkomponenten der BIFROST Simulationsumgebung sind der BIFROST-Kern, eine Datenbank und externe Module. Der BIFROST-Kern setzt sich wiederum aus dem Backend und Frontend zusammen, wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist. Das Frontend bietet eine 3D-Web-User Interface (UI) für die Konstruktion von Siedlungen und die Möglichkeit für den Benutzer, die Simulationsumgebung seinen Bedürfnissen anzupassen [27]. Ein Beispiel einer Siedlung im BIFROST-Frontend ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

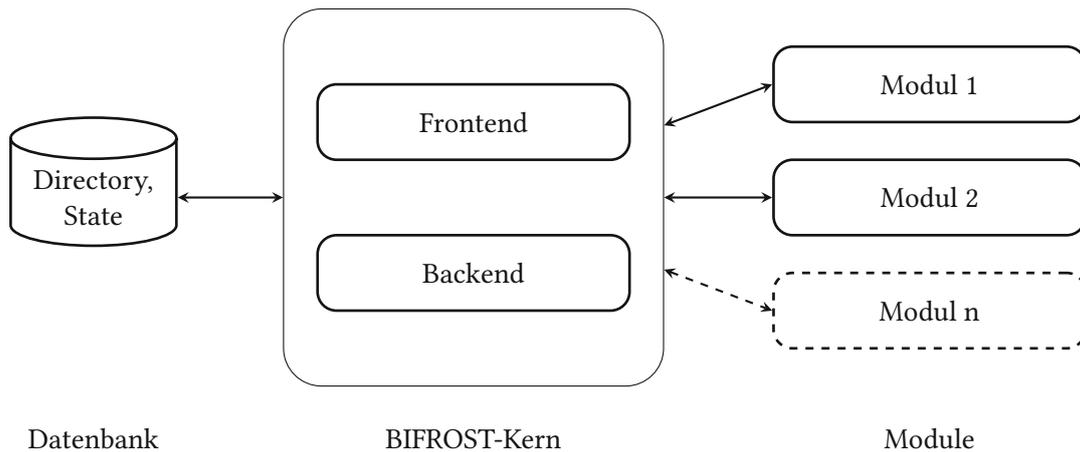


Abbildung 3.2: Architektur der BIFROST Simulationsumgebung

Das Backend verwaltet das interne Datenmodell, das aus einem BIFROST-Directory und einem BIFROST-State besteht. Im Directory sind alle Informationen über die verfügbaren Strukturen und Parameter zu finden und im State sind Simulationsdaten der realisierten Siedlungen gespeichert. Dabei wird der State als ein JavaScript Object Notation (JSON)-Objekt verwaltet. Der BIFROST-Kern erzeugt keine Simulationsdaten, sondern bietet eine einheitliche Representational State Transfer (REST)-Application Programming Interface (API)-Schnittstelle für externe Module an. Diese Module sind Softwarekomponenten, die jegliche Art von Verhalten einführen können, das für den aktuellen Simulationsablauf erforderlich ist. Dazu zählen beispielsweise ein Lastflussrechner, ein Wettergenerator oder ein Gebäudemodell, das Lastprofile für Häuser zur Verfügung stellt [25].



Abbildung 3.3: Simulation einer Siedlung im BIFROST-Frontend

Beim Starten der zeitdiskreten Simulation werden während der Initialisierungsphase alle eingebundenen Module aufgefordert, sich zu initialisieren. Sobald alle Module initialisiert sind, beginnt die Update-Phase. In einer festgelegten Reihenfolge werden nun die Module nacheinander aufgerufen, um die neuen Werte für den aktuellen Simulationsschritt zu berechnen. Der BIFROST-Kern stellt dafür den aktuellen Zustand und den Simulationszeitstempel dem Modul zur Verfügung. Hat das Modul die Berechnung für diesen Zeitschritt abgeschlossen, werden die Änderungen im State übernommen. Das nächste Modul kann nun auf den aktualisierten Zustand zugreifen und wiederum seine geänderten Simulationsdaten dem BIFROST-Kern übergeben. Die aktualisierten Daten werden nun im Frontend dargestellt und ein neuer Simulationsschritt beginnt. Das Aufrufen der Module wiederholt sich für alle Simulationsschritte, bis das Ende des Betrachtungszeitraums erreicht ist. Dabei kann jedes Modul dem BIFROST-Kern mitteilen, in welchem simulierten Zeitintervall es aufgerufen wird.

3.3 Elektrofahrzeug-Simulationsmodell

Für diese Diplomarbeit wurde ein Modul in JavaScript entwickelt, das die Elektrofahrzeug-Ladestation im Frontend bespielt. Dieses E-Car-Charging-Management-Modul berechnet dabei die Simulationsdaten der Ladestation wie die Ladeleistung und Ladezustand der angeschlossenen Fahrzeuge. Zudem werden auch die Ladekosten der einzelnen Fahrzeuge, die Ladezeit und die benötigte Energie berechnet. Wichtige Parameter zur Konfiguration des Moduls, wie Anschlussleistung der Ladestation, Mobilitätsverhalten oder die Anzahl der Ladepunkte können über das Frontend oder eine Konfigurationsdatei eingestellt werden. Im E-Car-Charging-Management-Modul ist das mathematische Modell des Ladeverfahrens der Fahrzeugbatterie, die Zuweisung der Fahrzeuge zu den Ladepunkten und die gesamte Logik der Lademanagement-Konzepte implementiert. In kommenden Abschnitt 3.3.1 wird näher auf das Ladeverfahren und in 3.3.2 auf die Fahrzeug-Zuweisung eingegangen. Die Implementierung der Lademanagement-Konzepte wird in 3.4 ausführlich beschrieben.

3.3.1 Ladeverfahren

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ist das IUa-Laden das übliche Ladeverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. Für die Implementierung dieses Ladeverfahrens wurde ein vereinfachtes Modell verwendet, das auf den Ausführungen in der Dissertation *Auswirkungen und Potentiale der Integration von Elektromobilität in das elektrische Energiesystem Österreichs* von Dominik Fasthuber [28] basiert. Dabei wurden im Verlauf der Arbeit Anpassungen vorgenommen, die in diesem Abschnitt beschrieben werden.

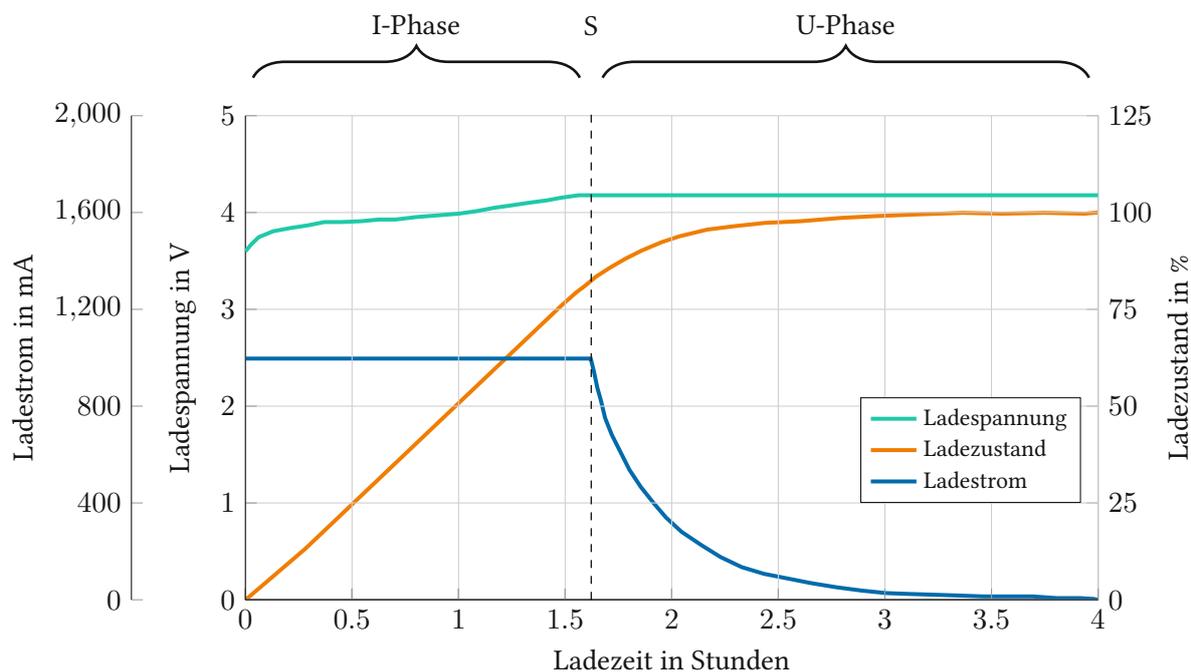


Abbildung 3.4: Aufladeverhalten einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Zelle [29]

In Elektrofahrzeug-Batterien werden Lithium-Ionen-Zellen normalerweise in sogenannten Batteriemodulen oder Batteriepaketen verschaltet. Diese Pakete bestehen aus einer Gruppe einzelner Zellen, die durch Serienschaltung und Parallelschaltung miteinander verbunden sind, um eine höhere Spannung und Kapazität zu erreichen. Abbildung 3.4 zeigt die Ladespannung, den Ladestrom und Ladezustand einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Zelle bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C. Dabei können die I-Phase, mit konstantem Ladestrom, und die U-Phase, mit konstanter Ladespannung, gut erkannt werden. Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine US18650GR Lithium-Ionen-Zelle mit einer maximalen Ladespannung von 4,2 V und einem maximalen Ladestrom von 1000 mA [29].

Da in der I-Phase der Ladestrom konstant ist und sich die Zellspannung nur minimal erhöht, kann die Ladeleistung in dieser Phase konstant angenähert werden [28]. Die I-Phase wird beendet, wenn der Ladeumschaltpunkt S erreicht ist. Dieser Umschaltpunkt wird in % des Ladezustands *State of Charge* (SoC) angegeben. Ein typischer Wert für diesen Umschaltpunkt ist 80 % [30]. In der anschließenden U-Phase wird die Batterie mit einer konstanten Spannung, der Ladeschlussspannung U_{LS} , geladen. Dabei nimmt der Strom exponentiell ab. Erreicht der Ladestrom den Ladeabschaltstromwert I_{LS} , ist das Ende dieser Phase erreicht und der Ladevorgang beendet.

Durch diese Annahmen kann eine Näherung des Ladevorgangs einer Lithium-Ionen Fahrzeugbatterie definiert werden. Dabei entspricht die aktuelle Ladeleistung $P_{\text{act}}(t)$ der maximalen Ladeleistung des Fahrzeugs P_{max} in der I-Phase. In der U-Phase hingegen nimmt die Ladeleistung exponentiell ab. Die aktuelle Ladeleistung $P_{\text{act}}(t)$ ist somit abhängig vom Ladezustand der Batterie $SoC(t)$, wie aus Gleichung (3.1) ersichtlich.

$$P_{\text{act}}(t) = \begin{cases} P_{\text{max}} & \text{für } SoC(t) < S \\ P_{\text{max}} \cdot \exp\left(\frac{S - SoC(t)}{k_L}\right) & \text{für } SoC(t) \geq S \end{cases} \quad (3.1)$$

Der Ladekorrekturfaktor k_L ist dimensionslos und wird so definiert, dass das Erreichen des Ladeabschaltstroms mit dem Vollladezustand des Akkus zusammenfällt. Daher berechnet sich dieser aus:

$$k_L = \frac{100 - S}{\ln\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_{LS}}\right)} \quad (3.2)$$

mit der Ladeabschaltleistung P_{LS} :

$$P_{LS} = \frac{U_{LS}}{U_N} \cdot I_{LS} \cdot E_{\text{max}} \quad (3.3)$$

Die Ladeschlussspannung U_{LS} beträgt bei Lithium-Ionen-Zellen 4,2 V, die Nennspannung U_N liegt hingegen bei 3,6 V. Der Ladeabschaltstrom I_{LS} wird in C-Raten angegeben, dabei ist ein typischer Wert 0,03 1/h. C-Raten werden definiert als das Verhältnis des maximalen Stroms zur Kapazität der Batterie. E_{max} gibt die maximal nutzbare Energiemenge der Batterie in kWh an. Durch eine rekursive Berechnung kann nun der Ladezustand für jeden beliebigen Zeitpunkt t berechnet werden:

$$SoC(t) = SoC(t-1) + \frac{P_{\text{act}}(t) \cdot \Delta t}{E_{\text{max}}} \cdot \eta \quad (3.4)$$

Der Zeitschritt wird in der Formel als Δt angegeben, das im BIFORST-Modul dem simulierten Zeitintervall entspricht. Zudem berücksichtigt diese Berechnung auch den Wirkungsgrad η der Ladung.

Abbildung 3.5 zeigt beispielhafte Ladevorgänge mit unterschiedlichen Ladeleistungen, die mit dem vorher definierten Modell simuliert wurden. Dabei wurden die Batterien mit einer Kapazität von 50 kWh, einem Ladewirkungsgrad von 90 % und Anschaltstrom von 0,03 C-Raten geladen.

In der Dissertation von Dominik Fasthuber [28] ist der Umschaltzeitpunkt und der Ladeabschaltstrom anhand numerischer Faktoren an bestimmte Fahrzeugmodelle angepasst. So wurden Faktoren für den

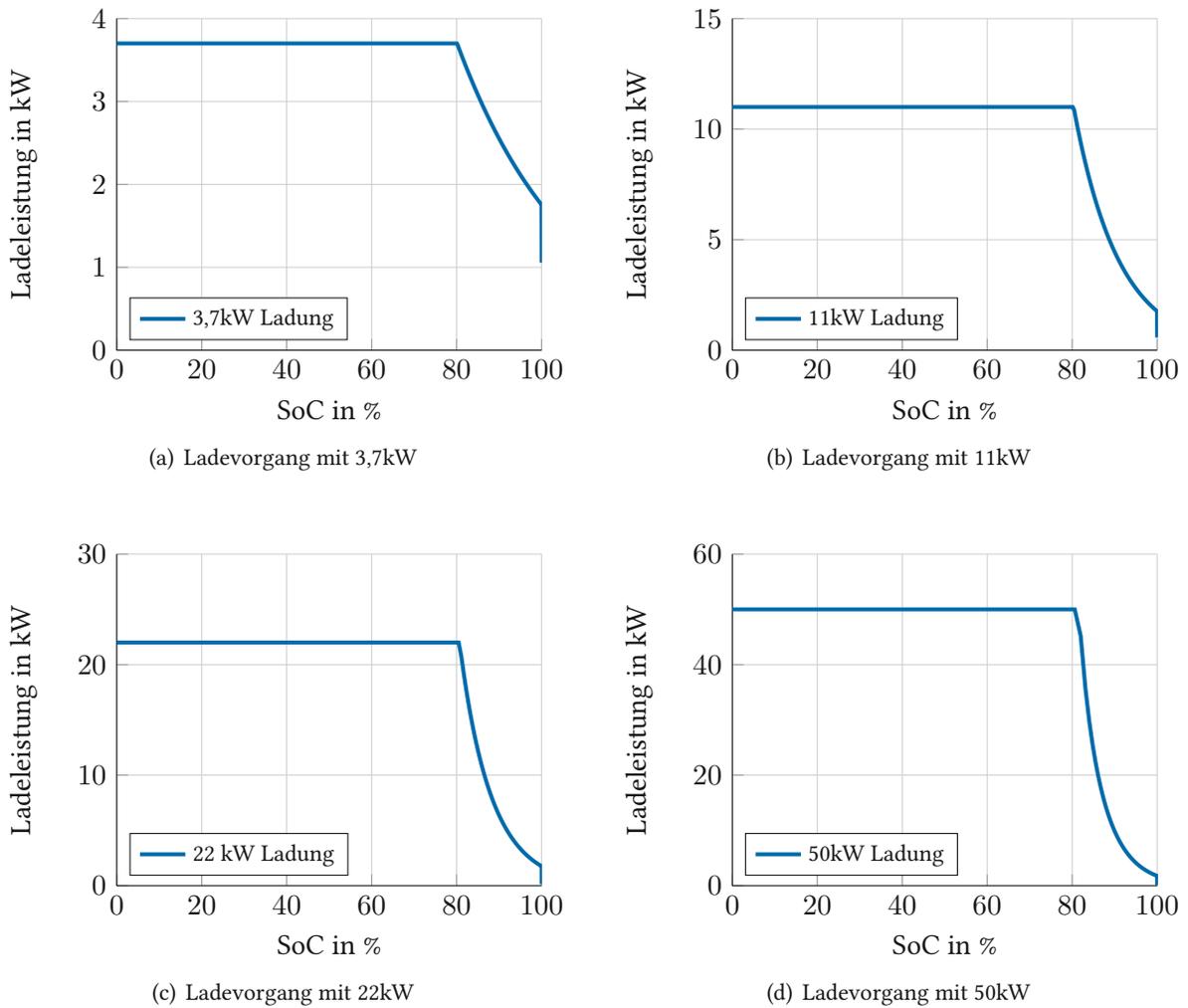


Abbildung 3.5: Vergleich verschiedener Ladevorgänge mit unterschiedlichen Ladeleistungen

Renault ZOE und dem BMW i3 bei einer maximalen Ladeleistung von 22 kW auf Basis von Messungen definiert, um deren Ladeverhalten genauer modellieren zu können. Da in der vorliegenden Arbeit aber auch Fahrzeugtypen mit höherer Leistung betrachtet werden, wurden fixe Werte für Umschaltzeitpunkt und Ladeabschaltstrom gewählt. Für den Umschaltzeitpunkt S wird 80 % des Ladezustandes und für den Ladeabschaltstrom 0,03 C-Raten verwendet, was wie vorher beschrieben typische Werte sind.

3.3.2 Fahrzeug-Zuweisung

Damit Elektrofahrzeuge an den Stationen mit dem UIa-Ladeverfahren laden können, müssen sie den Ladepunkten zugewiesen werden. Verfügen die Ladestationen über mehrere Ladepunkte, können mehrere Fahrzeuge gleichzeitig laden. Die Anzahl der Ladepunkte kann in der Modul-Konfiguration vor der Simulation eingestellt werden.

Das entwickelte BIFROST-Modul bietet zwei Möglichkeiten zur Zuweisung. Einerseits gibt es die Möglichkeit vordefinierte Fahrzeug-Zuweisungen den Stationen zu übergeben. Andererseits kann das Mobilitätsverhalten verwendet werden, um Fahrzeuge zufällig zu bestimmten Zeiten Ladepunkten zuzuweisen.

Direkte Zuweisung

Durch die Option einer vordefinierten Zuweisung von Fahrzeugen ist es möglich, das Verhalten von verschiedenen Konzepten bei exakt gleich ankommenden Fahrzeugen mit den gleichen Parametern zu untersuchen. Dafür wird für jede Station eine JSON-Datei von Fahrzeugen mit Parametern wie Kapazität, maximaler Ladeleistung, dem Start-Ladezustand und dem Start-Ladezeitpunkt verwendet. Ein Beispiel dafür ist in 3.1 zu finden. Diese Liste an Fahrzeugen wird bei der Modul-Initialisierung nach den Start-Ladezeitpunkten der Fahrzeuge sortiert. So kann in der Update-Phase der Simulation in jedem Zeitschritt einfach überprüft werden, ob ein Fahrzeug zugewiesen werden muss. Entspricht die Simulationszeit dem Startzeitpunkt, wird das Fahrzeug dem nächsten freien Ladepunkt zugewiesen. Ist kein Ladepunkt mehr frei, muss das Fahrzeug so lange warten, bis einer frei wird. Ist entweder der gewünschte Ladezustand *soc_end* erreicht oder die maximale Verweildauer des Fahrzeugs *charging_time_minutes_end* abgelaufen, verlässt das Fahrzeug den Ladepunkt.

```
1 {
2   "ecars_assignment": [
3     {
4       "name": "Skoda Enyaq iV80",
5       "charging_power_max": 135,
6       "battery_capacity": 82,
7       "csv_efficiency_curve_name": null,
8       "connection_type": "CSS",
9       "soc_start": 0.24,
10      "soc_end": 1,
11      "charging_time_minutes_start": 0,
12      "charging_time_minutes_end": 1440
13    }
14  ]
15 }
```

Quelltextauszug 3.1: Ein Beispiel für eine JSON-Zuweisungsdatei eines Elektrofahrzeugs

Zufällige Zuweisung

Bei der zufälligen Zuteilung werden Fahrzeuge in Abhängigkeit des Mobilitätsverhaltens zugeteilt. Das Mobilitätsverhalten wird in dieser Arbeit, wie später im Abschnitt 4.1.1 beschrieben, anhand von Standardlastprofilen integriert. Diese Wochen-Profile bilden unterschiedliches Verhalten an unterschiedlichen Orten ab und sind auf kW/Fahrzeug normiert. So zeigen beispielsweise Ladestationen in der Nähe von Arbeitsplätzen an Werktagen eine deutlich höhere Auslastung als am Wochenende.

Jeder Station in der Simulation wird ein bestimmtes Standardlastprofil zugewiesen, das als Gewichtung verwendet wird. In der Initialisierungsphase werden zufällig mit dem gegebenen Profil eine bestimmte Anzahl an Start-Ladezeitpunkten definiert. Sind alle Zeitpunkte gefunden, wird in der Update-Phase in jedem Simulationsschritt überprüft, ob ein Fahrzeug zugewiesen werden soll. Ist dies der Fall, wird ein Fahrzeug dem nächsten freien Ladepunkt zugewiesen.

Die Parameter des zugewiesenen Fahrzeugs, wie die Kapazität der Batterie oder die maximale Ladeleistung, werden aus dem zufällig ausgesuchten Fahrzeug-Modell übernommen. Die Fahrzeug-Modelle werden im Abschnitt 4.1.2 genauer beschrieben. Das Fahrzeug erhält zusätzlich eine maximale Verweildauer, die zufällig zwischen einer minimalen und maximalen Dauer generiert wird. Diese minimalen und maximalen Werte sind ebenfalls über die Konfiguration einstellbar.

Die Anzahl der zugewiesenen Fahrzeuge pro Tag und Ladepunkt kann über die Station-Konfiguration *num_ecars_per_day_and_point* eingestellt werden. An Schnellladestationen in Deutschland laden durchschnittlich 2,4 Elektrofahrzeuge am Tag an einem Ladepunkt. Die Ladepunkte sind durchschnittlich etwa 102,6 Minuten am Tag belegt und geben etwa 39,6 kWh am Tag ab. An AC-Ladepunkten bis 22 kW werden durchschnittlich von 1,3 Fahrzeuge pro Tag angefahren. Dabei ist die durchschnittliche Ladezeit von 271,7 Minuten deutlich höher als wie bei DC-Ladepunkten [31].

Die Abbildung 3.6 veranschaulicht die Verteilung der zufällig generierten Startladezeiten von 700 Fahrzeugen. Das dazu verwendete Standardlastprofil einer Ladestation in der Nähe von Arbeitsplätzen ist ebenfalls dargestellt.

Die verwendete JavaScript `Math.random()` Funktion zur Generierung von gleichmäßig verteilten Zufallszahlen ist ein Pseudozufallszahlen-Generator. Das bedeutet, dass er eine Folge von Zahlen generiert, die scheinbar zufällig sind, aber tatsächlich auf einer deterministischen Berechnung basieren. Wird der

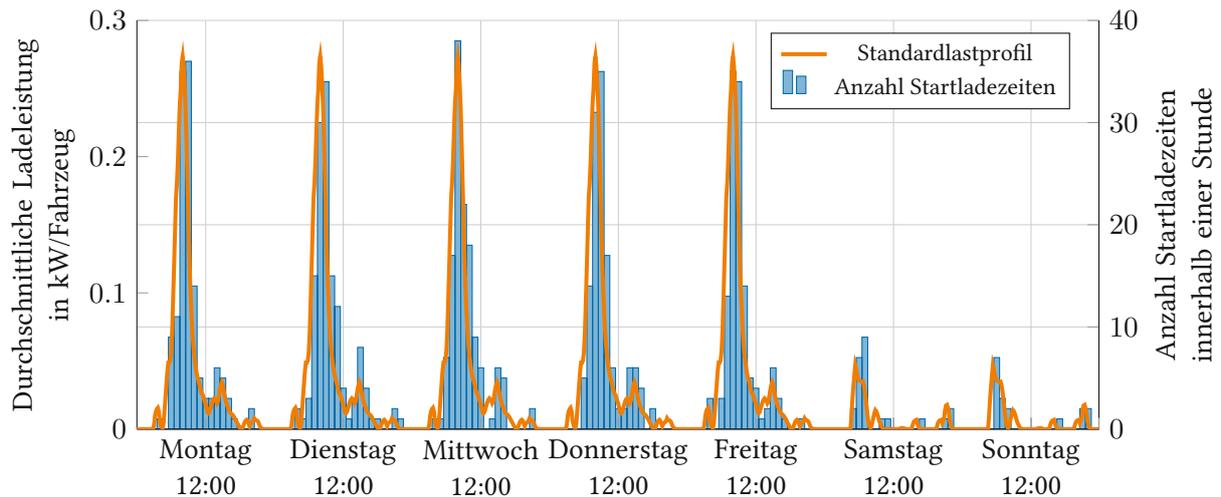


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der zufällig generierten Startladezeiten für Fahrzeuge einer Ladestation in der Nähe von Arbeitsplätzen in der Innenstadt einer Großstadt

Generator mit demselben Startwert initialisiert, erzeugt er immer dieselbe Folge von Zufallszahlen. In JavaScript wird dieser Startwert automatisch beim Laden des Skripts gesetzt, sodass die Zufallszahlen bei jedem Aufruf von `Math.random()` anders aussehen [32]. Echte Zufallszahlengeneratoren True Random Number Generators (TRNG) hingegen basieren auf physikalische Prozesse, die als Quellen des Zufalls dienen. So sind die Zufallszahlen eines Rauschgenerators nicht vorhersagbar und daher für sicherheitskritische Anwendungen geeignet [33]. Der Hauptvorteil von Pseudozufallszahlengeneratoren ist ihre Geschwindigkeit und Einfachheit. Für diese Arbeit liefert die `Math.random()` Funktion ausreichend zufällige Ergebnisse, da keine sicherheitskritischen Aspekte simuliert werden.

3.4 Lademanagement-Konzepte

In diesem Abschnitt werden die ausgewählten Lademanagement-Konzepte aus der Forschung beschrieben und der jeweilige Algorithmus zur Aufteilung der Stationsleistung definiert. Zudem gibt es zum besseren Verständnis für jedes Konzept ein Ablaufdiagramm. Nach der Vorstellung dieser Konzepte werden alle vier Implementierungen anhand eines Szenarios einander gegenübergestellt.

Um die vorliegende Arbeit abzugrenzen und einen einfacheren Vergleich zu ermöglichen, werden Konzepte untersucht, die keine Eingaben von Fahrzeugnutzern erfordern. Es ist festzustellen, dass aktuell auch die Konzepte ohne Nutzereingaben am häufigsten implementiert werden. Das Simulationsmodell wurde jedoch so entwickelt, dass zukünftig weitere Konzepte, einschließlich solcher mit Nutzereingaben

ben, implementiert werden können. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass sowohl die Fahrzeuge als auch die Ladestationen eine beliebige Reduzierung der Ladeleistung unterstützen.

3.4.1 Sequenzielles Lademanagement-Konzept

Beim sequenziellen Ladekonzept werden die Fahrzeuge in genau der Reihenfolge geladen, in der sie an die Ladestation angeschlossen wurden. Die Aufladung erfolgt nach dem Prinzip First-Come-First-Serve. Das bedeutet, dass die ersten ankommenden Fahrzeuge mit maximaler Ladeleistung laden können. Reicht die verfügbare Leistung der Ladestation nicht aus, um alle angeschlossenen Fahrzeuge zu laden, müssen die später an der Ladestation angeschlossenen Fahrzeuge warten, bis die ersten Fahrzeuge vollständig geladen sind [34].

Die maximal verfügbare Ladestationsleistung P_S teilt sich somit, wie in (3.5) definiert, auf die einzelnen Fahrzeuge P_{EV_x} auf. Dabei ist P_{act, EV_x} die aktuelle Ladeleistung des Fahrzeugs x , mit der es maximal laden kann. Diese wird wie in Gleichung (3.1) in Abhängigkeit der maximalen Ladeleistung und dem Ladezustand des Fahrzeugs berechnet.

$$P_{EV_x} = \begin{cases} P_{act, EV_x} & \text{für alle } x \in \mathbb{N} \text{ falls } \sum_{i=1}^x P_{act, EV_i} \leq P_S \\ P_S - \sum_{i=1}^{x-1} P_{act, EV_i} & \text{für alle } x \in \mathbb{N} \text{ falls } \sum_{i=1}^{x-1} P_{act, EV_i} < P_S \wedge \sum_{i=1}^x P_{act, EV_i} > P_S \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.5)$$

Solange die Ladestationsleistung P_S ausreicht, werden die ankommenden Fahrzeuge mit ihrer jeweiligen maximalen Ladeleistung P_{act, EV_x} geladen. Das Fahrzeug, das als nächstes ankommt, erhält eventuell noch den Rest der verfügbaren Leistung. Alle weiteren Fahrzeuge müssen warten und werden nicht geladen.

Da Elektrofahrzeuge vor allem bei kleinen maximalen Ladeleistungen lange Ladezeiten haben, können sehr lange Wartezeiten für später ankommende Fahrzeuge entstehen. Das ist vor allem für öffentliche Ladestationen mit geringer Anschlussleistung problematisch, da dort die Fahrzeugnutzer für gewöhnlich nur eine begrenzte Aufenthaltsdauer haben. Dieser Nachteil ist bei Ladungen am Wohnort nicht kritisch, sofern das Fahrzeug erst am nächsten Morgen benötigt wird. Ein Vorteil dieses Konzeptes ist die unkomplizierte Integration, da nur die Information über den Anschlusszeitpunkt bekannt sein muss.

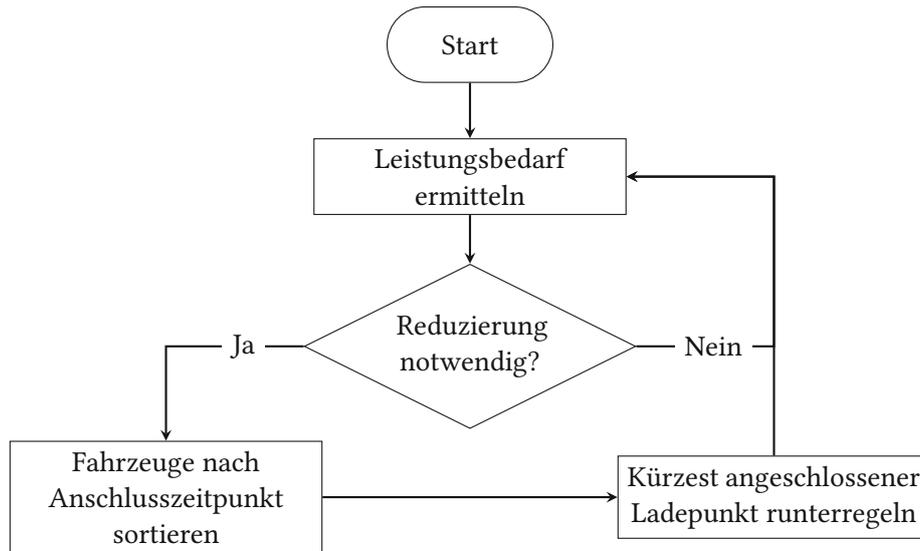


Abbildung 3.7: Ablaufdiagramm des Sequenziellen Lademanagement-Konzeptes

Zudem können Fahrzeugnutzer dieses Konzept leicht verstehen und nachvollziehen [19]. Ein Ablaufdiagramm ist in Abbildung 3.7 zu finden.

3.4.2 Gleichmäßig Verteiltes Lademanagement-Konzept

Bei dem Konzept des gleichmäßig verteilten Ladens wird die verfügbare Leistung gleichmäßig auf alle angeschlossenen Fahrzeuge aufgeteilt. Dies ist jedoch nur notwendig, wenn die verfügbare Leistung der Station nicht für die maximale Ladeleistung aller angeschlossenen Fahrzeuge ausreicht [35]. Gleichverteilung bedeutet, dass alle Ladepunkte einer Ladestation ihre Leistung um einen gleichen Prozentsatz verringern. Dieser hängt vom Verhältnis der verfügbaren Leistung der Ladestation P_S und der Leistungssumme aller n Ladevorgänge ab.

$$P_{EV_x} = \begin{cases} P_{\text{act},EV_x} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{\text{act},EV_i} \leq P_S \\ P_{\text{act},EV_x} \cdot \frac{P_S}{\sum_{i=1}^n P_{\text{act},EV_i}} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{\text{act},EV_i} > P_S \end{cases} \quad (3.6)$$

Im Gegensatz zum sequenziellen Laden entfällt für die Fahrzeuge hier die Wartezeit bis zum Ladestart, sofern ein Ladepunkt verfügbar ist. Daher können kurze Strecken schon nach relativ kurzer Zeit wieder zurückgelegt werden. Da es sich um eine prozentuale Absenkung handelt, erhalten Fahrzeuge mit höheren maximaler Ladeleistung mehr Leistung und sind demnach bevorzugt. Damit kann die Voll-

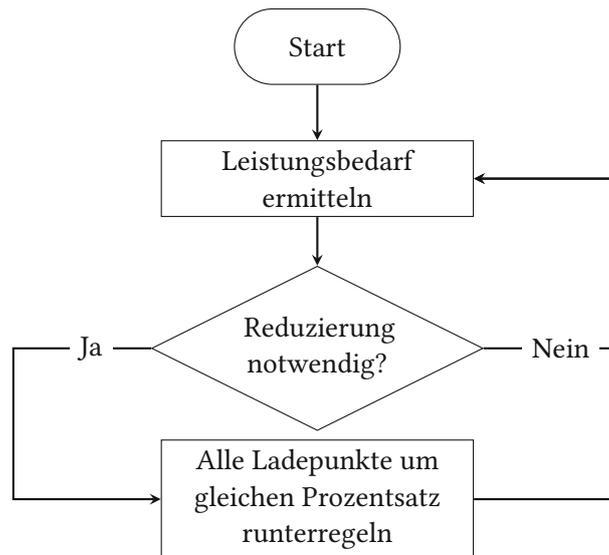


Abbildung 3.8: Ablaufdiagramm des Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzeptes

dung eines Elektrofahrzeugs mit einer geringen Ladeleistung extrem lange dauern, was ein sehr großer Nachteil dieses Konzeptes ist. Die Gleichung dieses Konzeptes ist in (3.6) und das Ablaufdiagramm in 3.8 dargestellt.

3.4.3 Gleichmäßig Verteiltes Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung

Dieses Konzept vermeidet langen Ladezeiten bei Fahrzeugen mit geringer maximaler Ladeleistung. Reicht die Leistung einer Station nicht für die maximale Ladeleistung aller angeschlossenen Fahrzeuge aus, wird zunächst nur die Leistung der Ladepunkte mit einer höheren Ladeleistung reduziert. Die Ladeleistung von Fahrzeugen, die unter einer gewissen Grenzleistung P_M laden, werden zunächst nicht verringert. Sind dann aber weitere Reduzierungen erforderlich, wird die Leistung aller Ladepunkte noch weiter gesenkt.

Wenn die Ladeleistung aller Ladepunkte reduziert werden muss, wird in der Dissertation von Roman Uhlig [19] die Ladestationsleistung gleichmäßig auf alle angeschlossenen Fahrzeuge aufgeteilt. Somit erhält jedes Fahrzeug die gleiche Leistung. Es ist dadurch möglich, dass Elektrofahrzeuge mit geringerer Ladeleistung die zugewiesene Leistung nicht vollständig benötigen. Somit bleibt ungenutzte Stationsleistung übrig, welche andere Fahrzeuge verwenden könnten. Um dies zu vermeiden, wird in meiner Arbeit die Ladeleistung prozentual auf alle Fahrzeuge aufgeteilt, wie in Gleichung (3.7) formuliert. Die prozentuale Verteilung hängt auch hier vom Verhältnis der verfügbaren Stationsleistung und der Leistungssumme aller n Ladevorgänge ab.

$$P_{EV_x} = \begin{cases} P_{act, EV_x} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{act, EV_i} \leq P_S \vee (P_{act, EV_x} \leq P_M \wedge \sum_{i=1}^n P_{act, M_i} \leq P_S) \\ P_{case_x} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{act, EV_i} > P_S \wedge \sum_{i=1}^n P_{act, M_i} \leq P_S \wedge P_{act, EV_x} > P_M \\ P_S \cdot \frac{P_{act, EV_x}}{\sum_{i=1}^n P_{act, EV_i}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$P_{case_x} = \left(P_S - \sum_{i=1}^n P_{act, EV_i} + \sum_{i=1}^n P_{above, M_i} \right) \cdot \frac{P_{act, EV_x}}{\sum_{i=1}^n P_{above, M_i}}$$

mit

$$P_{above, M_i} = \begin{cases} P_{act, EV_i} & \text{falls } P_{act, EV_i} > P_M \\ 0 & \text{falls } P_{act, EV_i} \leq P_M \end{cases}$$

und

$$P_{act, M_i} = \begin{cases} P_M & \text{falls } P_{act, EV_i} > P_M \\ P_{act, EV_i} & \text{falls } P_{act, EV_i} \leq P_M \end{cases}$$

Das Ablaufdiagramm des Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzepts mit Grenzleistung ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

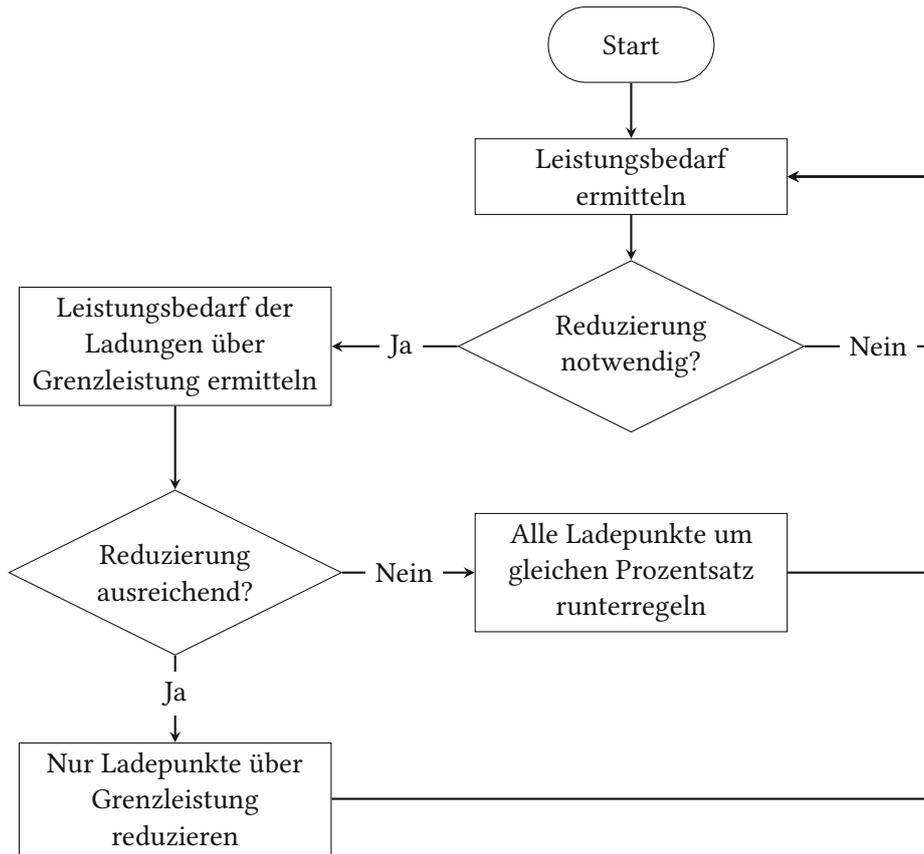


Abbildung 3.9: Ablaufdiagramm des Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzepts mit Grenzleistung

3.4.4 Ladezustands abhängiges Lademanagement-Konzept

Dieses Lademanagement-Konzept steuert die Ladeleistung der Fahrzeuge in Abhängigkeit vom SoC der Fahrzeugbatterie [36]. Dabei wird in der vorliegenden Arbeit der noch fehlende Ladezustand zur Vollladung des Fahrzeugs $(1 - SoC_{EV})$ für die Berechnung der Verteilung der Leistung verwendet. Zur Berücksichtigung möglicher unterschiedlicher maximalen Ladeleistungen wird die maximale Ladeleistung der Fahrzeuge $P_{act, EV}$ als Gewichtung verwendet.

$$P_{EV_x} = \begin{cases} P_{act, EV_x} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{act, EV_i} \leq P_S \\ P_S \cdot \frac{(1 - SoC_{EV_x}) \cdot P_{act, EV_x}}{\sum_{i=1}^n (1 - SoC_{EV_i}) \cdot P_{act, EV_i}} & \text{falls } \sum_{i=1}^n P_{act, EV_i} > P_S \end{cases} \quad (3.8)$$

Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass alle Fahrzeuge dieser Station hinsichtlich des Ladezustandes fair behandelt werden und in etwa zur selben Zeit den Vollladezustand erreichen. Ein Nachteil besteht darin, dass Fahrzeuge mit geringerer Akku Kapazität im Verhältnis zu Fahrzeugen mit große-

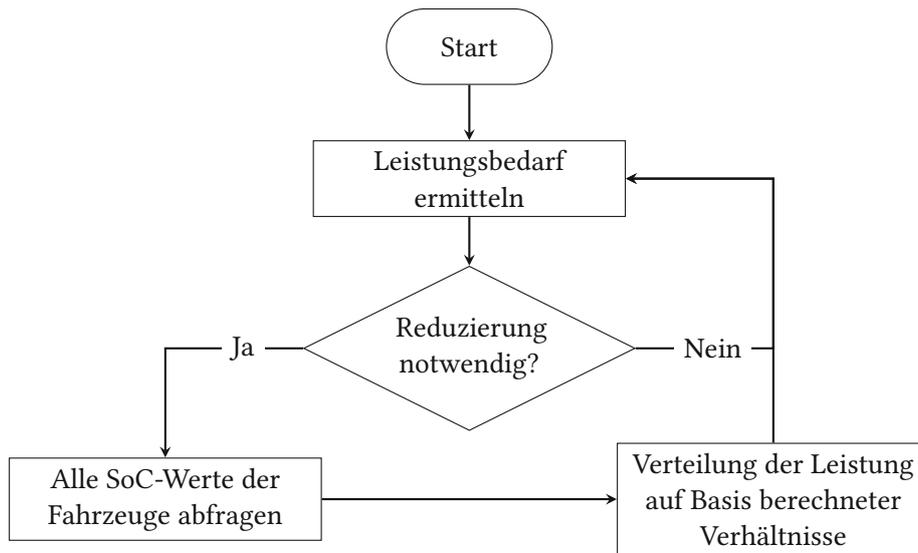


Abbildung 3.10: Ablaufdiagramm des Ladezustands abhängigen Lademanagement-Konzepts

rer Kapazität weniger Ladeleistung erhalten. Dadurch ist deren geladene Energie in der gleichen Zeit deutlich geringer. Zudem müssen die Ladestation und das Fahrzeug in der Lage sein, den aktuellen Ladezustand zu übermitteln. Die mathematische Formulierung des Konzepts ist in Gleichung (3.8) und das Ablaufdiagramm in Abbildung 3.10 zu finden.

3.4.5 Gegenüberstellung der Lademanagement-Konzepte

Nun werden die Lademanagement-Konzepte anhand eines ausgesuchten Szenarios exemplarisch gegenübergestellt. Dafür wurde eine BIFROST-Siedlung mit fünf Ladestationen und jeweils vier Ladepunkten gebaut. Die erste Station dient als Referenz, wenn die Leistung der Station nicht begrenzt wird. Jeder anderen Ladestation ist ein Konzept zugewiesen, das zur Aufteilung der Stationsleistung verwendet wird. Die Leistung dieser Stationen ist auf 35 kW beschränkt. Die Grenzleistung P_M des Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzeptes ist mit 4 kW angegeben.

Jeder Station werden die selben vier Elektrofahrzeuge zugewiesen. Dabei wurden die Kapazitäten, maximale Ladeleistungen und Anschlusszeitpunkte so ausgewählt, dass die Unterschiede der Konzepte gut zu sehen sind. Die Kenngrößen sind aus Tabelle 3.1 ersichtlich. Für jede Station werden jeweils die Ladezustände der einzelnen Fahrzeuge in Prozent und die gestapelte Ladeleistungen in kW dargestellt.

Beim ungesteuerten Laden in Abbildung 3.11 ist deutlich eine Lastspitze zu erkennen, die durch das gleichzeitige Laden und die unbegrenzte Stationsleistung entsteht. Da jeder PKW über die gesamte Ladezeit mit maximaler Leistung laden kann, sind auch alle Batterien nach wenigen Stunden vollgeladen.

Tabelle 3.1: Parameter der Fahrzeuge für die Gegenüberstellung der Lademanagement-Konzepte

Kenngroße	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4	Einheit
Maximale Ladeleistung	50	22	11	3,7	kW
Kapazität	70	50	30	7.1	kWh
Start Ladezustand	0	0	0	0	%
Ankunftszeit	0	10	20	30	Minute

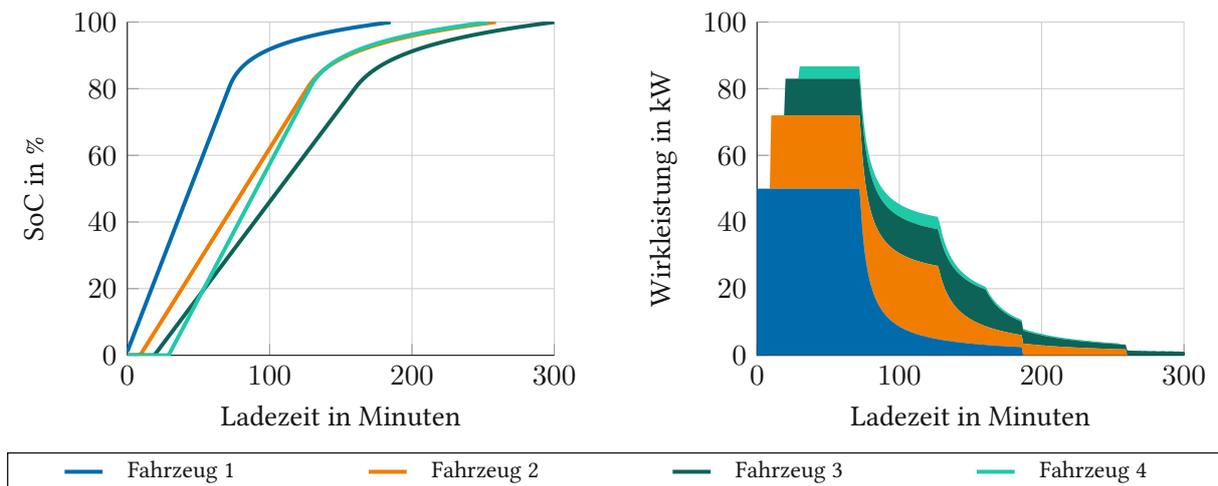


Abbildung 3.11: Ladezustand und Wirkleistung beim unkontrollierten Laden

An allen anderen Ladestationen wird die Leistung begrenzt und mithilfe der beschriebenen Konzepte aufgeteilt. Beim sequenziellen Laden, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, wird zu Beginn nur das erste Fahrzeug geladen, während das zweite erst dann Leistung erhält, wenn wieder ausreichend Leistung zur Verfügung steht. Da das erste ankommende Fahrzeug in diesem Beispiel eine hohe Batterie-Kapazität und große maximale Ladeleistung hat, müssen alle anderen Fahrzeuge relativ lang auf den Ladestart warten.

Die Diagramme von Abbildung 3.13 zeigen den Ladezustand und die Wirkleistung des Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzepts. Es ist zu erkennen, dass die Stationsleistung bezüglich der maximalen Ladeleistung der Fahrzeuge aufgeteilt wird. So erhält das Fahrzeug 4 die geringste Leistung, da es auch die kleinste maximale Ladeleistung hat. In den ersten Minuten des Wirkleistungs-Diagramms ist an den Leistungsstufen gut zu erkennen, dass bei jeder neuen Ankunft eines Fahrzeugs die Leistung prozentual aufgeteilt wird.

Im Gegensatz dazu bevorzugt das Konzept des Gleichmäßig Verteilten Ladens mit Grenzleistung die Fahrzeuge mit einer Ladeleistung die geringer als die Grenzleistung ist. Diese Verhalten ist in Abbil-

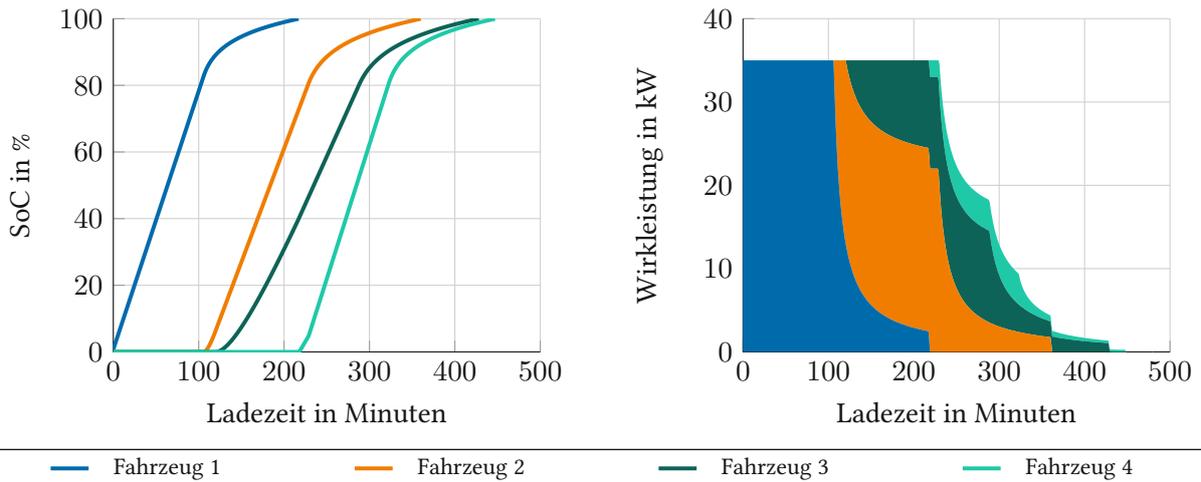


Abbildung 3.12: Ladezustand und Wirkleistung beim Sequenziellen Lademanagement-Konzept

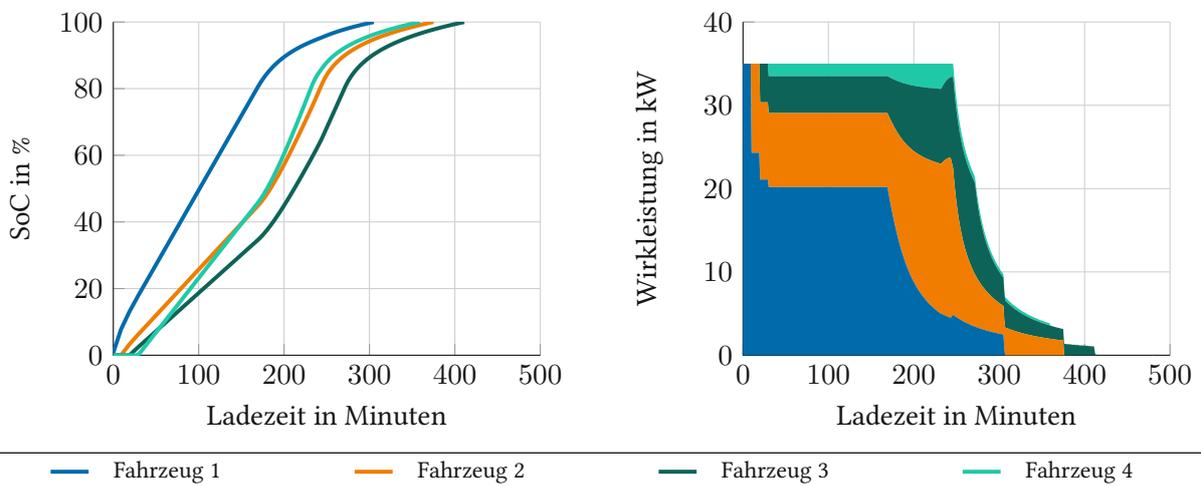


Abbildung 3.13: Ladezustand und Wirkleistung beim Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept

dung 3.14 dargestellt. Im gewählten Beispiel ist die Grenzleistung auf 4 kW fixiert und somit wird nur das Fahrzeug 4 bevorzugt. Dadurch kann dieses Fahrzeug ab dem Zeitpunkt seiner Anschlusszeit mit voller Leistung (3,7 kW) geladen werden und erreicht somit, auch aufgrund der kleinen Batterie-Kapazität, als erstes den Vollladezustand.

Abbildung 3.15 zeigt das Konzept des SoC-abhängigen Lademanagements, bei dem die Leistung so aufgeteilt wird, dass alle Fahrzeuge etwa zur selben Zeit vollgeladen sind. Dabei wird die Stationsleistung ähnlich zum Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept prozentual aufgeteilt. Wobei das Verhältnis hier vom fehlenden Ladezustand abhängig ist. Da aber auch die Gewichtung der maximalen Ladeleistung berücksichtigt wird, ist ein exakt zeitgleiches Vollladen der Fahrzeuge nur bei gleichen maximalen Ladeleistungen zu beobachten.

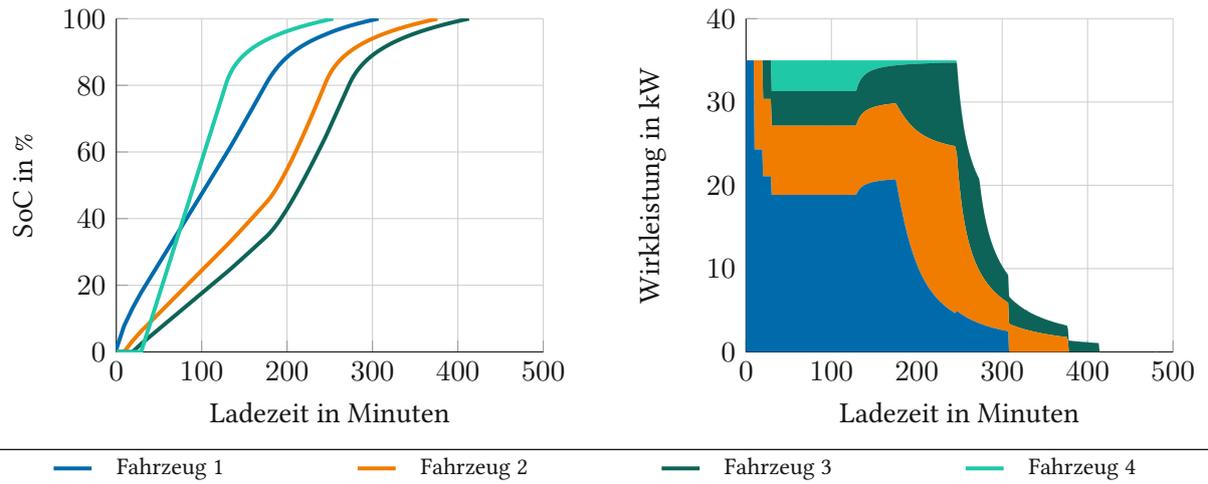


Abbildung 3.14: Ladenzustand und Wirkleistung beim Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung

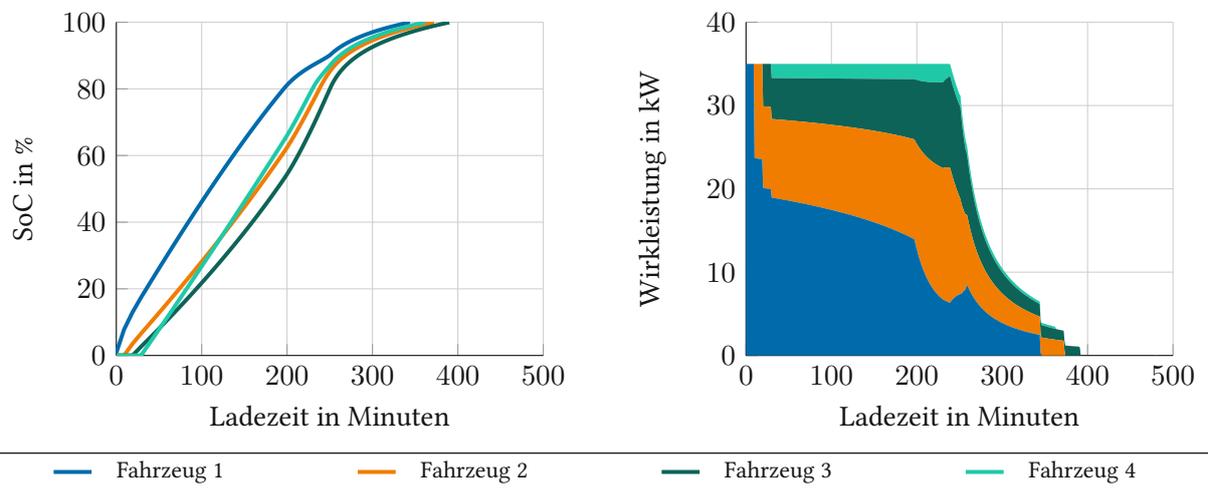


Abbildung 3.15: Ladenzustand und Wirkleistung beim Ladezustands Abhängigen Lademanagement-Konzept

Kapitel 4

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Teilfragen der Forschungsfrage nacheinander beantwortet. Zunächst werden die relevanten Eingangsparameter erarbeitet, die das Ladeverhalten in Bezug auf die Lademanagement-Konzepte beeinflussen. Anschließend werden die Indikatoren beschrieben, die zur Bewertung und Vergleichbarkeit der Konzepte herangezogen werden können und von Bedeutung sind. Abschließend werden die Auswirkungen der verschiedenen Lademanagement-Konzepte sowohl aus der Perspektive des Ladestation-Betreibers als auch aus Sicht des einzelnen Fahrzeugnutzers aufgezeigt.

4.1 Eingangsparameter

In diesem Abschnitt werden relevante Einflussfaktoren für die Forschungsfrage ermittelt und näher beschrieben. Dabei wird zu Beginn auf das Mobilitätsverhalten und die Fahrzeugmodelle eingegangen. Im Anschluss werden die unterschiedlichen Arten der Ladetarife erklärt und der Ladewirkungsgrad anhand von Beispielen eingeführt. Am Ende des Abschnitts wird die Ladestations-Leistung als Eingangsgröße besprochen und alle Eingangsparameter in einer übersichtliche Tabelle zusammengefasst.

4.1.1 Mobilitätsverhalten

Zur Berücksichtigung verschiedener Verhalten von Nutzern wird in dieser Diplomarbeit auf die Arbeit von Daniel Heinz [37] zurückgegriffen. In seiner Arbeit wurden Elektrofahrzeug-Standardlastprofile für verschiedene Gebietstypen entwickelt. Diese Standardlastprofile werden verwendet, um eine gewichtete Zuteilung der Fahrzeuge über den Simulationszeitraum zu erzielen.

Es gibt auch andere Publikationen, die sich mit der Generierung von stochastischen Ladeprofilen für Elektrofahrzeuge beschäftigen. In der Arbeit von Markus Litzlbauer [38] werden verschiedene Nutzergruppen wie Dienstfahrer, Berufspendler oder private Fahrten unterschieden, jedoch keine Unter-

scheidung zwischen verschiedenen Ladestation-Standorten vorgenommen. Die Arbeit *Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos anhand gemessener Daten elektrischer Ladestationen* [39] unterscheidet zwischen öffentlichen, betrieblichen und Ladestationen bei Einkaufszentren, legt aber keinen Fokus auf verschiedene Gebietstypen. Da die Arbeit von Daniel Heinz diese Aspekte berücksichtigt, wurde sie für diese Diplomarbeit herangezogen.

Grundsätzlich wird unterschieden, an welchen Orten die Fahrzeugnutzer ihre Fahrzeuge laden können. Zu den verschiedenen Orten der Ladestationen gehören:

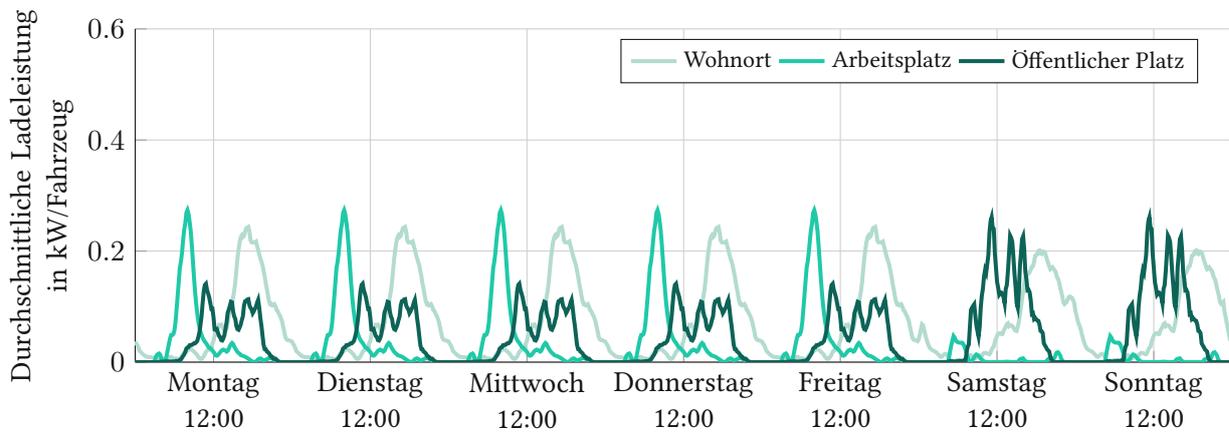
- **Privat:** Diese Ladepunkte können nur von einem begrenzten Personenkreis genutzt werden. Beispiel wäre hier eine Ladesäule mit mehreren Ladepunkten in einem Hof einer Wohnanlage.
- **Halb Öffentlich:** Diese Ladestationen werden auf dem eigenen Grundstück einer Firma betrieben. So kann zum Beispiel ein Arbeitgeber auf Firmenparkplätze Ladepunkte zur Verfügung stellen.
- **Öffentlich:** Die Ladestationen sind allgemein zugänglich.

Die Fahrzeugbesitzer haben also neben dem Laden am Wohnort auch zusätzliche Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz und an öffentlichen Ladesäulen. In der Arbeit von Daniel Heinz [37] erfolgt eine Unterscheidung der Standorte von Ladestationen hinsichtlich ihrer räumlichen Nähe zu unterschiedlichen Orten, nämlich dem Wohnort, dem Arbeitsplatz sowie öffentlichen Plätzen. Da sich das Nutzerverhalten dieser Standorte auch durch das betrachtete Gebiet verändert, wurden folgende Gebietstypen definiert:

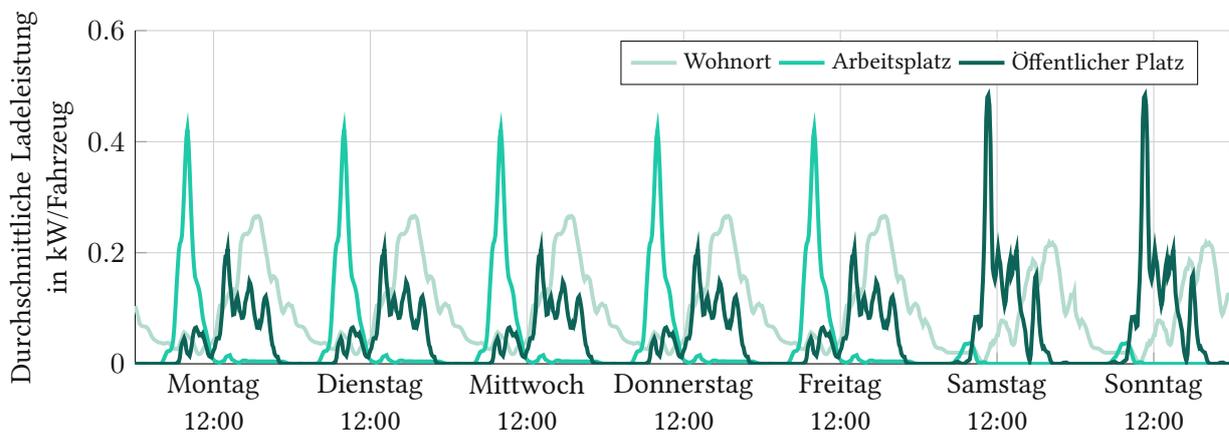
- Typ 1: Standorte im inneren Stadtbereich einer Großstadt
- Typ 2: Standorte am Stadtrand einer Großstadt
- Typ 3: Standorte im inneren Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt
- Typ 4: Standorte am Stadtrand einer mittelgroßen Stadt
- Typ 5: Standorte in einer Kleinstadt
- Typ 6: Standorte auf dem Land

Zudem unterscheidet sich das Mobilitätsverhalten an Werktagen und am Wochenende, da am Wochenende der Berufsverkehr größtenteils durch Freizeitfahrten abgelöst wird. Daher umfassen die Standardlastprofile jeweils einen Zeitraum von einer Woche.

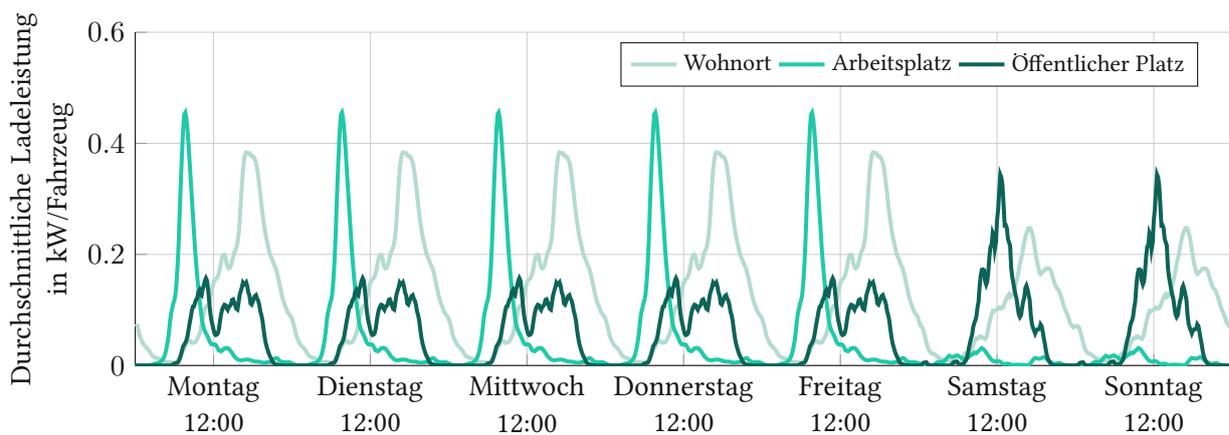
In den Abbildungen 4.1(a) und 4.1(b) sind die Wochen-Lastprofile der Gebietstypen Typ 1 und Typ 3 dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass im inneren Stadtbereich größerer Städte die Nutzung von Elektrofahrzeugen geringer ist, als in kleineren Städten. Der Grund dafür ist der besser ausgebaute öffentliche



(a) Standardlastprofil des Typs 1: Standorte im inneren Stadtbereich einer Großstadt



(b) Standardlastprofil des Typs 3: Standorte im inneren Stadtbereich einer mittelgroßen Stadt



(c) Standardlastprofil des Typs 6: Standorte auf dem Land

Abbildung 4.1: Standardlastprofile der Standorte Typ 1, Typ 3 und Typ 6

Nahverkehr. Wie aus Abbildung 4.1(c) ersichtlich, nimmt die Mobilität auf dem Land und in kleinen Gemeinden zu. Dabei steigt vor allem die Ladeleistung beim Laden am Wohnort. In allen Standardlastprofilen finden sich die Spitzem beim Laden am Arbeitsplatz am Vormittag, während das Laden am Wohnort die Lastspitzen am Nachmittag aufweist. Zudem steigt das Laden an öffentlichen Ladepunkten an den Wochenenden.

Die Standardlastprofile werden dem implementierten BIFROST-Modul als Comma-Separated Values (CSV)-Datei übergeben. Die Auflösung der Zeitstempel ist 10 Minuten und der dazugehörige Wert wird in kW/Fahrzeug angegeben.

4.1.2 Fahrzeugmodelle

Damit Elektrofahrzeuge in unterschiedlichen Ausführungen vom Kleinwagen bis zum Geländewagen in der Simulation berücksichtigt werden können, müssen Fahrzeugmodelle spezifiziert werden. Zur Spezifikation von verschiedenen Fahrzeugmodellen werden jeweils fünf Parameter definiert.

Der Parameter *name* dient zur Identifikation. Die *charging_power_max* gibt die maximale Ladeleistung des Fahrzeugs in kW und die *battery_capacity* die nutzbare Batteriekapazität an. Ein weiterer Parameter ist der *csv_efficiency_curve_name*. Dieser wird verwendet, um dem Fahrzeug eine leistungsabhängige Effizienz-Kurve des OBC zuzuweisen. Eine genauere Beschreibung dieser Effizienz-Kurven ist in Abschnitt 4.1.4 zu finden. Der Anschlusstyp zum Laden des Fahrzeugs wird über den *connection_type* eingestellt. Dabei kann dieser Parameter entweder auf *Type2* oder *CSS* gesetzt werden. *Type2* entspricht dem AC-Laden mit dem Typ-2-Stecker und *CSS* dem DC-Laden über das Combined Charging System. Unterstützt ein Fahrzeug sowohl das Gleichstrom- als auch das Wechselstrom-Laden, wird durch diesen Parameter die Ladeart fixiert. Das ist notwendig, da die maximale Ladeleistung des Fahrzeugs auch vom Anschlusstyp abhängt. So beträgt zum Beispiel beim BMW i4 die maximale Ladeleistung beim AC-Laden 11 kW und beim DC-Laden 205 kW [40].

Diese Parameter können in einer JSON-Datei definiert und dem E-Car-Charging-Management-Modul übergeben werden. Eine Beispiel-Datei ist im Quelltextauszug 4.1 zu finden.

```
1 {
2   "ecar_types": [
3     {
4       "name": "BMW iX3",
```

```

5     "charging_power_max": 50,
6     "battery_capacity": 70,
7     "csv_efficiency_curve_name": null,
8     "connection_type": "Type2"
9   },
10  {
11    "name": "Tesla Model S 70D",
12    "charging_power_max": 16.5,
13    "battery_capacity": 70,
14    "csv_efficiency_curve_name": null,
15    "connection_type": "Type2"
16  }
17 ]
18 }

```

Quelltextauszug 4.1: Ein Beispiel eine JSON-Datei mit zwei Elektrofahrzeug-Modellen

4.1.3 Ladetarif

Es gibt verschiedene Arten von Ladetarifen für Elektroautos, die von den Energieversorgern oder den Betreibern von Ladestationen angeboten werden. Üblich sind vor allem Flatrates, also ein fixer Preis pro Ladevorgang, oder Tarife, die auf der geladenen Energie oder der Ladedauer basieren. Es gibt aber auch Preismodelle bei denen ein Grundpreis oder zusätzliche Minutenpreise nach einer gewissen Zeit anfallen [41]. Da das Flatrate-Modell keine Abhängigkeit zur geladenen Energie und Ladezeit hat, ist es für die Betrachtungen in dieser Arbeit uninteressant.

Tabelle 4.1: Ladetarif StromMOBIL TIME von Linz AG [42]

Ladepunkt	Ladeleistung	Ladekosten
AC	bis 3,7 kW	2,30 €/Stunde
AC	bis 11 kW	5,70 €/Stunde
AC	bis 22 kW	11,30 €/Stunde
AC	bis 43 kW	26,10 €/Stunde
DC	bis 50 kW	33,60 €/Stunde
DC	bis 200 kW	67,10 €/Stunde
DC	über 200 kW	136,30 €/Stunde

Tarife, die auf die Ladezeit basieren, sind unter anderem der StromMOBIL TIME Tarif von Linz AG [42] und der zeitbasierte ÖAMTC ePower Tarif [43]. Die entsprechenden Preise finden sich in den Tabellen 4.1 und 4.2, welche den Stand von Februar 2023 wiedergeben. In diesen Beispielen spielt die geladene Energie der Fahrzeuge keine Rolle, es werden nur die Lademinuten abgerechnet. Dabei hängt der Preis

Tabelle 4.2: Ladetarif ÖAMTC ePower Zeitbasiert [43]

Ladepunkt	Ladeleistung	Ladekosten
AC	bis 3,7 kW	0,04 €/Minute
AC	bis 11 kW	0,12 €/Minute
AC	bis 43 kW	0,17 €/Minute
DC	bis 50 kW	0,52 €/Minute
DC	über 50 kW	0,92 €/Minute

von der maximalen Leistung des Ladepunktes ab und steigt mit höherer Leistung. Zudem wird unterschieden, ob über AC oder DC geladen wird.

Ist das Fahrzeug vollgeladen, bleibt aber noch am Ladepunkt angeschlossen, muss der Minutenpreis weiterhin bezahlt werden. Diese Parkgebühr führt dazu, dass Ladepunkte schnell wieder frei werden und das nächste Fahrzeug laden kann. Im implementierten Simulationsmodell verlassen die Fahrzeuge den Ladepunkt nach Erreichen des gewünschten Ladezustandes oder überschreiten der maximale Ladezeit. Dadurch fallen in der Simulation keine Kosten für das Besetzt halten an.

Tabelle 4.3: Ladetarif StromMOBIL EASY POWER von Linz AG [42]

Ladepunkt	Ladeleistung	Ladekosten
AC	3,7 kW bis 43 kW	0,54 €/kWh
DC	bis 200 kW	0,64 €/kWh
DC	über 200 kW	0,89 €/kWh

Tabelle 4.4: Ladetarif ÖAMTC ePower Energiebasiert [43]

Ladepunkt	Ladekosten	
AC	0,59 €/kWh	0,10 €/Minute ab 240. Minute
DC	0,69 €/kWh	0,10 €/Minute ab 120. Minute

Zwei Beispiele für energiebasierte Preismodelle aus Februar 2023 sind in den Tabellen 4.3 und 4.4 aufgeführt. Eine Leistungsabhängigkeit des Preises ist nur beim DC-Laden im StromMOBIL EASY POWER Tarif zu finden. Energiebasiert bedeutet, dass die Ladekosten nur von der bezogenen Energie und nicht von der Ladezeit abhängen. Beim ÖAMTC ePower Ladetarif werden zudem zusätzliche Kosten ab bestimmten Ladezeiten fällig.

Die genannten Preismodelle hängen jeweils von der maximalen Ladeleistung des Ladepunktes ab, an dem das Fahrzeug aufgeladen wird. Zum Beispiel muss ein Fahrzeug, das an einem 43 kW AC-

Ladepunkt angeschlossen ist und nach dem zeitbasierten ÖAMTC ePower Latetarif abgerechnet wird, immer den vollen Ladekostensatz von 0,17 €/Minute zahlen. Dies ist selbst dann der Fall, wenn die Ladeleistung durch ein Lademanagement auf 11 kW reduziert wird, bei dem bereits ein günstigerer Tarif von 0,12 €/Minute gelten würde.

Um die Ladetarife möglichst fair zu gestalten, werden in dieser Arbeit auch Tarife berücksichtigt, bei denen der Preis von der aktuell bezogenen Leistung des Fahrzeugs abhängt. Zur Vergleichbarkeit werden dieselben genannten leistungsabhängigen Preise verwendet. In diesem Fall würde das gleiche Fahrzeug in den Ladezeiten, in denen die Ladeleistung unter 11 kW fällt, nur 0,12 €/Minute bezahlen.

Eine zusätzliche Anpassung, die ebenfalls berücksichtigt wird, ist die Verwendung eines linearen Preismodells. Dabei werden die Kosten in € pro kWh anhand einer linearen Interpolation von zwei Preis-Leistungspunkten (k, p) berechnet. Der erste Punkt der Geraden wird definiert, indem bei einer Leistung p_0 von 0 kW die Kosten k_0 von 0 €/kWh festgelegt werden. Der zweite Punkt fixiert den Preis k_1 von 0,30 €/kWh bei einer Leistung p_1 von 22 kW. Somit kostet das Laden des Elektrofahrzeuges bei 11 kW 0,15 €/kWh und bei 40 kW 0,60 €/kWh. Die entsprechende mathematische Formulierung ist in Gleichung (4.1) gegeben.

$$k = \left(\frac{k_1 - k_0}{p_1 - p_0} - k_0 \right) * P_{EV} + k_0 \quad (4.1)$$

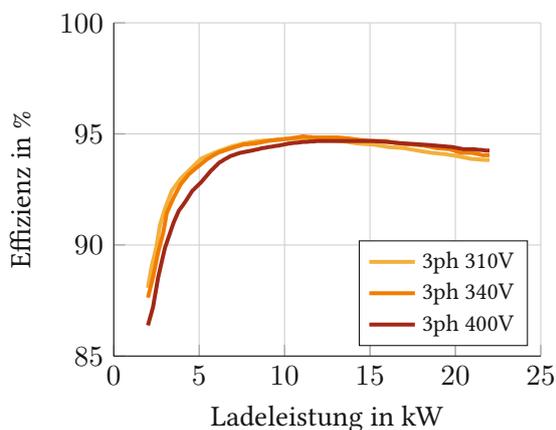
Die genannten Ladetarife dienen dazu, die verschiedenen Preismodelle abzubilden, die in der Simulation verglichen werden können. Die Arbeit legt jedoch keinesfalls den Fokus auf die Bestimmung des besten Tarifs, sondern auf den Vergleich der Preismodelle. Zur besseren Vergleichbarkeit des Mobilitätsverhaltens wird in dieser Arbeit angenommen, dass dieselben Tarife sowohl für den Ladepunkt an einem öffentlichen Platz, für Ladepunkte in der Nähe der Arbeitsplätze und am Wohnort gelten. Es sei nochmals betont, dass Fokus dieser Arbeit auf dem Lademanagement mehrerer Fahrzeuge liegt, weshalb die Kosten bei privaten Ladestationen aus dieser Perspektive uninteressant sind.

4.1.4 Ladewirkungsgrad

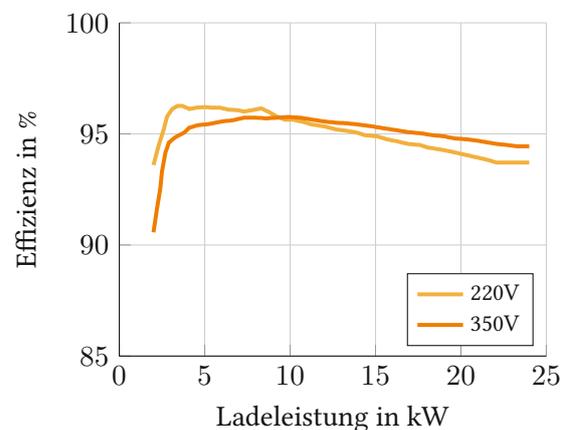
Wie im Abschnitt 3.3.1 eingeführt, wird im CCCV-Ladeverfahren, Gleichung (3.4), auch der Ladewirkungsgrad η mitberücksichtigt. Die Ladeverluste setzen sich dabei unter anderem aus den Verlusten des OBC und den Verlusten der Batterie zusammen. Ein guter Richtwert für den Ladewirkungsgrad einschließlich der Batterieverluste ist 90% [12].

Der fixe Ladewirkungsgrad kann durch Effizienz-Kurven von OBC verfeinert werden. Dafür wird dem Simulationsmodell anhand des `csv_efficiency_curve_name` Parameters der Name der CSV-Datei übergeben. In dieser CSV-Datei ist der leistungsabhängige Wirkungsgrad definiert. Der gesamte Ladewirkungsgrad η_{gesamt} setzt sich dann wie in Gleichung (4.2) formuliert, aus dem Wirkungsgrad des OBC und dem Wirkungsgrad der Batterie zusammen. Der Wirkungsgrad für Batterie η_{Batterie} ist auf 95% fixiert, das ein typischer Wert bei Lithium-Ionen Batterien ist [14].

$$\eta_{\text{gesamt}}(P_{EV}) = \eta_{\text{OBC}}(P_{EV}) \cdot \eta_{\text{Batterie}} \quad (4.2)$$



(a) Ladewirkungsgrad vom Brusa NLG664 OBC bei verschiedenen Ausgangsspannungen [44]



(b) Ladewirkungsgrad vom innoelectric OBC bei verschiedenen Ausgangsspannungen [45]

Abbildung 4.2: Beispiele für den ladeleistungsabhängigen Wirkungsgrad des OBC

In Abbildung 4.2 sind zwei Beispiele von leistungsabhängigen Wirkungsgrad des OBC zu finden. Beide Effizienz-Kurven zeigen eine sinkende Effizienz bei geringen Ladeleistungen. Welche Auswirkungen dieses Verhalten auf die Ladekosten hat, wird im Kapitel 4 näher behandelt.

4.1.5 Anschlussleistung der Ladestation

Ladestationen werden normalerweise an das Verteilnetz angeschlossen und entweder einphasig oder dreiphasig betrieben. Generell sind alle Verbraucher mit einer Bemessungsleistung über 3,68 kVA dreiphasig an das Netz anzuschließen. Nur Geräte unter dieser Leistungsgrenze dürfen einphasig angeschlossen werden, damit Unsymmetrien im Netz vermieden werden [7]. Damit der Netzbetreiber Planungssicherheit hat, muss die Installation einer Ladestation beim Netzbetreiber für einphasige Anschlüsse ab einer Anschlussleistung von 1,3 kVA und für dreiphasige Anschlüsse ab 3,68 kVA angemeldet werden [46]. Um eine Schnellladestation mit einer großen Anzahl an Ladepunkten betreiben zu können, wird ein eigener Mittelspannungsanschluss mit einer dazugehörigen Trafostation benötigt.

Damit reicht die Anschlussleistung von Ladestationen von einigen Kilowatt bis hin zu einigen Hundert Kilowatt. Ladestationen für den Heimgebrauch haben eine Anschlussleistung im Bereich von 3,7 kW bis 22 kW. Hingegen haben Schnellladestationen an öffentlichen Orten typischerweise eine Anschlussleistung von 50 kW bis 350 kW. Die Anschlussleistung der jeweiligen Ladestationen in der Simulation können über den Parameter *station_power_max* konfiguriert werden. Die Leistung wird dabei als kW interpretiert.

Im aktuellen Simulationsmodell wird die Leistung der Ladestation während der Simulation als konstant betrachtet, jedoch ist es möglich, bei zukünftigen Arbeiten die Leistung der Station in jedem Simulationsschritt dynamisch anzupassen. Hierfür bietet das Modul eine entsprechende Funktion. Durch die dynamische Anpassung kann beispielsweise ein weiteres BIFROST-Modul die Anschlussleistung der Ladestation erhöhen, wenn viel PV-Strom erzeugt wird und sie verringern, wenn das Netz stark belastet ist.

4.1.6 Überblick Eingangsparmeter

Eine Übersicht aller Eingangsparmeter und eine kurze Beschreibung ist in Tabelle 4.5 zu finden. Dabei wird zwischen spezifischen Eingangsparmetern von Fahrzeugen, der Station und der Simulation unterschieden.

Die Konfiguration der Fahrzeug-spezifischen Parameter hängt von der Art der Fahrzeug-Zuweisung ab. Bei der direkten Zuweisung werden diese Parameter von der Zuweisungsdatei übernommen. Erfolgt die Zuteilung zufällig, wird hingegen nur der Name, die maximale Ladeleistung, die Batterie-Kapazität und

Tabelle 4.5: Überblick der Eingangsparameter für die Simulation

Parameter	Beschreibung
Fahrzeug-spezifische Parameter	
name	Name des Fahrzeug-Modells zur Identifikation
charging_power_max	Maximale Ladeleistung des Fahrzeugs in kW
battery_capacity	Nutzbare Kapazität der Fahrzeugbatterie in kWh
csv_efficiency_curve_name	Dateiname des leistungsabhängigen Wirkungsgrads des OBC
connction_type	Anschlusstyp des Fahrzeugs
soc_start	Ladezustand des Fahrzeugs zu Beginn des Ladevorgangs
soc_end	Ladezustand des Fahrzeugs am Ende des Ladevorgangs
charging_time_minutes_start	Start-Zeitpunkt des Ladevorgangs
charging_time_minutes_end	End-Zeitpunkt des Ladevorgangs
Ladestation-spezifische Parameter	
charging_points_count	Anzahl der Ladepunkte an der Ladestation
charging_time_minutes_min	Minimale Verweildauer eines Fahrzeugs in Minuten
charging_time_minutes_max	Maximale Verweildauer eines Fahrzeugs in Minuten
charging_concept	Name des verwendeten Lademanagement-Konzepts
station_power_max	Maximale Leistung, die die Ladestation bereitstellen kann in kW
load_profile_filename	Dateiname des Standardlastprofils
load_profile_period_minutes	Dauer der Perioden des Standardlastprofils in Minuten
ecar_assignment	Auswahl der direkt oder zufällig Zuweisung
ecar_assignment_filename	Dateiname der Zuweisungsdatei
num_ecars_per_day_and_point	Anzahl der per Zufall zugewiesenen Fahrzeuge
ecar_types_filename	Dateiname der Fahrzeug-Modelle
soc_start_min	Untere Grenze des Start-Ladezustands
soc_start_max	Obere Grenze des Start-Ladezustands
soc_end_min	Untere Grenze des End-Ladezustands
soc_end_max	Obere Grenze des End-Ladezustands
tariff_structure	Name des verwendeten Ladetarifs
marginal_power	Grenzleistung in kW
Simulations-spezifische Parameter	
sampling_rate	Simulationszeitschritt in Sekunden
time_window_left	Beginn-Zeitpunkt der Simulation in Sekunden
time_window_right	End-Zeitpunkt der Simulation in Sekunden

der Anschlusstyp aus den Fahrzeug-Modellen herangezogen. Der Wert des Start- und Endladezustands der Fahrzeugbatterie wird hingegen zufällig bei der Zuweisung generiert. Der minimale und maximale Start-Ladezustand, *soc_start_min* und *soc_start_max* begrenzen dabei die Zufallswerte. Für den End-Ladezustand gibt es ebenfalls die definierten Grenzen *soc_end_min* und *soc_end_max*. Die maximale Ladedauer wird ebenfalls während der Zuweisung zufällig aus dem Bereich zwischen der minimalen Verweildauer und maximalen Verweildauer des Fahrzeugs ausgewählt.

Die Ladestation-spezifischen Parameter können mittels einer JSON-Datei, der Modul-Konfiguration, eingestellt werden. Diese beinhaltet nicht nur alle Parameter einer Station, sondern die Ladestation-



Abbildung 4.3: Konfiguration über das BIFROST-Frontend

spezifischen Parameter aller Ladestationen einer Siedlung. Dadurch ist es möglich die Parameter der Stationen untereinander abzugleichen. Zudem kann eine gesamte Siedlung mit nur einer Datei konfiguriert werden.

Die Simulations-spezifischen Parameter können über das BIFROST-Frontend eingestellt werden, das in Abbildung 4.3 unten links zu erkennen ist. Die Ladestation-spezifische Parameter, wie die Auswahl des Lademanagement-Konzeptes, die Anzahl an Ladepunkten oder die Stationsleistung, können ebenfalls über das Frontend eingestellt werden. Abbildung 4.3 zeigt rechts die Einstellmöglichkeiten der ausgewählten Ladestation. Über Schieber und Auswahlménüs können die entsprechenden Werte einfach eingestellt werden, welcher ein weiterer Grund für die Wahl von BIFROST war. Darüber hinaus bietet das Frontend die Möglichkeit, Skripte anzulegen, die sowohl zur Initialisierung als auch zur Anpassung der Parameter verwendet werden können.

4.2 Ausgangsgrößen (KPIs)

In diesem Abschnitt werden relevante Ausgangsgrößen erarbeitet und definiert, die zur Beantwortung der Forschungsfrage dienen. Es werden die benötigte Energie zum Laden, die Ladezeit und die Ladekosten betrachtet. Am Ende des Abschnitts wird ein Überblick über die KPIs gegeben.

Um die relevanten Indikatoren für den Vergleich der Lademanagement-Konzepte zu definieren, müssen zunächst die Bedürfnisse der Zielgruppen erarbeitet werden. Hierfür werden die Interessen aus der Perspektive des Ladestations-Betreibers und des einzelnen Kunden betrachtet. Für den Ladestations-Betreiber stehen vor allem folgende Fragen im Vordergrund:

- Wie gut ist die Ladestation ausgelastet?
- Wie effizient erfolgen die Ladungen der Fahrzeuge an der Ladestation?

Um diese Fragen beantworten zu können, ist für den Ladestations-Betreiber die durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge als Indikator wichtig. So kann die Auslastung der Ladestation erfasst werden. Die Frage der Effizienz der Ladevorgänge wird hingegen anhand des Verhältnisses zwischen der benötigten Energiemenge und der tatsächlich in die Batterie geladenen Energie beantwortet.

Für den einzelnen Fahrzeugnutzer hingegen spielen andere Fragestellungen eine Rolle:

- Wie hoch sind die Kosten für die Ladung des Fahrzeugs?
- Wie schnell kann das Fahrzeug aufgeladen werden?

Den Fahrzeugnutzer interessiert letztendlich nur das Ergebnis für sein individuelles Fahrzeug, weshalb die Kosten und die Ladezeit der einzelnen Fahrzeuge von großer Bedeutung für den Kunden sind.

Zusammengefasst sind für den einzelnen Kunden hauptsächlich die Kosten und die Ladezeit des Fahrzeugs von Interesse. Für den Betreiber von Ladestationen hingegen sind die durchschnittlichen Werte der benötigten Energiemenge und der Ladezeiten von Bedeutung. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen KPIs definiert und beschrieben.

4.2.1 Ladezeit

Die Ladezeit wird einerseits individuell für jede Fahrzeug-Ladung in Minuten und andererseits als durchschnittliche Ladezeit aller Fahrzeuge einer Ladestation berechnet. Die Gleichung (4.3) definiert die durchschnittliche Ladezeit \bar{T}_{charged} aller Fahrzeuge n einer Ladestation. $T_{\text{charged},i}$ gibt hierbei die Ladezeit des Fahrzeugs i in Minuten an.

$$\bar{T}_{\text{charged}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{charged},i} \quad (4.3)$$

Andererseits wird auch ein Ladezeit-Faktor der einzelnen Fahrzeuge zur Verfügung gestellt. Dieser Faktor wird in Prozent angegeben und beschreibt das Verhältnis zwischen der benötigten Ladezeit und der kürzest möglichen Ladedauer. Diese entsteht, wenn das Fahrzeug kontinuierlich mit seiner maximalen Leistung geladen wird. Der in Gleichung (4.4) definierte Ladezeit-Faktor T_F ist 100 %, wenn das Fahrzeug schnellstmöglich geladen wurde und wird umso größer, je länger der Ladevorgang T_{charged} dauert.

$$T_F = \frac{T_{\text{charged}}}{T_{\text{min}}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Die Dauer der Ladung beginnt ab dem Zeitpunkt des Anschlusses am Ladepunkt und endet mit dem Verlassen der Station. Somit zählt auch jene Zeit, bei der die Fahrzeugbatterie aufgrund der Leistungsaufteilung des Lademanagements nicht geladen wird.

4.2.2 Energie

Die benötigte Energie bezeichnet die Menge an Energie, die vom Ladepunkt zur Verfügung gestellt wird, um eine Fahrzeugladung durchzuführen. Es ist zu beachten, dass die tatsächlich in die Fahrzeugbatterie eingespeiste Energiemenge nicht der benötigten Energie entspricht. Grund dafür ist der Ladewirkungsgrad, der im Modell berücksichtigt wird. Der Energie-Faktor E_F beschreibt genau dieses Verhältnis in Prozent und ist in Gleichung (4.5) definiert.

$$E_F = \frac{E_{\text{consumed}}}{E_{\text{charged}}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Dabei entspricht E_{consumed} der benötigten elektrischen Energie und E_{charged} der tatsächlich in die Batterie geladenen Energiemenge. Zudem wird die benötigte Energie pro Fahrzeug und als durchschnittlicher Wert von allen Fahrzeugen einer Ladestation zur Verfügung gestellt. Somit beschreibt $E_{\text{consumed},i}$ die benötigte Energie des Fahrzeugs i und $\bar{E}_{\text{consumed}}$ den durchschnittlichen Wert der benötigten elektrischen Energie aller Fahrzeuge n . Dies wird mathematisch durch Gleichung (4.6) dargestellt:

$$\bar{E}_{\text{consumed}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{\text{consumed},i} \quad (4.6)$$

Zudem steht auch die geladene Energie E_{charged} zur Verfügung, jene Energie die tatsächlich in die Batterie des Fahrzeugs geladen wurde.

4.2.3 Ladekosten

Unter Ladekosten werden jene Kosten verstanden, die einem Fahrzeugnutzer für das Laden in Euro berechnet werden. Dabei stehen die individuellen Ladekosten jeder einzelnen Ladung zur Verfügung.

Um auch die Ladekosten von Simulationen mit unterschiedlichen Ladeleistungen und Kapazitäten der Fahrzeuge besser vergleichen zu können, werden auch die normierten durchschnittlichen Ladekosten der Stationen berechnet. Hierbei werden die individuellen Ladekosten K_i durch die geladene Energie $E_{\text{charged},i}$ normiert. Die Summe der normierten Kosten wird anschließend durch die Anzahl der Fahrzeuge n geteilt. In Gleichung (4.7) ist die formale Definition der normierten durchschnittlichen Ladekosten \bar{K}_n notiert.

$$\bar{K}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{E_{\text{charged},i}} \quad (4.7)$$

4.2.4 Überblick der Ausgangsgrößen (KPIs)

Die Tabelle 4.6 zeigt alle verfügbaren Parameter, die als Indikatoren dienen. Dabei werden die Ladezeit, die Energiemenge und die Ladekosten in verschiedenen Varianten angegeben. Diese können entweder als Einzelwerte für jeden Ladevorgang, als Durchschnittswerte über alle Ladevorgänge einer Ladestation oder auch als Faktoren verwendet werden.

Tabelle 4.6: Überblick der Ausgangsgrößen für die Simulation

Parameter	Beschreibung
Ladezeit	
charging_time	Dauer der Ladung in Minuten
charging_time_average	Durchschnittliche Dauer der Ladung aller Fahrzeuge der Ladestation in Minuten pro Fahrzeug
charging_time_factor	Ladezeit-Faktor in %
Energie	
energy_charged	Geladene elektrische Energiemenge in kWh
energy_consumed	Benötigte elektrische Energiemenge in kWh
energy_consumed_average	Durchschnittlich benötigte elektrische Energiemenge aller Fahrzeuge einer Ladestation in kWh pro Fahrzeug
energy_factor	Energie-Faktor in %
Ladekosten	
charging_costs	Ladekosten des Ladevorgangs in €
charging_costs_normed	Normierte durchschnittliche Ladekosten in €/Fahrzeug

4.3 Simulationsergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden nun die Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte auf die vorher definierten Indikatoren hin untersucht. Dabei werden zuerst die Ergebnisse der Simulation aus der Sicht des Ladestations-Betreibers betrachtet und im Anschluss werden die Auswirkungen auf den einzelnen Kunden untersucht.

4.3.1 Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte aus Sicht des Betreibers

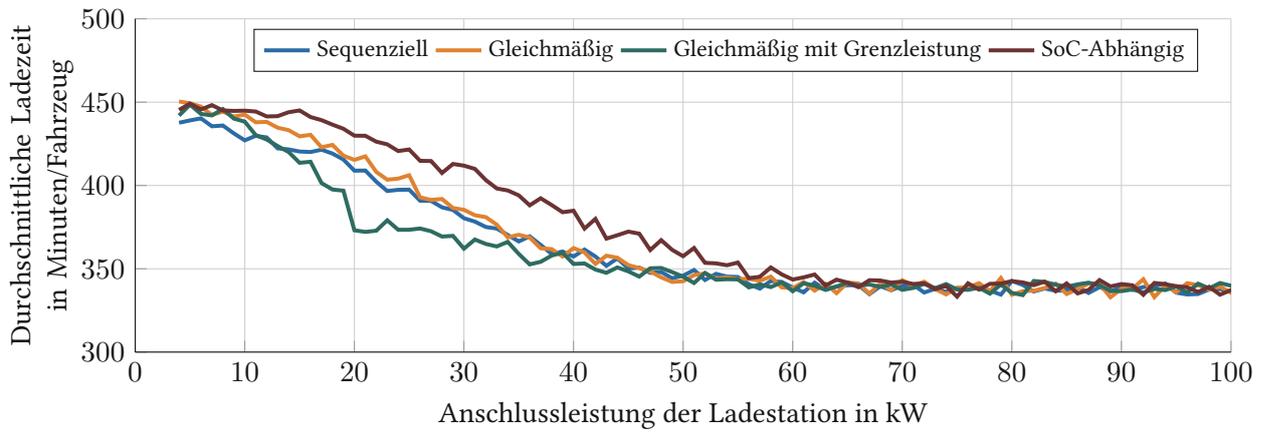
Wie im Abschnitt 4.2 erläutert, sind für den Betreiber die durchschnittlichen KPIs von Interesse. Dazu zählen die durchschnittliche Ladezeit und die benötigte Energie aller Fahrzeuge einer Ladestation. In diesem Zusammenhang werden diese Indikatoren nun nacheinander behandelt, wobei die Auswirkungen der relevanten Eingangsparameter untersucht werden.

Durchschnittliche Ladezeit

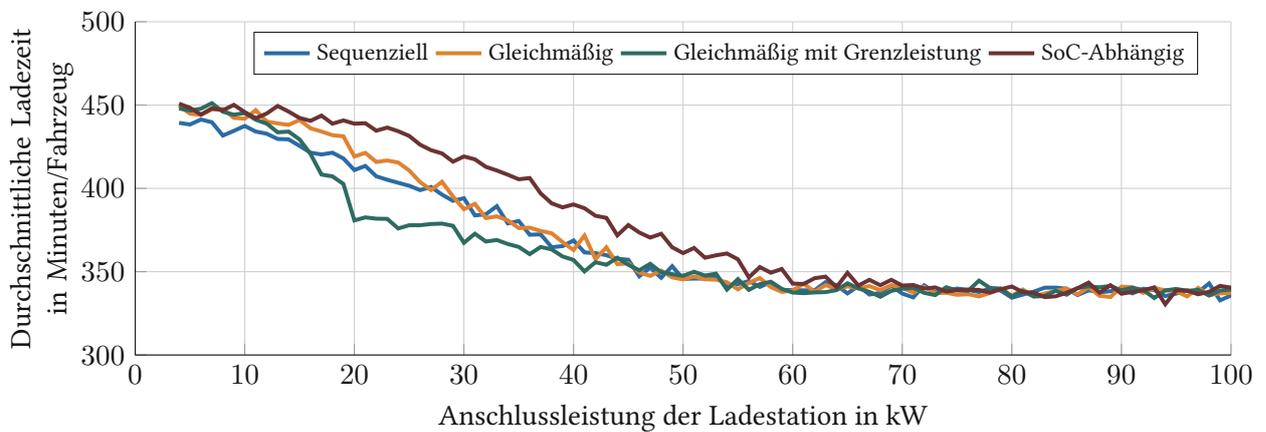
Somit werden nun die Eingangsparameter betrachtet, die Auswirkungen auf die durchschnittliche Ladezeit haben. Dazu gehören vor allem das Mobilitätsverhalten und die Auslastung der Ladestation. Wie bereits im Abschnitt 4.1.1 beschrieben, lassen sich je nach Standort und Gebietstyp der Ladestation unterschiedliche Mobilitätsverhalten erkennen. Daher müssen einerseits die Auswirkungen des Standortes, wie zum Beispiel die Nähe zu Wohngebieten, Arbeitsplätzen und öffentlichen Plätzen, und andererseits die Gebietstypen, von Typ 1 bis Typ 6, untersucht werden.

Die Abbildungen in 4.4 zeigen die durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge an einer Ladestation in der Innenstadt einer Großstadt. Das Diagramm 4.4(a) repräsentiert dabei eine Ladestation im Wohngebiet, 4.4(b) in der Nähe von Arbeitsplätzen und 4.4(c) an einem öffentlichen Platz. Die Diagramme setzen sich aus den Ergebnissen mehrerer Halbjahres-Simulationen zusammen. Die Simulationen unterscheiden sich dabei in der Anschlussleistung der Ladestation, die jeweils um 1 kW erhöht wird. Für jeden Standort wurden je vier Ladestationen simuliert, die jeweils eine der vier Lademanagement-Konzepte anwendet. Somit wurden insgesamt zwölf Ladestationen betrachtet.

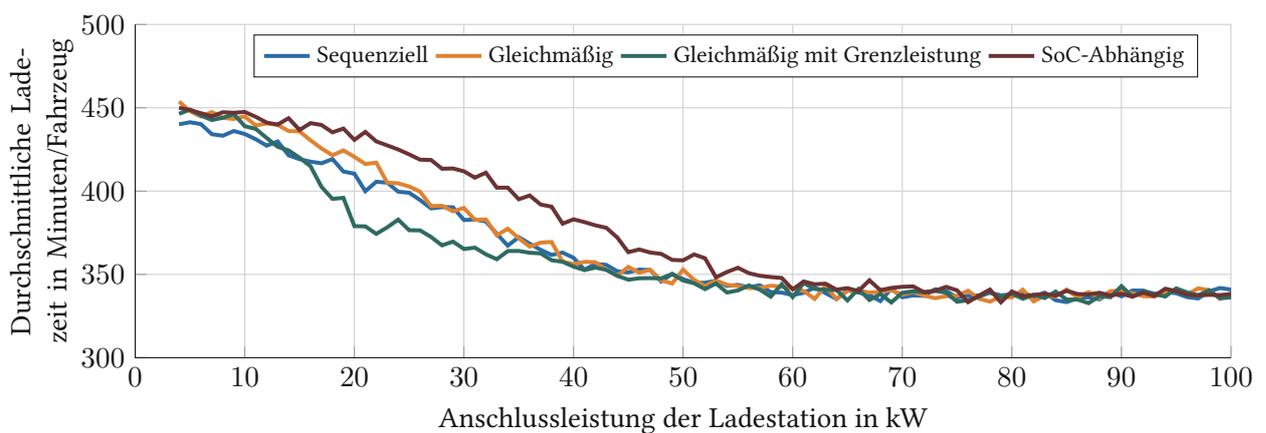
Die Zuweisung der Fahrzeuge erfolgt bei allen Stationen zufällig, wie in Abschnitt 3.3.2 näher erläutert. Die Auswahl der Fahrzeug-Modelle erfolgte auf Grundlage der in Österreich am häufigsten neu zugelassenen Elektrofahrzeuge im Dezember 2021 [47]. Dabei wurden die Batterie-Kapazität und maximale Ladeleistung bei einem AC-Ladepunkt als Parameter übernommen. Zur besseren Vergleichbarkeit be-



(a) Durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge einer Ladestation in der Nähe des Wohnortes im inneren Stadtbereich einer Großstadt



(b) Durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge einer Ladestation in der Nähe des Arbeitsplatzes im inneren Stadtbereich einer Großstadt



(c) Durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge einer Ladestation am öffentlichen Platz im inneren Stadtbereich einer Großstadt

Abbildung 4.4: Durchschnittliche Ladezeit der Fahrzeuge einer Ladestation im inneren Stadtbereich einer Großstadt an unterschiedlichen Standorten

ginnt die Ladung jedes Fahrzeuges bei einem Ladezustand von 0 % und soll bis 100 % aufgeladen werden. Die maximale Ladedauer wird zwischen fünf und zehn Stunden definiert. Außerdem wird die Effizienz des Ladevorgangs mit 90 % angegeben. Jede Ladestation verfügt dabei über fünf AC-Ladepunkte mit einer maximalen Ladeleistung von 22 kW. Die Anzahl an Fahrzeugen pro Tag ist auf den durchschnittlichen Wert von zwei fixiert.

In den Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass die durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug mit zunehmender Anschlussleistung der Ladestation sinkt. Außerdem zeigen die Lademanagement-Konzepte unterschiedliche Auswirkungen auf die Ladezeit. Mit zunehmender Anschlussleistung werden die Unterschiede geringer und pendeln sich ungefähr bei 60 kW bei allen Stationsorten auf circa 340 Minuten pro Fahrzeug ein. Grund hierfür ist, dass sobald genügend Anschlussleistung vorhanden ist, alle angeschlossenen Fahrzeuge mit ihrer maximalen Leistung geladen werden können. Ab diesen Zeitpunkt muss die Leistung nicht mehr auf die Fahrzeuge aufgeteilt werden und somit sind auch die Lademanagement-Konzepte nicht mehr notwendig. Dies führt zu einer Abflachung der Kurve.

In allen drei Diagrammen weist das SoC-Abhängige Lademanagement-Konzept die längste Ladezeit auf, wohingegen das Gleichmäßige Laden mit einer Grenzleistung von 4 kW meistens die kürzeste durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug hat. Die größten Differenzen sind bei den Anschlussleistungen von 20 kW zu finden und betragen etwa eine Stunde. Da Fahrzeuge mit geringerer Ladeleistung beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung bevorzugt werden, können diese tendenziell schneller den Vollladezustand erreichen. Beim SoC-Abhängigen Konzept hingegen wird die Leistung der Fahrzeuge mit höherem Ladezustand reduziert, wodurch sich die gesamt Ladedauer der Fahrzeuge erhöht.

Beim Vergleich der drei betrachteten Standorte der Ladestation im Gebiet der Innenstadt weisen die einzelnen Konzepte ähnliche Ergebnisse auf. Dies ist auch bei den anderen Gebietstypen zu beobachten.

Nun sollen auch die Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte bei unterschiedlichen Gebieten, jedoch gleichbleibenden Standort, untersucht werden. Die Betrachtung der unterschiedlichen Gebietstypen ist in Abbildung 4.5 zu finden. Im Diagramm wird die durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeuge dargestellt. Dabei wird der Ladestation-Standort nahe der Wohnungen der Gebietstypen 1 bis 6 untereinander verglichen. Für die einzelnen Simulationen wurden dieselben Eingangsparameter wie vorher gewählt und als beispielhaftes Lademanagement-Konzept das sequenzielle Laden angewendet. Das Dia-

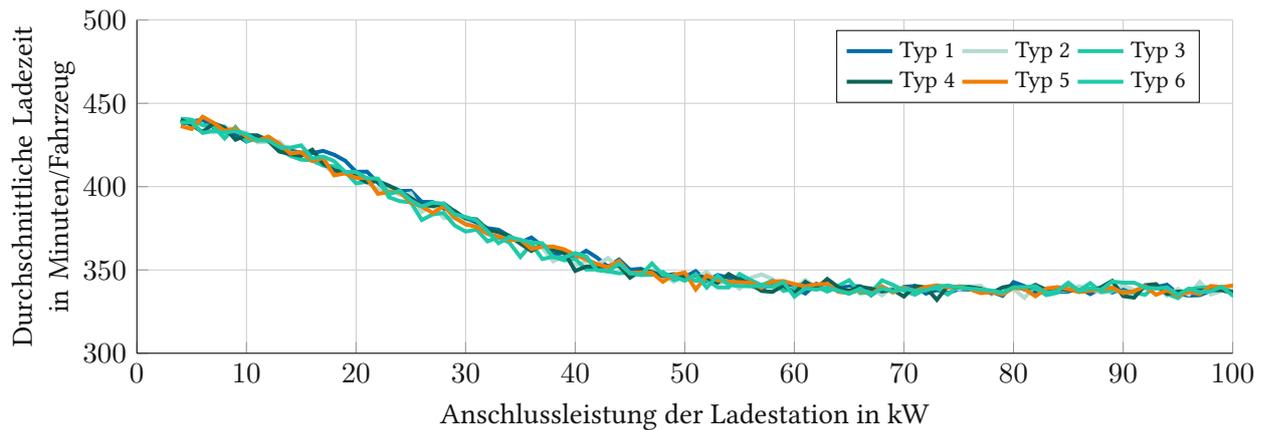


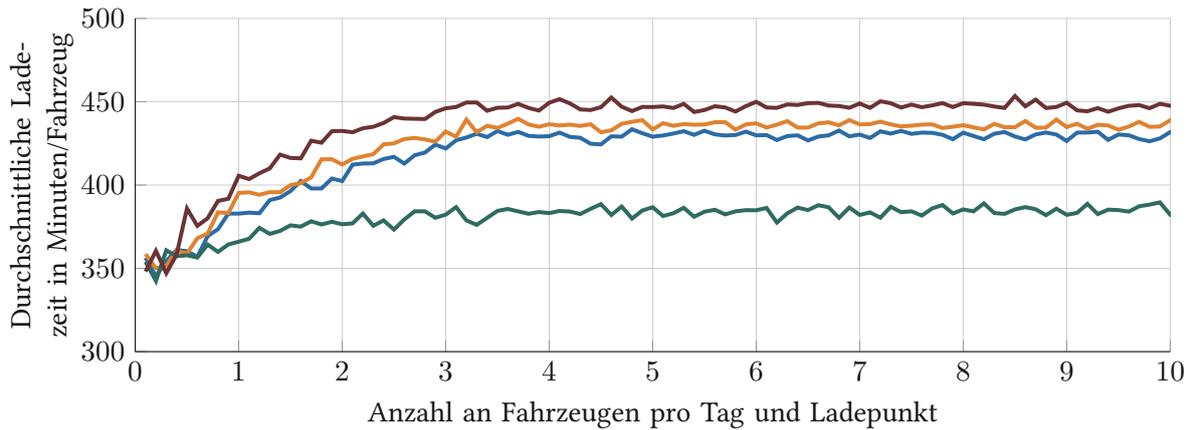
Abbildung 4.5: Durchschnittliche Ladezeit in Minuten pro Fahrzeug der Standardlastprofile Typ 1 bis Typ 6

gramm zeigt nahezu keine unterschiedlichen Auswirkungen der Gebietstypen auf die durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug. Dasselbe Verhalten ist auch in den Ergebnissen der anderen Lademanagement-Konzepte zu beobachten.

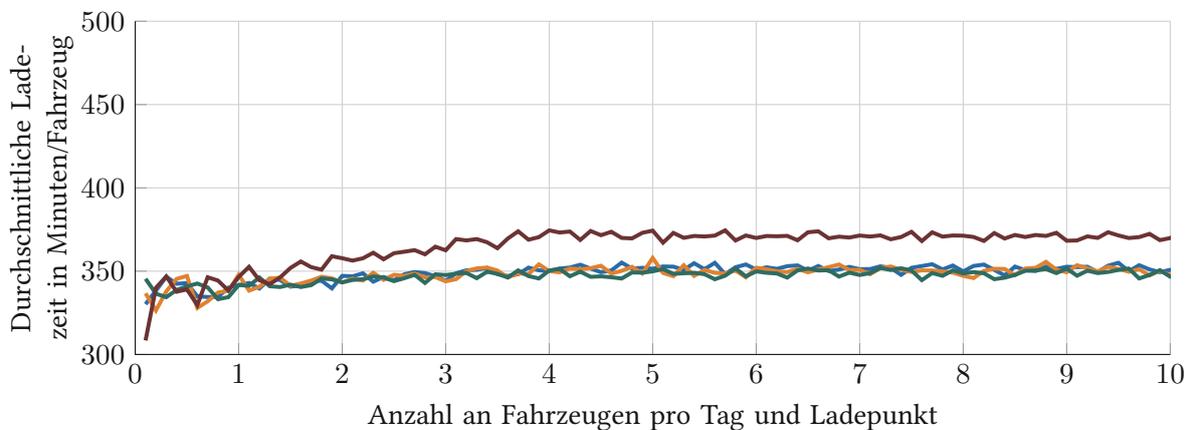
Da die verschiedenen Gebietstypen und Standorte der Ladestationen keine großen Auswirkungen auf die Ladezeit zeigen, soll nun die Anzahl der Fahrzeuge pro Tag und Ladepunkt als Eingangsparameter dienen. Dabei wurden die Simulationen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Fahrzeugen von 0,1 bis 10 Fahrzeuge pro Tag und Ladepunkt in 0,1 Schritten durchgeführt. Die Anschlussleistung der Ladestation wurde einerseits auf 20 kW und andererseits auf 50 kW fixiert. Diese Leistungen wurden auf Grundlagen der Ergebnisse aus dem vorherigen Simulationen ausgewählt.

In den Diagrammen 4.6 ist die durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug dargestellt. Generell lässt sich feststellen, dass eine erhöhte Anzahl an Fahrzeugen mit längeren Ladezeiten bei allen Konzepten einhergeht. Ist der Ladepunkt über den Tag vollständig ausgelastet, können keine weiteren Fahrzeuge geladen werden. Somit stagniert die Ladezeit ab einer Vollausslastung der Station.

Im Vergleich der durchschnittlichen Ladezeiten pro Fahrzeug bei einer Anschlussleistung von 20 kW in Abbildung 4.6(a) und 50 kW in Abbildung 4.6(b) wird deutlich, dass bei 20 kW die Ladezeiten wesentlich länger sind. Zusätzlich fallen auch die Unterschiede zwischen den Konzepten größer aus. Das SoC-Abhängige Laden weist, im Gegensatz zu den restlichen Konzepten, auch hier eine längere Ladezeit auf. Somit hat dieses Konzept für den Ladestation-Betreiber einen Nachteil, da die Fahrzeuge bis zum gewünschten End-Ladezustand länger laden müssen und den Ladepunkt besetzen.



(a) Durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug bei einer Anschlussleistung von 20 kW



(b) Durchschnittliche Ladezeit pro Fahrzeug bei einer Anschlussleistung von 50 kW

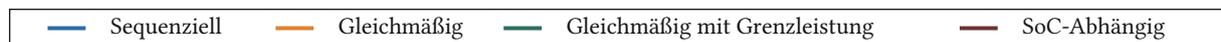


Abbildung 4.6: Durchschnittliche Ladezeit mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrzeugen pro Tag und Ladepunkt bei einer Anschlussleistung der Ladestation von 20 kW und 50 kW

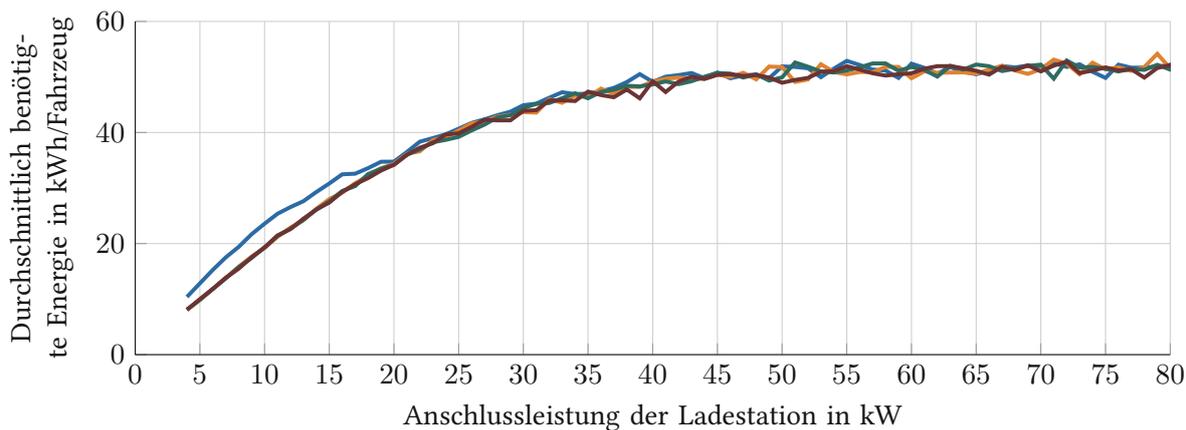
Durchschnittlich benötigte Energie

Nun soll untersucht werden, welche Auswirkungen die Konzepte auf die durchschnittliche benötigte Energie haben. Relevante Eingangsparmeter sind dabei der fixe und leistungsabhängige Wirkungsgrad des OBCs. Daher werden in diesem Abschnitt die Auswirkungen dieser beiden Parameter untersucht und verglichen.

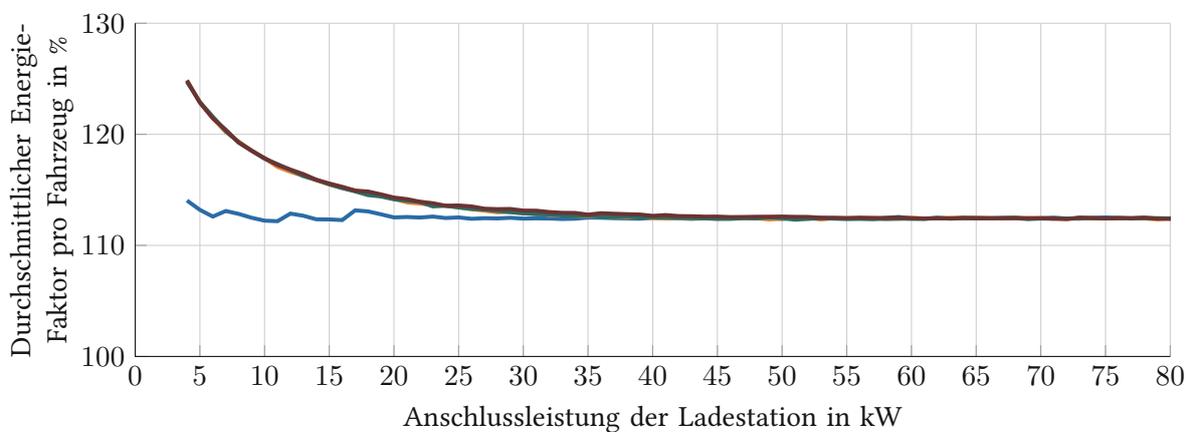
Für diese Untersuchung wurde wieder die zufällige Zuteilung der Fahrzeuge wie in den vorherigen Simulationen verwendet. Allerdings wurde die angenommene feste Effizienz des Ladevorgangs von 90 % nun gemäß Gleichung (4.2) berechnet, basierend auf dem leistungsabhängigen Wirkungsgrad des OBCs und dem Wirkungsgrad der Batterie von 95 %. Als Beispiel für die Wirkungsgrade der Wechselrichter der zugewiesenen Fahrzeuge werden die in der Literatur gefundenen Beispiele des Brusa NLG664 OBC [44] aus Diagramm 4.2(a) verwendet.

Die Ergebnisse in Abbildung 4.7 zeigen in Diagramm 4.7(a) die durchschnittlich benötigte Energiemenge pro Fahrzeug in kWh und in Diagramm 4.7(b) wird der Energie-Faktor in Prozent dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Konzepte ist zu beobachten, dass die durchschnittlich benötigte Energiemenge in allen Konzepten ähnlich ansteigt und ab einer Anschlussleistung von 40 kW konstant bleibt. Dieser Zeitpunkt markiert den Punkt, ab dem die maximale Ladezeit der Fahrzeuge ausreicht, um sie vollständig aufzuladen. Im Vergleich zur durchschnittlich benötigten Energiemenge beim konstanten Wirkungsgrad ist bei Verwendung des leistungsabhängigen Wirkungsgrades nur eine minimale Erhöhung erkennbar.

Beim Energie-Faktor ist zu erkennen, dass dieser sich bei etwa 112,4 % ab einer Anschlussleistung von 40 kW einpendelt. Im Vergleich zur Simulation mit einem konstant angenommenen Wirkungsgrad von 90 % liegt der Faktor bei 111,1 %. Die Unterschiede sind relativ gering, was darauf hinweist, dass die Modellannahme eines leistungsunabhängigen Wirkungsgrades eine akzeptable Näherung darstellt. Dennoch kann ein interessanter Effekt bei geringen Anschlussleistungen im Diagramm des Energie-Faktors beobachtet werden. Das sequenzielle Konzept zeigt hier eine Ausnahme und keinen Anstieg bei kleinen Leistungen. Der Grund dafür ist, dass die Fahrzeuge jeweils mit ihrer maximalen Ladeleistung laden können und daher die sehr geringe Effizienz des OBCs bei geringen Leistungen nicht ins Gewicht fällt. Ein Nachteil des Konzeptes besteht aber darin, dass spätere ankommende Fahrzeuge bei niedriger Anschlussleistung möglicherweise nicht vollständig bis zum Ende des Tages geladen werden können.



(a) Durchschnittliche benötigte Energie pro Fahrzeug unter Berücksichtigung leistungsabhängiger OBC-Wirkungsgrade



(b) Durchschnittlicher Energie-Faktor pro Fahrzeug unter Berücksichtigung leistungsabhängiger OBC-Wirkungsgrade



Abbildung 4.7: Durchschnittliche benötigte Energie und Energie-Faktor unter Berücksichtigung leistungsabhängiger OBC-Wirkungsgrade

Diskussion

Aus Sicht des Ladestationsbetreibers kann festgestellt werden, dass der Standort und der Gebiets-typ der Ladestation einen geringen Einfluss auf die durchschnittliche Ladezeit bei den verschiedenen Lademanagement-Konzepten haben. Die Anschlussleistung und die Auslastung der Ladestation, die mit dem Standort einhergehen, haben jedoch eine große Bedeutung für die durchschnittliche Ladezeit. Insbesondere das SoC-Abhängige Lademanagement-Konzept weist im Verhältnis die längsten Ladezeiten pro Fahrzeug auf.

Werden die durchschnittlich benötigte Energie für die Fahrzeugladungen betrachtet, lassen sich Einflüsse des leistungsabhängigen OBCs beobachten, jedoch sind diese im Vergleich zu einem konstant angenommenen Ladewirkungsgrad gering. Für den Betreiber bedeutet dies, dass die durchschnittlich benötigte Energiemenge unabhängig von den angewendeten Lademanagement-Konzepten abgeschätzt werden kann.

Die derzeit angewendeten zeit- und energiebasierten Ladetarife spiegeln die Ergebnisse vorheriger Untersuchungen hinsichtlich der durchschnittlich normierten Ladekosten wieder. Unter Verwendung des zeitbasierten Preismodells treten bei niedrigen Anschlussleistungen höhere normierte Ladekosten im SoC-Abhängigen Lademanagement-Konzept auf, während beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung geringere Kosten beobachtet werden. Der Vergleich zwischen zeit- und energiebasierten Tarifen erfolgt im folgenden Abschnitt 4.3.2.

4.3.2 Auswirkungen der Lademanagement-Konzepte aus Sicht des Fahrzeugnutzer

Nun sollen die Auswirkungen der unterschiedlichen Lademanagement-Konzepte auf den einzelnen Fahrzeugnutzer untersucht werden. So sind vor allem die Ladezeit und die Kosten für die Ladung von einem einzelnen Fahrzeug von Interesse.

Ladezeit

Um die Auswirkungen der Konzepte auf die individuelle Ladezeit zu untersuchen, müssen die relevanten Eingangsparameter betrachtet werden. Neben der verfügbaren Anschlussleistung der Ladestation spielen insbesondere die maximale Ladeleistung und die Kapazität des Fahrzeugs eine bedeutende Rolle. Zudem muss auch die Auslastung der Ladestation berücksichtigt werden, da bei höherer Auslastung

eine geringere Leistung für die Fahrzeuge zur Verfügung steht, wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert wurde. Um all diese Eingangsparameter zu untersuchen, werden die Auswirkungen verschiedener Fahrzeugparameter mit unterschiedlichen Ankunftszeiten an der Ladestation betrachtet. Im ersten Schritt werden nur die Auswirkungen der Ankunftszeiten bei gleichen Fahrzeugen betrachtet, und im zweiten Schritt werden auch die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrzeugparameter untersucht.

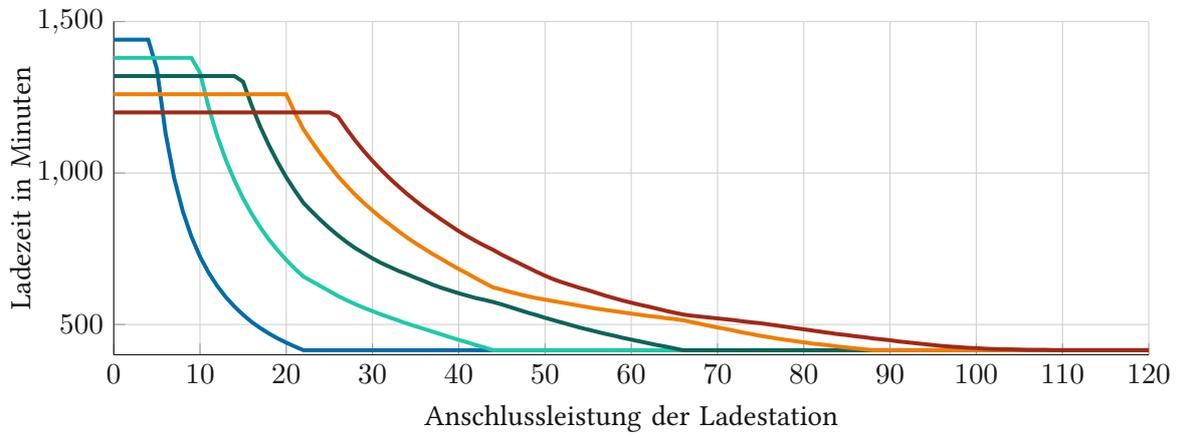
Damit die Ergebnisse untereinander vergleichbar sind, werden im ersten Schritt allen Stationen die selben Fahrzeuge direkt zugewiesen. Somit hat jedes Fahrzeug dieselbe maximale Ladeleistung, Kapazität und Start-Ladezustand. Diese Parameter sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Da hier alle Fahrzeuge die selbe maximale Ladeleistung aufweisen, sind aufgrund der Definition zwischen dem Gleichmäßig Verteilten und dem Gleichmäßig Verteilte Lademanagement-Konzept, keine unterschiedlichen Auswirkungen zu erwarten. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten wird im nächsten Schritt genauer untersucht. Somit werden nun die Ergebnisse der individuellen Ladezeiten beim Sequenziellen, Gleichmäßig Verteiltem und SoC-Anhängigen Konzept analysiert. Die fünf Fahrzeuge kommen jeweils um eine Stunde versetzt an den Ladestationen an. Die Simulationen sind auf einen Tag begrenzt.

Tabelle 4.7: Zusammenfassung der Parameter für identische Fahrzeuge

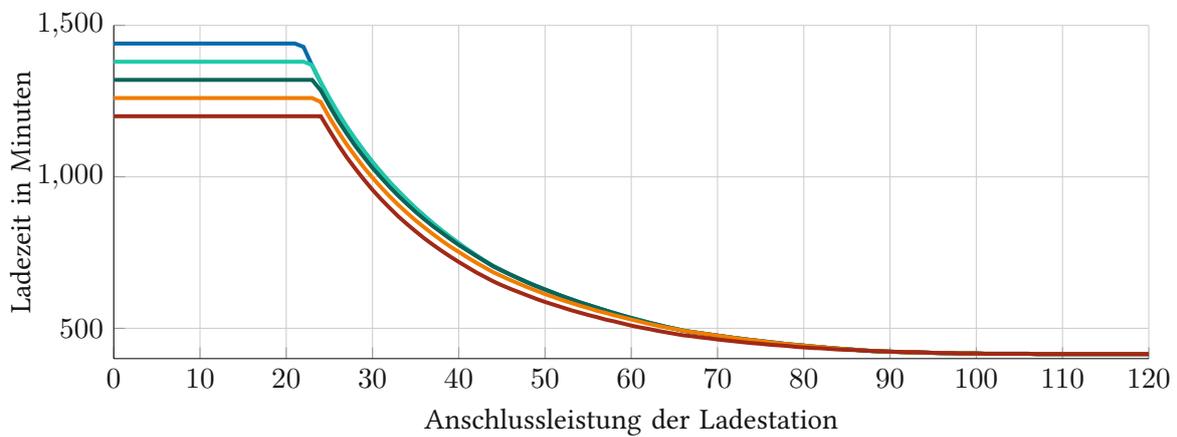
Kenngröße	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Einheit
	1	2	3	4	5	
Maximale Ladeleistung	22	22	22	22	22	kW
Kapazität	100	100	100	100	100	kWh
Start Ladezustand	0	0	0	0	0	%
Ankunftszeit	0	60	120	180	240	Minute

Die Auswirkungen auf die Ladezeit der Fahrzeuge ist in der Abbildung 4.8 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Ladezeit bei allen Fahrzeugen und Konzepten bei kleinen Anschlussleistungen begrenzt ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Fahrzeuge nicht bis zum Ende des Simulationstages vollständig geladen wurden. Ab einer Anschlussleistung der Ladestation von 25 kW können alle Fahrzeuge während des Tages vollständig geladen werden.

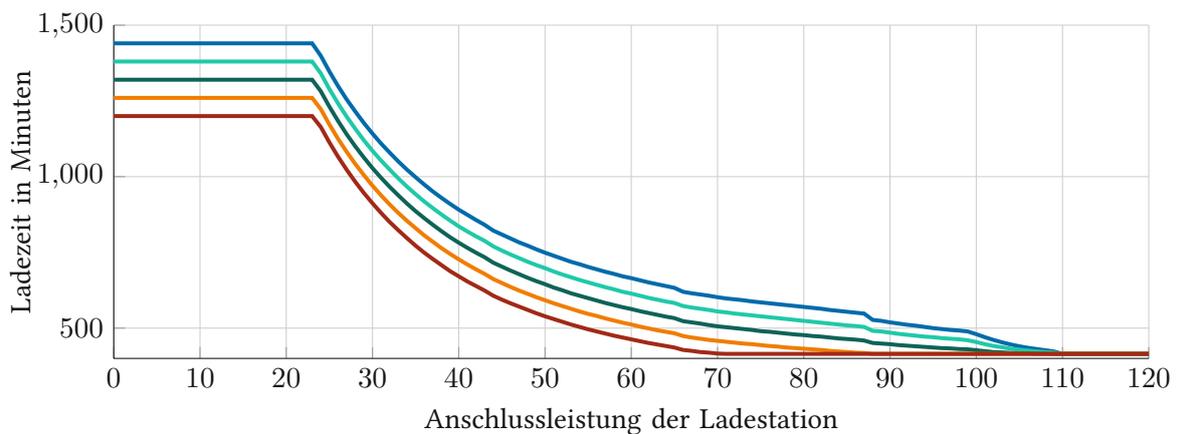
Generell ist zu beobachten, dass eine höhere Anschlussleistung der Ladestationen die Ladezeiten der Fahrzeuge minimiert. Bei allen Konzepten fällt die Ladezeit auf ein Minimum von 416 Minuten. Diese relativ hohen Ladezeiten sind auf die Vollandung der Fahrzeuge zurückzuführen, wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Ab dem Umschaltzeitpunkt beim Ladezustand von 80 % beginnt die U-Phase, bei der die Ladeleistung exponentiell abfällt und somit hohe Ladezeiten mit sich bringt.



(a) Ladezeit der fünf Fahrzeuge beim Sequenziellen Konzept



(b) Ladezeit der fünf Fahrzeuge beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



(c) Ladezeit der fünf Fahrzeuge beim SoC-Abhängigen Konzept

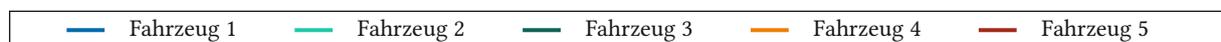


Abbildung 4.8: Ladezeit der Fahrzeuge bei unterschiedlichen Konzepten

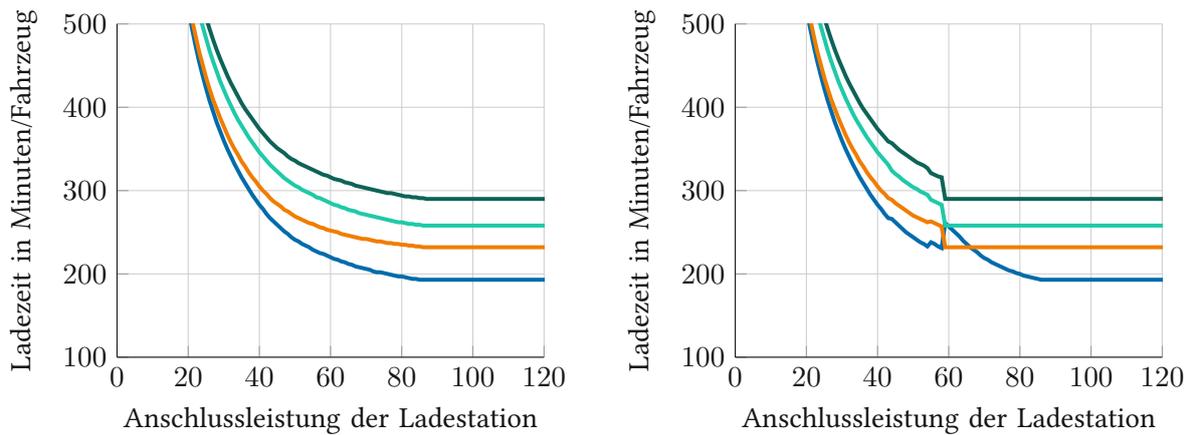
Beim Sequenziellen Konzept 4.8(a) ist zu erkennen, dass die ersten ankommenden Fahrzeuge bevorzugt werden und somit dieses schon bei geringeren Anschlussleistungen voll geladen werden kann. Das letzte ankommende Fahrzeug hingegen weist die längsten Ladezeiten auf. Beim SoC-Abhängigen Lademanagement-Konzept hingegen weist das erste ankommende Fahrzeug die höchste und das letzte ankommende Fahrzeug die kürzeste Ladedauer auf. Somit haben auch die bereits an der Ladestation ladenden Fahrzeuge einen Einfluss auf die Ladezeit des Fahrzeugs.

Kommen nun hingegen im zweiten Schritt Fahrzeuge mit unterschiedlichen Parametern an den Ladestationen an, sind deutliche Unterschiede zwischen dem Gleichmäßig Verteilten und Gleichmäßig Verteilten Lademanagement mit Grenzleistung zu erkennen. Das erste ankommende Fahrzeug wird an einem DC-Ladepunkt mit maximal 50 kW und die weiteren Fahrzeuge bei einem AC-Ladepunkt geladen. Die gewählten Parameter der Fahrzeuge sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Die Grenzleistung ist auf 22 kW fixiert.

Tabelle 4.8: Zusammenfassung der Parameter für unterschiedliche Fahrzeuge

Kenngroße	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4	Einheit
Maximale Ladeleistung	50	22	11	3,7	kW
Kapazität	70	50	30	7,1	kWh
Start Ladezustand	0	0	0	0	%
Ankunftszeit	0	10	20	30	Minute

In Abbildung 4.9 sind im Vergleich zwischen dem Gleichmäßig Verteilten Konzept 4.9(a) und dem Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung 4.9(b) nun deutlich Ladezeitsprünge zu beobachten. Der Grund für die Sprünge liegt in der Grenzleistung. Ab einer Anschlussleistung von 59 kW reicht es aus, die Ladeleistung des ersten ankommenden Fahrzeugs von 50 kW auf 22 kW zu reduzieren, um die restlichen Fahrzeuge mit voller Ladeleistung laden zu können. Bei geringeren Anschlussleistungen ist diese Reduzierung nicht ausreichend, und daher wird wie im Konzept definiert die Anschlussleistung prozentual auf alle Fahrzeuge aufgeteilt. In diesem Fall erhält das erste Fahrzeug einen höheren Anteil und die anderen Fahrzeuge weniger Leistung. Diese Sprünge sind für den Kunden nicht vorhersehbar und nachvollziehbar, weshalb das Gleichmäßig Verteilte Lademanagement-Konzept in diesem Beispiel einen großen Nachteil aufweist.



(a) Ladezeit der fünf Fahrzeuge beim Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzept (b) Ladezeit der fünf Fahrzeuge beim Gleichmäßig Verteilten Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung



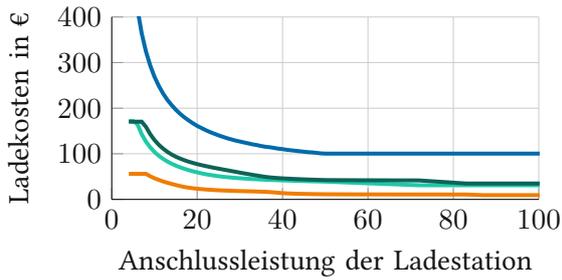
Abbildung 4.9: Ladezeit beim Gleichmäßig Verteiltem und Gleichmäßig Verteiltem Lademanagement-Konzept mit Grenzleistung

Ladekosten

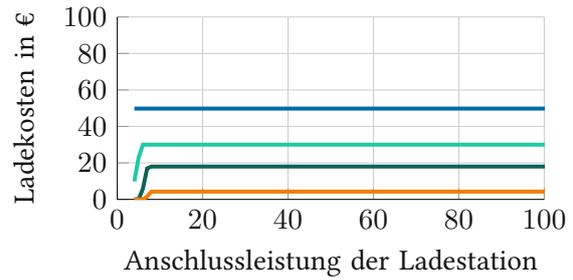
In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Konzepte auf die Ladekosten der einzelnen Fahrzeuge untersucht. Dabei werden insbesondere die Ergebnisse unterschiedlicher Preismodelle als Eingangsparameter betrachtet. Wie im Abschnitt 4.1.3 beschrieben, hängen die Ladekosten je nach Ladetarif von der benötigten Energie, der Ladezeit oder einer Kombination aus beiden ab. Um den Einfluss unterschiedlicher Preismodelle zu analysieren und zu vergleichen, werden den Simulationen, wie in der vorherigen Untersuchung, die Fahrzeuge direkt zugewiesen. Dafür werden die Fahrzeuge, wie in Tabelle 4.8 definiert verwendet.

Zu Beginn werden zwei unterschiedliche Ladetarife aus Abschnitt 4.1.3 untersucht. Als Beispiel dient einerseits der zeitbasierte ÖAMTC ePower Tarif [43] und andererseits der energiebasierte StromMOBIL EASY POWER Tarif von Linz AG [42]. Für die restlichen Eingangsparameter wurden die gleichen Werte wie in der vorherigen Simulation verwendet.

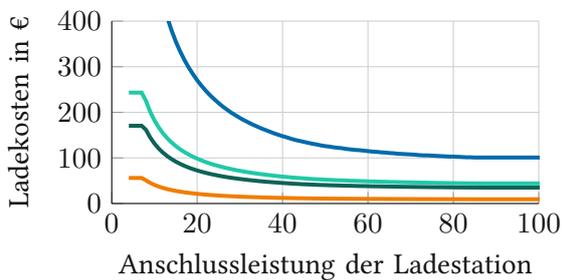
Beim Vergleich der Kosten für die Ladung der Fahrzeuge zwischen zeitbasierten und energiebasierten Tarifen lassen sich die gerade besprochenen Effekte erneut erkennen. Die Ergebnisse des zeitbasierten Tarifs in Abbildung 4.10 zeigen im Allgemeinen sinkende Kosten mit steigenden Anschlussleistungen. Die erkennbaren Preisspitzen sind auf die vorhin beschriebenen Sprünge in den Ladezeiten zurückzuführen. Beim energiebasierten Tarif hingegen hängen die Kosten ausschließlich von der benötigten



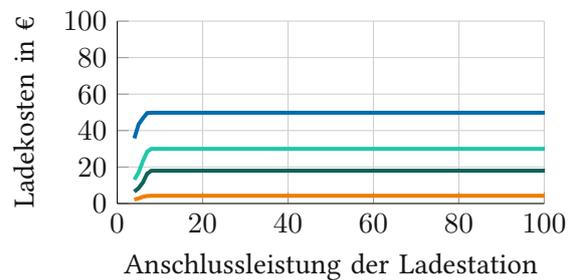
(a) Ladekosten des zeitbasierten Tarifs beim Sequenziellen Konzept



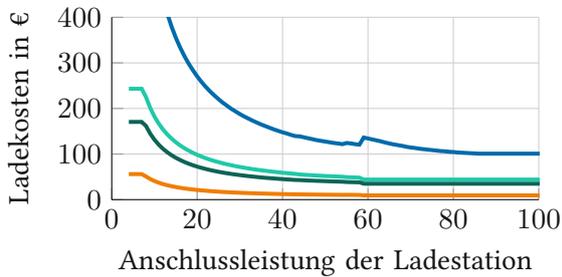
(b) Ladekosten des energiebasierten Tarifs beim Sequenziellen Konzept



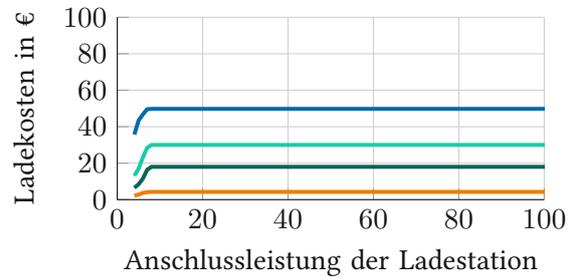
(c) Ladekosten des zeitbasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



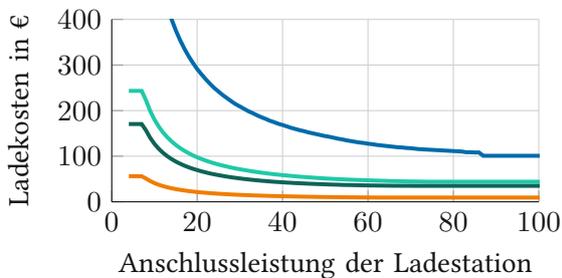
(d) Ladekosten des energiebasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



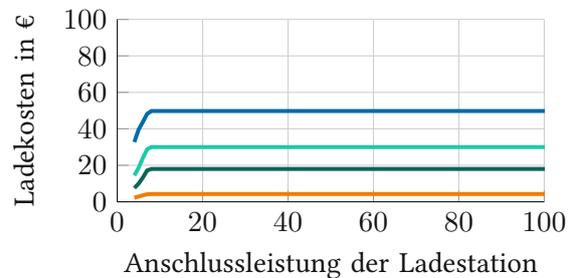
(e) Ladekosten des zeitbasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung



(f) Ladekosten des energiebasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung



(g) Ladekosten des zeitbasierten Tarifs beim SoC-Abhängigen Konzept



(h) Ladekosten des energiebasierten Tarifs beim SoC-Abhängigen Konzept



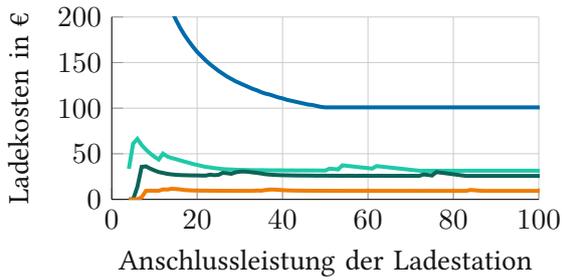
Abbildung 4.10: Ladekosten des zeitbasierten und energiebasierten Tarifs bei unterschiedlichen Konzepten

Energie ab und bleiben daher unabhängig von der Anschlussleistung konstant. Eine Ausnahme tritt jedoch bei geringen Anschlussleistungen auf, die aufgrund der begrenzten Ladezeit und der Simulationsdauer auftreten. Wenn der energiebasierte Tarif ÖAMTC ePower [43] anstelle des StromMOBIL EASY POWER Tarifs verwendet würde, wären die Kosten nicht mehr unabhängig von der Anschlussleistung. Der Grund dafür liegt in den zusätzlichen Kosten im Preismodell. Zu den Kosten der benötigten Energie muss auch eine Parkgebühr, die ab einer bestimmten Ladezeit anfällt, beglichen werden.

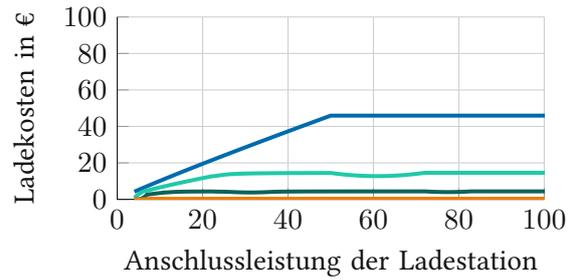
Wie bereits im Abschnitt 4.1.3 erwähnt, sollen in dieser Arbeit auch Preismodelle untersucht werden, bei denen die Kosten nicht von der maximal verfügbaren Leistung des Ladepunkts abhängen, sondern von der tatsächlich bezogenen Leistung des Fahrzeugs. Darüber hinaus soll das definierte lineare Preismodell aus Gleichung (4.1) untersucht und mit den derzeit existierenden Modellen verglichen werden. In den Diagrammen der Abbildung 4.11 sind dafür auf der linken Spalte die Auswirkungen des zeitbasierte ÖAMTC ePower Tarifs unter Verwendung der aktuell benötigten Leistung und auf der rechten Seite die Ladekosten des linearen Preismodells abgebildet.

Im Vergleich zwischen dem zeitbasierten Tarif mit Abhängigkeit des Preises von der maximalen Leistung des Ladepunktes und von der aktuellen benötigten Ladeleistung der Fahrzeuge, können grundsätzlich deutlich geringere Kosten beim angepassten Preismodell erkannt werden. Bei Betrachtung des angepassten zeitbasierten Ladetarifs ist festzustellen, dass in allen vier Konzepten zusätzliche Preisspitzen auftreten. Diese Spitzen treten aufgrund der leistungsabhängigkeit des Preismodells auf. Können Fahrzeuge mit höherer Leistung geladen werden, müssen diese auch ein höheren Tarif zahlen. Sinkt hingegen die Ladeleistung, muss nur noch ein geringerer Tarif gezahlt werden. Die Kostensprünge sind für den Kunden nicht nachvollziehbar und abhängig von den weiteren Fahrzeugen, die an der selben Ladestation laden. Das angepasste Preismodell führt zwar generell zu geringeren Kosten für den Kunden, birgt jedoch den Nachteil der Preisschwankungen.

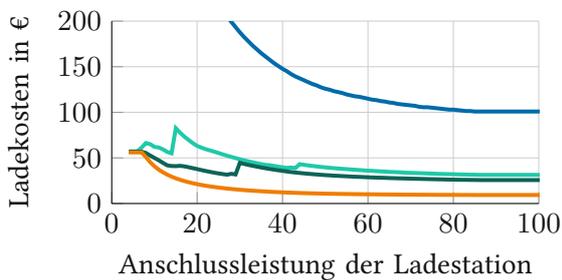
Zudem sind deutliche Unterschiede zwischen den aktuell verfügbaren Preismodellen und dem linear angenommenen Modell zu erkennen. Dabei fällt in allen Konzepten auf, dass die Kosten des Fahrzeugs mit der höchsten maximalen Ladeleistung auch am stärksten mit der Anschlussleistung steigen. Beim Sequenziellen Konzept ist der steilste Anstieg zu beobachten, da dieses Fahrzeug auch als erstes an der Ladestation ankommt und demnach bevorzugt geladen wird. Beim Gleichmäßigen Verteilten und SoC-Abhängigen Konzept können nun auch Sprünge in den Ladekosten erkannt werden. Da das lineare Preismodell von der aktuellen Ladeleistung abhängt, lassen sich die Preissprünge aufgrund der



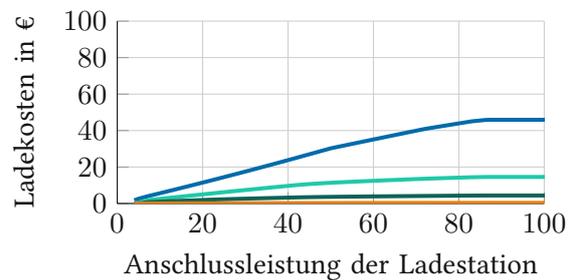
(a) Ladekosten des angepassten zeitbasierten Tarifs beim Sequenziellen Konzept



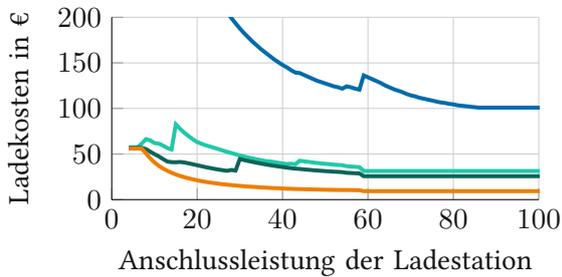
(b) Ladekosten des linearen Tarifs beim Sequenziellen Konzept



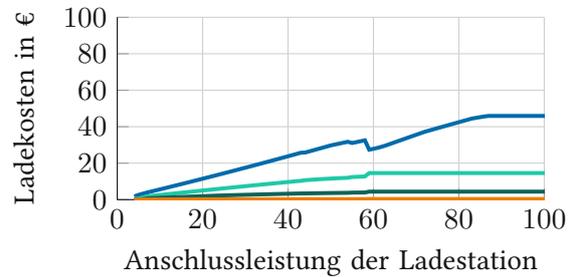
(c) Ladekosten des angepassten zeitbasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



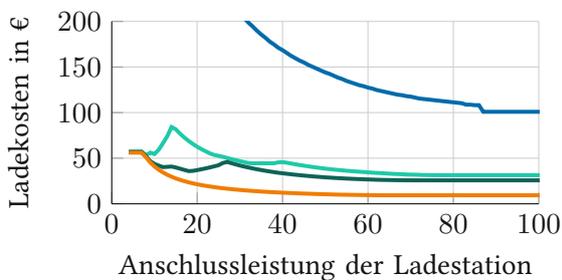
(d) Ladekosten des linearen Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



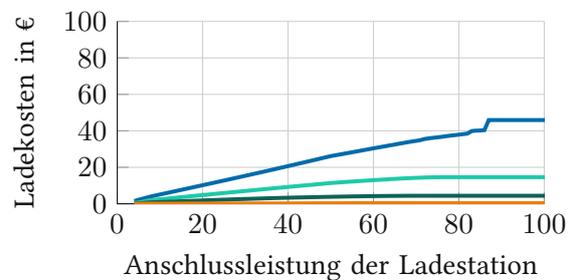
(e) Ladekosten des angepassten zeitbasierten Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung



(f) Ladekosten des linearen Tarifs beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung



(g) Ladekosten des angepassten zeitbasierten Tarifs beim SoC-Abhängigen Konzept



(h) Ladekosten des linearen Tarifs beim SoC-Abhängigen Konzept



Abbildung 4.11: Ladekosten des angepassten zeitbasierten und linearen Tarifs bei unterschiedlichen Konzepten

Leistungsanpassungen durch die Konzeptalgorithmen beobachten. Wie zuvor beschrieben, reicht beim Gleichmäßig Verteilten Konzept ab einer Anschlussleistung von 59 kW die Reduzierung der Leistung des ersten Fahrzeugs aus. Beim SoC-abhängigen Konzept können alle angeschlossenen Fahrzeuge ab 87 kW mit ihrer jeweiligen maximalen Ladeleistung laden, das den Sprung in den Kosten verursacht.

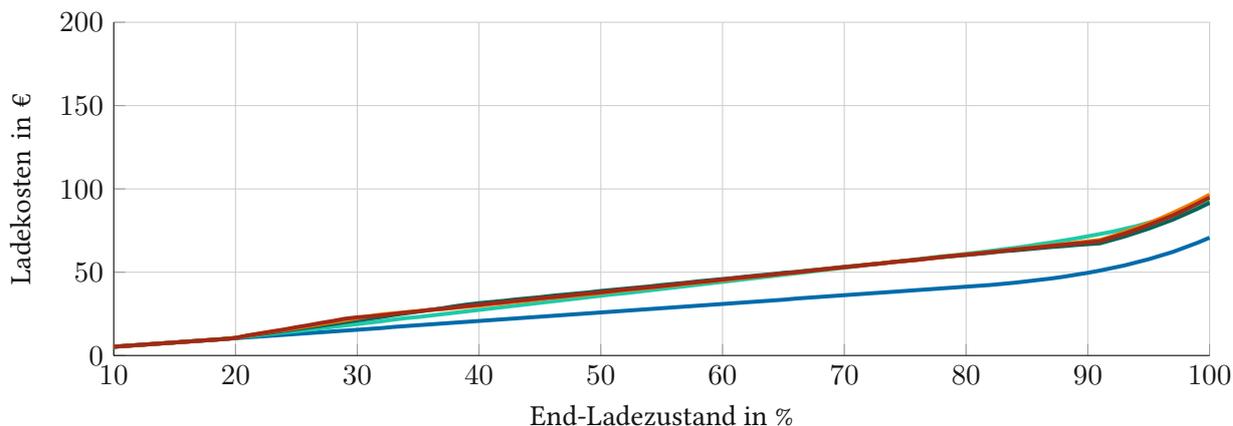
Am Ende dieses Abschnitts sollen auch die Auswirkungen verschiedener End-Ladezustände der Fahrzeuge auf die Ladekosten untersucht werden. Hierfür wurde die Anschlussleistung der Ladestation auf 30 kW festgelegt, während der End-Ladezustand der Fahrzeuge variiert wurde. Dabei erhielt jedes Fahrzeug dieselben Parameter, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können. Tabelle 4.9 fasst die Fahrzeugparameter zusammen.

Tabelle 4.9: Parameter der Fahrzeuge für die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher End-Ladezustände

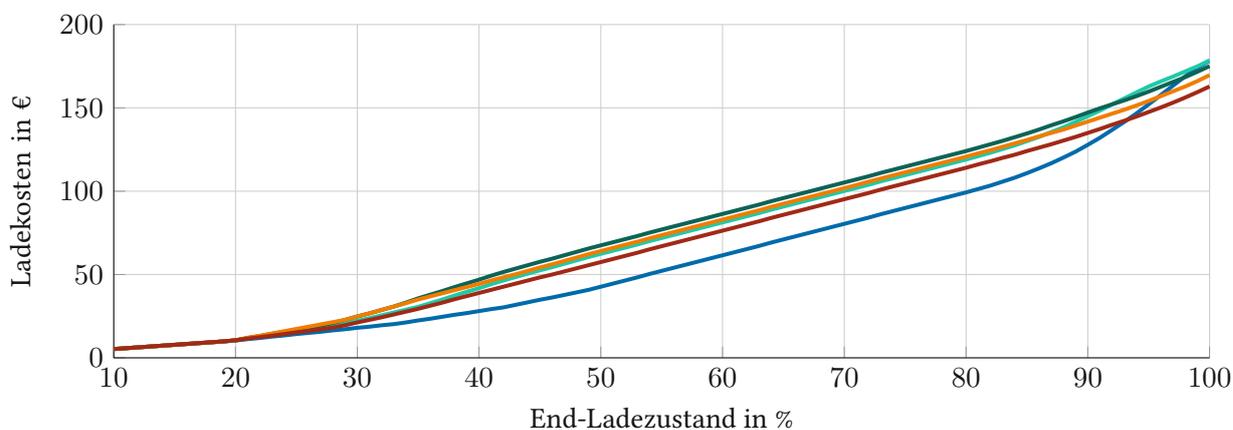
Kenngröße	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Einheit
	1	2	3	4	5	
Maximale Ladeleistung	22	22	22	22	22	kW
Kapazität	100	100	100	100	100	kWh
Start Ladezustand	0	0	0	0	0	%
Ankunftszeit	0	60	120	180	240	Minute

Würde ein rein energiebasierten Tarif betrachtet werden, wären die Kosten aller Fahrzeuge gleich. Um aber die Auswirkungen der häufig angewendeten zeitbasierten Ladetarife zu untersuchen, wird der zeitbasierte ÖAMTC ePower Tarif [43] als Beispiel für das Preismodell verwendet. Die Abbildung 4.12 zeigt im Diagramm 4.12(a) die Ladekosten in Euro beim Sequenziellen Lademanagement-Konzept, das 4.12(b) beim Gleichmäßig Verteilten Laden und 4.12(c) beim SoC-Abhängigen Konzept.

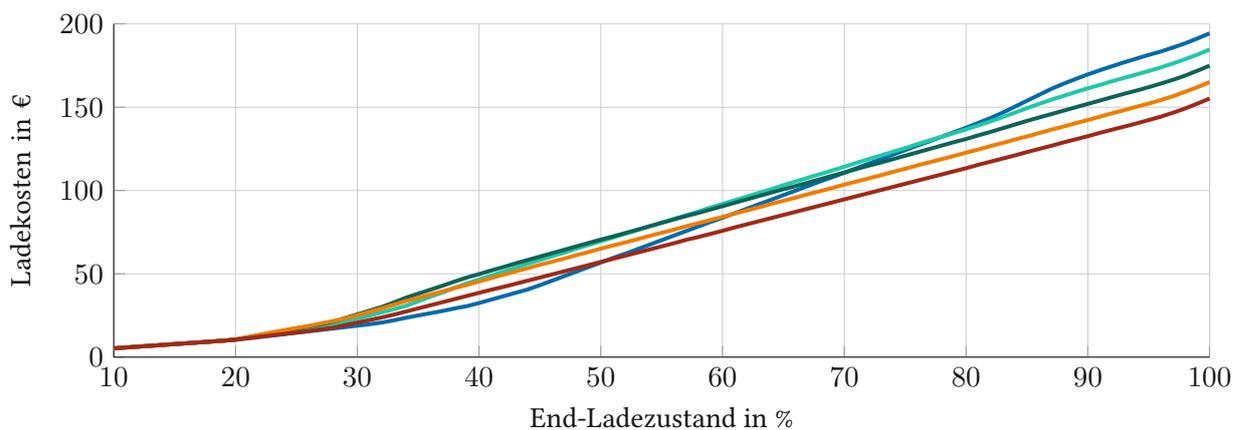
Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Fahrzeuge unterschiedliche Preise zahlen müssen, obwohl sie alle jeweils dieselbe Energie laden. Beim Sequenziellen und Gleichmäßig Verteiltem Laden fällt auf, dass das erste Fahrzeug meistens die geringsten Kosten hat. Beim SoC-Abhängigen Laden hingegen hat das letzte ankommende Fahrzeug die geringsten Kosten. Wie aus den vorherigen Ergebnissen 4.8(c) sichtbar, weist dieses Fahrzeug auch die geringste Ladedauer im Verhältnis zu den Andern auf, das die geringen Kosten begründet. Beim SoC-Abhängigen Konzept ist auch die Differenz der Kosten zwischen den Fahrzeugen bei der Vollladung am größten. Beim Sequenziellen Konzept 4.12 ist ein deutlicher Knickpunkt bei einem End-Ladezustand von 90 % zu erkennen. In diesem Beispiel wäre es also für Fahrzeugnutzer im Verhältnis günstiger nur bis 90 % zu laden.



(a) Ladekosten in Abhängigkeit des End-Ladezustandes beim Sequentiellen Konzept



(b) Ladekosten in Abhängigkeit des End-Ladezustandes beim Gleichmäßig Verteilten Konzept



(c) Ladekosten in Abhängigkeit des End-Ladezustandes beim SoC-Abhängigen Konzept



Abbildung 4.12: Ladekosten bei unterschiedlichen Konzepten in Abhängigkeit vom End-Ladezustand der Fahrzeuge

Diskussion

Die Untersuchungen aus Sicht des Kunden haben deutliche Unterschiede in Bezug auf die Ladezeit zwischen den verschiedenen Konzepten aufgezeigt. Beispielsweise wurden die langen Ladedauern bei später ankommenden Fahrzeugen beim Sequenziellen Lademanagement-Konzept sowie die Ladezeitsprünge beim Gleichmäßig Verteilten Konzept mit Grenzleistung beobachtet.

In Bezug auf die Ladekosten wurden deutliche Unterschiede aufgrund zeitbasierter und energiebasierter Preismodelle festgestellt. Beim energiebasierten Tarif sind die Kosten für die Kunden unabhängig von der Anschlussleistung und dem angewendeten Konzept, während sie beim angepassten zeitbasierten Tarif stark schwanken und von den Fahrzeugen abhängen, die bereits an der Ladestation laden. Diese Unsicherheit der Kosten ist für den Kunden nicht nachvollziehbar und kann zu einem möglichen Akzeptanzverlust führen. Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher End-Ladezustände hat zudem große Unterschiede zwischen den Konzepten verdeutlicht. Je nach End-Ladezustand steigen insbesondere beim Sequenziellen Konzept die Kosten deutlich stärker an, wobei das erste ankommende Fahrzeug die geringsten Kosten aufweist. Beim SoC-Abhängigen Lademanagement-Konzept hingegen hat das letzte ankommende Fahrzeug die geringsten Kosten. Somit haben diese Simulationen gezeigt, dass auch die Reihenfolge der Fahrzeuge von Bedeutung ist und es für den Kunden unter der aktuellen Informationslage äußerst schwierig ist, die Kosten abzuschätzen.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Standort und Gebietstyp der Ladestation einen geringen Einfluss bei den verschiedenen Lademanagement-Konzepten aufzeigt. Die mit dem Ladestandort einhergehende Auslastung hat jedoch eine große Bedeutung für die Ladezeit. Zudem konnte eine starke Abhängigkeit des jeweiligen Lademanagement-Konzept in Bezug auf die Ladezeit festgestellt werden. Für einen Ladestations-Betreiber ist bei der Auswahl des Lademanagement-Konzepts also vor allem die Auslastung des jeweiligen Standorts relevant.

Die Auswirkungen von Lademanagement-Konzepten sind für den Kunden vorrangig durch die variablen Ladezeiten und die unterschiedlichen Ladekosten spürbar. Beim Sequenziellen Lademanagement-Konzept werden die ersten ankommenden Fahrzeuge bevorzugt, weshalb dessen Kosten im generellen geringer sind. Die letzten ankommenden Fahrzeuge hingegen müssen bei niedrigen Anschlussleistungen sehr lange auf die Vollladung warten, was bei zeitbasierten Tarifen zu vergleichsweise hohen Kosten führt. Das Gleichmäßige Verteilte Konzept hingegen zeichnet sich durch gerechte Ladezeit zwischen den Fahrzeugen aus, wohingegen das Gleichmäßige Verteilte Laden mit Grenzleistung zusätzliche Sprünge in den Kosten verursacht, die für den Kunden nicht nachzuvollziehen sind. Das SoC-Abhängige Konzept zeigt die höchsten durchschnittlichen Ladezeiten auf und bevorzugt die letzten ankommenden Fahrzeuge, das zu geringeren Preisen dieser Fahrzeuge führt. Daher spielt vor allem bei zeitbasierten Tarifen, aber auch bei energiebasierten Tarifen mit Parkgebühr die Reihenfolge, die Kapazität und maximale Ladeleistung der Fahrzeuge, die bereits an der Ladestation laden, eine große Rolle.

Diese neue Unsicherheit bei der Ladung der Elektrofahrzeuge stellt wohl eine der größten Unterschiede zum Betanken eines konventionellen Fahrzeuges dar. Damit Lademanagement-Konzepte tatsächlich in der Elektromobilität angewendet wird, müssen die Kunden über die Auswirkungen aufgeklärt werden.

Gleichzeitig müssen faire und verständliche Preismodelle entwickelt werden, welche den Kunden dazu ermutigen auf ein Elektrofahrzeug umzusteigen und damit der Klimaerwärmung entgegenzuwirken.

Eine Umstellung auf elektrischbetriebene Fahrzeuge ist aus ökologischer Sicht jedoch nur dann sinnvoll, wenn der dafür genutzte Strom aus erneuerbaren Quellen stammt. Bei der Umstellung auf nachhaltigere Stromquellen wächst der Bedarf an flexiblen Lasten, welche die Ladung von Fahrzeugen darstellen kann. Diese Arbeit legt nur eine konstante Last zugrunde. Es wäre daher in einer weiteren Arbeit interessant zu betrachten, wie Lademanagement-Konzepte genutzt werden können, um den Strombedarf an die aktuelle Erzeugung anzupassen.

Auch wenn in Zukunft die gesamte Energie für den Betrieb von Elektroautos aus erneuerbaren Energiequellen stammt, muss es zu einem größeren Umdenken im Bereich der Mobilität kommen. Die Herstellung eines Elektrofahrzeuges erzeugt je nach Fahrzeug und Batterietyp knapp doppelt so viel Treibhausgasemissionen wie die eines herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor. Ein Großteil des Energiebedarfs während der Produktion geht dabei auf die Herstellung der Batterie zurück. Folglich ist es besonders wichtig, dass an Zweitnutzungsmodellen für Batterien geforscht wird [48]. Insbesondere im ländlichen Bereich wird die Mobilität auch in Zukunft stark von PKWs abhängig sein. Um diese möglichst nachhaltig zu gestalten, sind durchdachte Lademanagement-Konzepte notwendig. Sie bieten sowohl dem Nutzer als auch für den Ladestations-Betreiber große Chancen.

Diesbezüglich soll noch auf ein aktuelles Projekt hingewiesen werden, das im Rahmen der Mission Innovation Austria Week 2023 in Stegersbach [49] vorgestellt wurde. Das AC/DC-Projekt ermöglicht ein vollautomatisiertes Laden von Elektrofahrzeugen mittels Laderoboter. Die erste Pilotanlage wurde bereits auf dem Gelände der Energie Graz erfolgreich in Betrieb genommen. Durch das autonome Laden kann insbesondere bei Flotten von Elektrofahrzeugen in Kombination mit optimiertem Lademanagement die Verfügbarkeit der Fahrzeuge deutlich erhöht werden [50].

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während des Studiums und beim Schreiben dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Daniel Hauer, sowie meinen weiteren Betreuern Dipl.-Ing. Stefan Wilker und Professor Dr.techn. Thilo Sauter. Sie haben mich während der gesamten Arbeit fachlich kompetent betreut und mit Ratschlägen und Anregungen unterstützt. Auch meinen Uni-Kollegen und Freunden danke ich für ihre Unterstützung. Die vielen Gespräche und Diskussionen haben mich motiviert, auch in schwierigen Phasen durchzuhalten.

Für die zusätzliche Korrektur möchte ich mich ganz herzlich bei Tobias und meiner Freundin bedanken. Durch Leas aufmunternden Worte und ihr gutes Essen konnte ich immer wieder Kraft tanken.

Danken möchte ich auch meiner Familie die mich während meines gesamten Studiums immer unterstützt und ermutigt hat. Ohne ihre Geduld wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Literaturverzeichnis

- [1] U. Herrmann, *Das Ende des Kapitalismus. Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind - und wie wir in Zukunft leben werden*, 3rd ed. Köln: Kiepenheuer & Witsch GmbH, 2022.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Climate change 2023: Synthesis report,” IPCC, Geneva, Switzerland, Tech. Rep., 2023.
- [3] BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2021) Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich. Verfügbar unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/mobilitaetsmasterplan/mmp2030.html>. Letzter Zugriff: 10.02.2023.
- [4] ——. (2022) Sofortprogramm: Erneuerbare Energie in der Mobilität. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/alternative_verkehrskonzepte/elektromobilitaet/publikationen/sofortprogramm.html. Letzter Zugriff: 11.02.2023.
- [5] Statistik Austria - Bundesanstalt Statistik Österreich. (2023) Anzahl der Pkw-Neuzulassungen in Österreich nach alternativen Antrieben von 2017 bis 2022. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/603541/umfrage/pkw-neuzulassungen-in-oesterreich-nach-alternativen-antrieben/>. Letzter Zugriff: 19.03.2023.
- [6] Bundesverband Elektromobilität Österreich (BEÖ). (2023) Bestand E-Autos (BEV) in Österreich. Verfügbar unter: <https://www.beoe.at/bestand/>. Letzter Zugriff: 19.03.2023.
- [7] J. Stadler, “Elektromobilität aus der Sicht der Verteilernetzbetreiber,” *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 136, no. 1, pp. 83–85, Feb 2019.
- [8] M. Sterner and I. Stadler, *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2017.
- [9] A. Moser, “Analyse und Vergleich ausgesuchter Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge,” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2011.

- [10] D. Schedler, *Kontaktlose Energieübertragung : neue Technologie für mobile Systeme*, ser. Die Bibliothek der Technik. München: Verl. Moderne Industrie, 2009.
- [11] Nationale Plattform Elektromobilität, “Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020,” Verfügbar unter: www.nationale-plattform-elektromobilitaet.de, 2017, Letzter Zugriff: 10.02.2023.
- [12] M. Doppelbauer, “Ladesysteme,” in *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, pp. 291–307.
- [13] M. Linnemann and C. Nagel, *Elektromobilität und die Rolle der Energiewirtschaft : Rechte und Pflichten eines Ladesäulenbetreibers*, 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Vieweg, 2020.
- [14] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Frankfurt: Springer Berlin / Heidelberg, 2013.
- [15] A. Bauer, “Energiespeicher und deren Alterung am Beispiel von Lithium Ionen Akkumulatoren,” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2010.
- [16] M. Zoglauer, G. Nischler, C. Gutschi, W. Süßenbacher, and H. Stigler, “Auswirkungen zukünftiger Elektromobilität auf die österreichische Elektrizitätswirtschaft,” *Oesterreichs Energie*, 2010.
- [17] D. Lüke and M. Oetken, “Lithium-Schwefel-Batterien – Hoffnung und Herausforderung zum Gelingen der Mobilitätswende,” *Chemkon*, vol. 29, no. 8, pp. 234–239, 2022.
- [18] Schurter, “Elektronikpraxis,” *ElektronikPraxis*, no. 3, pp. 26–29, 2018.
- [19] R. Uhlig, “Nutzung der Ladeflexibilität zur optimalen Systemintegration von Elektrofahrzeugen,” Dissertation, Bergischen Universität Wuppertal, Wuppertal, 2017.
- [20] S. Schaal. (2021) E.On und GridX entwickeln Lastmanagement mit künstlicher Intelligenz. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2021/05/11/e-on-und-gridx-entwickeln-lastmanagement-mit-kuenstlicher-intelligenz/>. Letzter Zugriff: 13.03.2023.
- [21] Y. Zhao, X. He, Y. Yao, and J. Huang, “Plug-in electric vehicle charging management via a distributed neurodynamic algorithm,” *Applied Soft Computing*, vol. 80, pp. 557–566, 2019.
- [22] S. S. Ravi and M. Aziz, “Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives,” *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 589, 2022.
- [23] A. Bolzer, “Auswirkungen von elektrischer mobilität im verteilnetz,” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009.

- [24] MathWorks Inc. (2023) Simulink - gemacht für Model-Based Design. Verfügbar unter: <https://ch.mathworks.com/de/products/simulink.html>. Letzter Zugriff: 19.03.2023.
- [25] R. Mosshammer, K. Diwold, A. Einfalt, J. Schwarz, and B. Zehrfeldt, *BIFROST: A Smart City Planning and Simulation Tool*. Cham: Springer International Publishing, 02 2019, pp. 217–222.
- [26] Siemens AG Österreich. (2023) Narrative simulation for Smart Energy scenarios. Verfügbar unter: <https://bifrost.siemens.com/en>. Letzter Zugriff: 11.03.2023.
- [27] D. Hauer, F. Zeilinger, R. Mosshammer, T. Leopold, and S. Wilker, *Conference Proceedings Com-ForEn 2021, 11. Symposium Communicaions for Energy Systems*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 11 2021, pp. 123–129.
- [28] D. Fasthuber, “Auswirkungen und Potentiale der Integration von Elektromobilität in das elektrische Energiesystem Österreichs,” Dissertation, Technische Universität Wien, 2019.
- [29] Sony Corporation, “Lithium Ion Rechargeable Batteries Technical Handbook,” Verfügbar unter: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Prototyping/Lithium%20Ion%20Battery%20MSDS.pdf>, Letzter Zugriff: 11.03.2023.
- [30] A. Schuster, “Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen,” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2008.
- [31] NOW GmbH - Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur. (2021) Auslastung der Ladepunkte für Elektroautos in Deutschland pro Tag nach Ladegeschwindigkeit im Jahr 2021. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1265552/umfrage/auslastung-der-ladepunkte-fuer-elektroautos-in-deutschland-nach-ladegeschwindigkeit/?locale=de>. Letzter Zugriff: 29.03.2023.
- [32] Ecma International, “ECMA-262: ECMAScript Language Specification,” <https://www.ecma-international.org/ecma-262/>, 2020, letzter Zugriff: 13.03.2023.
- [33] N. Ferguson, B. Schneier, and T. Kohno, “Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications,” in *Cryptography Engineering*. United States: Wiley, 2012.
- [34] S. K. Detzler, *Lademanagement für Elektrofahrzeuge*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2017.
- [35] L. Sun, Y. Chen, W. Li, and Q. Deng, “Charging stations-oriented electric vehicle charging strategy based on battery characteristics,” *Software: Practice and Experience*, vol. 51, no. 11, pp. 2168–2184, 2021.

- [36] M. Nour, S. M. Said, A. Ali, and C. Farkas, "Smart Charging of Electric Vehicles According to Electricity Price," in *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, 2019, pp. 432–437.
- [37] D. Heinz, "Erstellung und Auswertung repräsentativer Mobilitäts- und Ladeprofile für Elektrofahrzeuge in Deutschland," Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Tech. Rep., 2018.
- [38] M. Litzlbauer, "Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher mit MATLAB," Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009.
- [39] T. Wieland, M. Reiter, E. Schmutzner, L. Fickert, J. Fabian, and R. Schmied, "Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos anhand gemessener Daten elektrischer Ladestationen – Auslastungsanalysen von Ladestationen unter Berücksichtigung des Standorts zur Planung von elektrischen Stromnetzen," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, no. 3, pp. 160–167, 2015.
- [40] BMW AG. (2023) Technische Daten des BMW i4. Verfügbar unter: <https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i4/2021/bmw-i4-technische-daten.html#tab-2-0>. Letzter Zugriff: 15.03.2023.
- [41] O. Schulze, "Ladestrompreise, Ladestromvertrag, App und Services," in *Elektromobilität - ein Ratgeber Für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer*. Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022, pp. 231–250.
- [42] LINZ AG Strom. (2023) Ladetarife für unterwegs mit Ihrer LINZ-AG-Ladekarte. Verfügbar unter: https://www.linzag.at/media/dokumente/e_mobilitaet_1/agb_tarife/ladetarife.pdf. Letzter Zugriff: 16.03.2023.
- [43] ÖAMTC. (2023) ÖAMTC ePower Ladetarife. Verfügbar unter: <https://www.oeamtc.at/oeamtc-epower/>. Letzter Zugriff: 16.03.2023.
- [44] BRUSA HyPower AG. (2023) Nlg664. Verfügbar unter: <https://www.brusahypower.com/portfolio/nlg664/>. Letzter Zugriff: 17.03.2023.
- [45] innoelectric AG. innoelectric On-Board Charger. Verfügbar unter: <https://innoelectric.ag/on-board-charger-2-2/>. Letzter Zugriff: 17.03.2023.
- [46] B. Thormann, "Auswirkungen der Elektromobilität auf die Niederspannungsebene," Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2017.

- [47] AustriaTech, "Elektromobilität in Österreich," Verfügbar unter: https://www.austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/969df21d1a/ZahlenDatenFakten_2021_12_D.pdf, Wien, 2021, Letzter Zugriff: 20.04.2023.
- [48] T. Axel and W. Martin. (2020) Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Verfügbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>. Karlsruhe.
- [49] "Mission Innovation Austria Week 2023," Verfügbar unter: <https://mission-innovation-austria-week-2023.b2match.io>, Letzter Zugriff: 23.06.2023.
- [50] A. Mandler. (2023) Energie Graz: Projekt „AC/DC“ ermöglicht vollautomatisiertes Laden von E-Autos. Verfügbar unter: <https://www.5min.at/202306671291/energie-graz-projekt-ac-dc-ermoeslicht-vollautomatisiertes-laden-von-e-autos/>. Letzter Zugriff: 23.06.2023.