

Fakultät Elektro- und Informationstechnik  
**Master-Studiengang Elektro- und Informationstechnik**  
**Fachrichtung Automatisierungstechnik**

## **Masterarbeit**

**Entwurf und Programmierung einer Anwendung zur Berechnung und  
Visualisierung ökonomischer Vorteile bei der Verwendung  
einer Ladeoptimierung in gewerblichen  
E-Mobility-Applikationen**

von

**Raphael Stöckinger**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Coenen  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Merz

Unternehmen: InnoCharge GmbH  
Betreuer im Unternehmen: Dr.-Ing. Manuel Lösch

Zeitraum: 01.05.2023 – 31.10.2023



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterarbeit ohne unzulässige fremde Hilfe selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet zu haben.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Master- Thesis unterstützt haben.

Mein Dank gilt besonders:

- Prof. Dr.-Ing. Sebastian Coenen sowie Prof. Dr.-Ing. Rainer Merz für den konstruktiven Austausch und die Betreuung.
- Betreuer Dr.-Ing. Manuel Lösch für die enge Zusammenarbeit, den stetigen Austausch und die richtungsweisenden Gespräche sowie den konstruktiven Austausch zur Planung und Erstellung dieser Arbeit.
- Allen Projektbeteiligten des Forschungsprojektes Smart East Karlsruhe für die verwendete Datengrundlage.
- Den Betreuern, meinen Eltern sowie Zoe Kammerdiener für die sorgfältige Korrektur und die vielen konstruktiven Anregungen.
- Meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für die dauerhafte Unterstützung im Laufe meines Studiums.

# Vorwort

Die vorgestellte Abschlussarbeit ist in Kooperation mit der Firma InnoCharge GmbH entstanden. Das Programm zu Ladeoptimierung, mit dem die Erkenntnisse in dieser Arbeit errechnet wurden, wurde von der Firma InnoCharge zur Verfügung gestellt.

Die Arbeit behandelt die Erstellung eines Simulationsprogrammes, mit dem die Kosteneinsparungen in gewerblichen Liegenschaften durch Verwendung einer Ladeoptimierung simuliert werden. Hierbei werden die Energieflüsse in einer Liegenschaft und verschiedene weitere Einflussfaktoren in einer Liegenschaft berücksichtigt.

# Kurzfassung

In der Arbeit werden die wirtschaftlichen Vorteile der Verwendung von Ladeoptimierungen in Kombination mit dynamischen Strompreisen in der E-Mobilität untersucht. Zu diesem Zweck wird ein objektorientiertes Analyseprogramm entwickelt, welches die Einflussfaktoren in einer gewerblichen Liegenschaft simuliert und die Ergebnisse des ungesteuerten und wirtschaftlich gesteuerten Ladens miteinander vergleicht. Durch diesen Vergleich lassen sich Einsparungen in den Gesamtkosten, sowie die relevanten Einflussfaktoren mit einer hohen ökonomischen Bedeutung, herausarbeiten.

Durch den Vergleich zweier Referenzszenarien, welche sich an zwei gewerblichen Liegenschaften im Karlsruher Osten orientieren, konnte hierbei festgestellt werden, dass eine wirtschaftlich gesteuerte Ladeoptimierung 25-35% der Gesamtkosten reduzieren kann. Die starken Schwankungen im Optimierungsergebnis treten dabei aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren und deren Interaktionen miteinander auf. Die Gesamtkosten bestehen aus den leistungsbezogenen Netznutzungsentgelten, welche durch Peak Shaving reduziert werden können, und den Energiekosten, welche durch das Nutzen von Tiefpreiszeiträumen und lokal erzeugter PV-Energie reduziert werden.

Es konnte zudem durch die Erkenntnisse dieser Arbeit erwiesen werden, dass durch die wirtschaftlich gesteuerte Ladeoptimierung priorisiert erneuerbare Energie zum Laden von E-Fahrzeugen verwendet wird. Durch die fortschreitende Elektrifizierung des Verkehrssektors und dem Ausbau der erneuerbaren Energien, welcher zukünftig zu stärkeren Schwankungen im Strompreis führt, werden wirtschaftlich gesteuerte Möglichkeiten zum Demand Side Management immer wichtiger. Durch die Erkenntnisse dieser Arbeit kann gezeigt werden, dass Systeme zur intelligenten Ladeoptimierung einen immer wichtigeren Beitrag zum wirtschaftlichen und verlässlichen Betrieb unseres Energiesystems und für eine CO<sub>2</sub>-arme Mobilität der Zukunft liefern können.

# Abstract

In the thesis, the economic advantages of using charging optimization in combination with dynamic electricity prices in e-mobility are investigated. For this purpose, an object-oriented analysis program is developed that simulates the influencing factors in a commercial property and compares the results of uncontrolled and economically controlled charging. Through this comparison, savings in the total costs as well as the relevant influencing factors with a high economic significance can be worked out.

By comparing two reference scenarios, which are based on two commercial properties in the east of Karlsruhe, the conclusion was made that an economically controlled charging optimization can reduce 25 to 35% of the total costs. The strong fluctuations in the optimization result occur due to the different influencing factors and their interactions with each other. The total costs consist of the power-related grid usage fees, which can be reduced by peak shaving, and the energy costs, which are reduced by taking advantage of low-price periods and locally generated PV energy.

It could also be proven by the findings of this work that economically controlled charging optimization prioritizes the use of renewable energy for charging e-vehicles. Due to the ongoing electrification of the transport sector and the expansion of renewable energies, which will lead to bigger fluctuations in the electricity price in the future, economically controlled options for demand-side management are becoming increasingly important. Through the findings of this work, it can be shown that systems for intelligent charging optimization can make an increasingly important contribution to the economic and reliable operation of our energy system and low-CO<sub>2</sub> mobility in the future.

# **INHALTSVERZEICHNIS**

## **GLOSSAR**

---

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

---

<b>1</b>	<b><u>EINLEITUNG</u></b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVATION	2
1.2	AUFGABENSTELLUNG	4
1.2.1	HINTERGRUND	4
1.2.2	AUFGABENSTELLUNG	4
1.2.3	KOOPERATION MIT DER FIRMA INNOCHARGE	6
1.3	FORSCHUNGSFRAGEN	6
<b>2</b>	<b><u>OPTIMIERUNGSPOTENZIALE FÜR FLEXIBLE LADEVORGÄNGE</u></b>	<b>8</b>
2.1	VERWANDTE ARBEITEN	9
2.2	ÜBERSICHT ÜBER VERSCHIEDENE EINFLUSSFAKTOREN	11
2.3	ENERGIEVERBRAUCH DES GEWERBES UND LEISTUNG NETZANSCHLUSSPUNKT	13
2.4	PV-ENERGIEERZEUGUNG	16
2.5	ENERGIEBEDARF VON BEV	16
2.6	STANDZEITEN VON BEV	17
2.7	ANZAHL LADEPUNKTE	17
2.8	PREISSCHWANKUNGEN IM STROMPREIS UND BETRACHTETE JAHRE	18
2.9	PEAK SHAVING	20
<b>3</b>	<b><u>ENTWURF EINES PROGRAMMS ZUR QUANTIFIZIERUNG DER KOSTENERSPARNIS</u></b>	<b>21</b>
3.1	STRUKTUR ZUR GESAMTÜBERSICHT	21
3.1.1	DATENGRUNDLAGE	22
3.1.2	AUFBEREITUNG	23
3.1.3	BERECHNUNG	23
3.1.4	AUSWERTUNG	25
3.2	FUNKTIONSWEISE DES OPTIMIERERS	26

<b>3.3</b>	<b>STRUKTUR DER OPTIMIERTEN BERECHNUNG</b>	<b>26</b>
<b>3.4</b>	<b>KLASSENDIAGRAMM DER OPTIMIERTEN BERECHNUNG</b>	<b>28</b>
3.4.1	BUSINESS	28
3.4.2	ENERGY SOURCE	30
3.4.3	CHARGING POINTS	33
<b>3.5</b>	<b>STRUKTOGRAMM DER NICHT OPTIMIERTEN BERECHNUNG</b>	<b>34</b>
<b>3.6</b>	<b>KLASSENDIAGRAMM DER NICHT OPTIMIERTEN BERECHNUNG</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>DEFINITION VERSCHIEDENER SZENARIEN</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>DATEN DER DATENGRUNDLAGE</b>	<b>38</b>
4.1.1	LADEPUNKTE	38
4.1.2	ENERGIEQUELLEN	41
<b>4.2</b>	<b>REFERENZSZENARIEN</b>	<b>46</b>
4.2.1	IWERKX	47
4.2.2	TECHNOLOGIEFABRIK	47
4.2.3	VERGLEICH DER BEIDEN REFERENZSZENARIEN	49
<b>4.3</b>	<b>EINSTELLUNGEN DER VERÄNDERTEN SZENARIEN</b>	<b>50</b>
4.3.1	UNTERSCHIEDLICHE MAXIMALLEISTUNG NETZANSCHLUSS (PS+, PS-)	50
4.3.2	UNTERSCHIEDE IM ENERGIEVERBRAUCH DES GEWERBES (EBGW+, EBGW-)	51
4.3.3	UNTERSCHIEDE DER PV- PRODUKTION (PV+, PV-)	51
4.3.4	UNTERSCHIEDE IM ENERGIEBEDARF EINES LADEPUNKTES (EBLP+, EBLP-)	52
4.3.5	UNTERSCHIEDE DER ANZAHL DER LADEPUNKTE (ALP+, ALP-)	53
4.3.6	UNTERSCHIEDE IN DEN STANDZEITEN DER BEV (ZLP+, ZLP-)	54
<b>4.4</b>	<b>UNTERSCHIEDLICHE JAHRE IN DER BETRACHTUNG</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>ERGEBNISDISKUSSION UND IDENTIFIKATION RELEVANTER PARAMETER</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>ERGEBNISSE DER REFERENZSZENARIEN</b>	<b>57</b>
5.1.1	REFERENZSZENARIO IWERKX	57
5.1.2	REFERENZSZENARIO TECHNOLOGIEFABRIK	64
5.1.3	GEGENÜBERSTELLUNG BEIDER REFERENZSZENARIEN	73
<b>5.2</b>	<b>GEGENÜBERSTELLUNG DER WEITEREN SZENARIEN</b>	<b>75</b>
5.2.1	SZENARIEN AUSGEHEND VOM REFERENZSZENARIO IWERKX	75
5.2.2	SZENARIEN AUSGEHEND VOM REFERENZSZENARIO TECHNOLOGIEFABRIK	78

5.2.3	INTERPRETATIONEN DER ERKENNTNISSE AUS DEN VERÄNDERTEN SZENARIEN	80
<b>5.3</b>	<b>UNTERSCHIEDLICHE BETRACHTETE JAHRE</b>	<b>81</b>
5.3.1	SZENARIO IWERKX 2019	82
5.3.2	SZENARIO TECHNOLOGIEFABRIK 2019	83
5.3.3	GESAMTVERGLEICH UNTERSCHIEDLICHE BETRACHTETE JAHRE	84
<b>5.4</b>	<b>AUSWIRKUNG AUF NIEDERSPANNUNGSNETZE UND ÖKOLOGISCHER ASPEKTE</b>	<b>86</b>
5.4.1	AUSWIRKUNG AUF NIEDERSPANNUNGSNETZE	86
5.4.2	ÖKOLOGISCHE ASPEKTE	87
<b>5.5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>KONKLUSION</b>	<b>90</b>
6.1	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	90
6.2	AUSBLICK	93
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>95</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>99</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>100</b>



# Glossar

- **Application Programming Interface, kurz API:** Eine API ist eine Schnittstelle, welche über einen „Uniform Resource Locator“ (URL) angesprochen wird. Hierüber wird ein Fernzugriff auf Software- und Hardwarekomponenten umgesetzt. In dieser Arbeit wurden verschiedene APIs zum Abrufen von Daten aus externen Datenbanken und Anwendungen verwendet.
- **Blackbox- Prinzip:** Eine Blackbox ist ein Begriff aus der Systemtheorie. Dies beschreibt Systeme oder Komponenten, von denen nur deren Eingabe- und Ausgabeparameter bekannt sind, ohne dabei die internen Strukturen und Arbeitsweisen zu kennen.
- **Dataframe:** Ein Pandas Dataframe ist eine spezielle Form eines Arrays in Python. Pandas Dataframes besitzen diverse Funktionen die den Umgang mit großen Datensätzen in tabellarischer, zweidimensionaler Form einfacher und schneller machen. Vollständige Dokumentation siehe [1].
- **Demand Side Management:** Demand- Side Management ist das Zu- und Abschalten von elektrischen Verbrauchern, um auf Anreize seitens Stromnetz oder Strommarkt zu reagieren. Dies kann aufgrund von Marktsignalen oder in besonderen Fällen durch den Netzbetreiber geschehen. Wird auch oft als Lastmanagement bezeichnet
- **Interquartilsabstand:** Der Interquartilsabstand gibt an, wie breit das Intervall ist, in dem die mittleren 50% der Elemente liegen [2]. In dieser Arbeit beschreibt der Interquartilsabstand der Strompreise das Intervall, in dem 50% der Strompreise liegen.
- **Lose Kopplung:** Lose Kopplung bedeutet, dass Komponenten in einem Programm nur über wenige Schnittstellen mit anderen Komponenten kommunizieren. Hierdurch können Programmteile einfacher ausgetauscht und neue Versionen von Programmteilen eingefügt werden.
- **Smart Meter:** Smart Meter sind Energiezähler, diese werden verwendet, um den Energieverbrauch zu messen. Die Informationen werden in Echtzeit gesammelt und können über entsprechende Verbindungen ausgelesen werden. Im deutschen Ansatz bestehen sie aus zwei Elementen, einem digitalen Stromzähler (moderne Messeinrichtung) und einem Kommunikationsmodul (Smart Meter Gateway).

- **Stromgestehungskosten:** Sind die Kosten die bei der Umwandlung von einer in eine andere Energieform entstehen, z.B. von Sonneneinstrahlung oder Wind in elektrische Energie

## Abkürzungsverzeichnis

API .....	<i>Application Programming Interface</i>
BDEW .....	<i>Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft</i>
BEV .....	<i>Batterieelektrische Fahrzeuge</i>
BnetzA .....	<i>Bundesnetzagentur</i>
EEG .....	<i>Erneuerbare Energien Gesetz</i>
EPEX.....	<i>European Power Exchange</i>
FZI .....	<i>Forschungszentrum Informatik</i>
KWKG .....	<i>Kraft- Wärme- Kopplungsgesetz</i>
kWp .....	<i>Kilowatt Peak</i>
Pkw.....	<i>Personenkraftwagen</i>
PLZ.....	<i>Postleitzahl</i>
PV .....	<i>Photovoltaik</i>
StromNEV .....	<i>Stromnetzentgeltverordnung</i>

# 1 Einleitung

Mit dem Gesetz zum Neustart der Energiewende vom 22.05.23 [3] hat die Bundesregierung einen schnelleren Rollout von Smart Meter bei Letztverbrauchern beschlossen. Mit den Smart Metern sollen Verbraucherinnen und Verbraucher ab 2025 von dynamischen Preisen an der Strombörse profitieren – Stromlieferanten müssen diese ab dann verpflichtend anbieten [4]. Damit können in Zukunft Unternehmen und Privathaushalte ihren Energieverbrauch hin zu günstigeren Strompreisen verschieben und dadurch ihre Energiekosten reduzieren.

Dynamische Preise existieren aufgrund der stetigen Veränderung des Strompreises an der Strombörse European Power Exchange (EPEX), an der Strom ein Stunden- oder Viertelstundenprodukt ist. Besonders die niedrigeren Stromgestehungskosten der erneuerbaren Energien [5, p. 18] und deren fluktuierende Einspeisung zeichnen sich hier im Tagesverlauf ab. Der Preis ist ein Ergebnis von Angebot und Nachfrage. Mittags ist daher der Preis zu Zeiten von PV-Erzeugung und Nachts ist der Preis aufgrund fehlender Nachfrage daher gering. Besonders bei der Elektromobilität besteht aufgrund der langen Standzeiten und der guten Planbarkeit im Besonderen die Möglichkeit von diesen Schwankungen im Strompreis zu profitieren.

Zusätzlich wächst die Anzahl der Batterieelektrischen Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, kurz BEV) hierzulande stetig an. Die Anzahl der BEVs hat in diesem Jahr die Millionen- Marke geknackt [6] und wird laut Prognosen auf 11,55 Millionen BEVs im Jahr 2030 anwachsen [7]. Der Plan der aktuellen Bundesregierung ist es sogar bis 2030 mindestens 15 Millionen vollelektrische Pkw auf deutschen Straßen zu haben [8] um dem Klimawandel aktiv entgegenzutreten und Deutschland langfristig zu einem CO<sub>2</sub>-neutralen Land werden zu lassen.

Aufgrund dieser aktuellen Entwicklungen und politischen Zielsetzungen lohnt sich eine Betrachtung, wie hoch das Potenzial zur Einsparung von Energiekosten durch Ladeoptimierungen beim Laden von BEVs ist. In dieser Arbeit wird hierzu das Potenzial des Ladens von BEVs beim Arbeitgeber betrachtet. Bei dieser Anwendung hat die Optimierung des Ladeverlaufs ein besonders großes Potenzial. BEV, die am Arbeitsplatz geladen werden, haben eine planbare Ankunfts- und Abfahrtszeit, in diesen zeitlichen Grenzen kann nach dem prognostizierten Energiepreis optimiert werden. Dazu gibt es bei gewerblichen Liegenschaften

meist mehrere Ladepunkte. Hier kann Lastspitzenkappung sehr sinnvoll eingesetzt werden, um leistungsbezogene Netzentgelte zu reduzieren.

Untersucht wird die Möglichkeit der Energiepreisreduktion mithilfe eines hierfür erstellten Analyseprogrammes. Die Konzeption und Programmierung dieses Analyseprogrammes war Teil dieser Arbeit und wird ebenfalls beschrieben. Um eine genauere Einschätzung über die einzelnen Einflussfaktoren und deren Einfluss auf das Potenzial der Optimierung geben zu können, werden ausgehend von Referenzszenarien die Einflussfaktoren variiert und die Ergebnisse gegenübergestellt.

Am Ende dieser Arbeit werden die ökonomischen Anreize einer Kostenoptimierung beim Laden von BEVs beim Arbeitgeber festgestellt, der Einfluss der verschiedenen Einflussfaktoren diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

## **1.1 Motivation**

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, ist es notwendig den Straßenverkehr in Zukunft weg von fossilen Kraftstoffen, hin zu erneuerbaren Energieträgern umzustellen. Im Zuge dieser CO<sub>2</sub>-Reduktion im Verkehrssektor sollen zukünftig Automobile mit fossilem Verbrennungsmotor nach und nach gegen BEVs ausgetauscht werden. Dies wird durch verschiedene Anreize für Privatpersonen und Firmenflotten geschaffen.

Fahrzeuge, welche beim Arbeitgeber geladen werden, haben hierbei eine besondere Möglichkeit, von den in der Einleitung genannten aktuellen Entwicklungen zu profitieren. Diese können daher aufgrund dieser finanziellen Anreize schnell zu einem Treiber der Verkehrswende zu werden.

Es ist davon auszugehen, dass Firmen in Zukunft, aufgrund des beschlossenen Rollouts von Smart Metern [3] und dem einfacheren Zugang zu dynamischen Tarifen, diese immer stärker nutzen werden. Hierdurch haben sie die Möglichkeit ihre Energiekosten reduzieren. Zusätzlich macht es die Firmen für ihre Arbeitnehmer attraktiver, wenn diese die Möglichkeit des Ladens beim Arbeitgeber anbieten. Es ist planbar, wann Arbeitnehmer zur Arbeit kommen und auch wann sie wieder gehen. Viele Firmen besitzen hierzu für ihre Arbeitnehmer Kernarbeitszeiten, in denen diese anwesend sind. Innerhalb dieser Zeitspannen kann der Ladeverlauf optimiert

werden, was den Firmen, oder einem Drittanbieter, der die Ladesäulen verwaltet, einen ökonomischen Vorteil schafft.

Die sich im operativen Einsatz befindende Softwarelösung der Firma InnoCharge wurde speziell für diesen Ausbau der Ladeinfrastruktur beim Arbeitgeber geschaffen. Die Ladeoptimierung ist Teil der Gesamtlösung und wurde in dieser Arbeit als API verwendet, um die Vorteile von optimierten Ladefahrplänen gegenüber nicht gesteuerten Ladevorgängen zu bestimmen. Das Programm kann als reines Optimierungsprogramm gesehen werden, das heißt, die zu optimierenden Daten müssen an den Optimierer geschickt werden und kommen dann in der Antwort als optimierte Ladefahrpläne zurück. In dieser Arbeit wird mit realistischen Daten über Liegenschaften das Laden beim Arbeitgeber simuliert und hieraus die errechneten Vorteile bestimmt, um daraus eine Aussage über zukünftige Vorteile geben zu können.

Ladeoptimierungsprogramme zum Einsatz beim Arbeitgeber haben die Möglichkeit, ökonomische Vorteile zu generieren. Da diese niedrige Energiepreise zum Laden der BEV nutzen. Durch diese ökonomischen Vorteile beim Einsatz solcher Ladeoptimierungsprogramme ist es möglich, eine schnellere CO<sub>2</sub>- Reduktion im Verkehrssektor zu erreichen. Sie sind daher ein Mittel, um dem Klimawandel entgegenzutreten.

Diese Arbeit wurde erstellt, um das Potenzial zukünftig vorher an Liegenschaften ermitteln zu können und hierdurch die Attraktivität der E- Mobilität durch planbare Zahlen für Arbeitgeber zu erhöhen, hierdurch deren Investitionsbereitschaft zu stärken, und somit eine schnellere CO<sub>2</sub>- Reduktion im Verkehrssektor zu erreichen.

## **1.2 Aufgabenstellung**

### **1.2.1 Hintergrund**

Elektrisch fahrende Automobile benötigen einen hohen Energiebedarf. Dieser Energiebedarf wird zukünftig noch stärker ansteigen, da immer mehr Firmen und Personen sich elektrisch fahrende Autos anschaffen, die als Firmenwägen in Flotten an den Unternehmensstandorten geladen werden. Durch optimiertes Laden können hierbei nicht nur Kosten eingespart, sondern auch Netzengpässe vermieden und netzdienlich geladen werden. Die Firma InnoCharge hat hierfür eine Softwarelösung zur Optimierung des Ladeverhaltens entwickelt. In dieser Master-Arbeit wird eine Anwendung entwickelt, mithilfe derer die Möglichkeit zur Einsparung von Kosten im Vorhinein anhand möglichst weniger Kenngrößen über die Liegenschaft quantifiziert werden kann.

### **1.2.2 Aufgabenstellung**

Zu Beginn der Arbeit mussten die nötigen Angaben über eine Liegenschaft erarbeitet werden. Dazu gehörten die an der Liegenschaft vorherrschenden elektrischen Energieerzeugungsanlagen mit ihren zeitlichen Leistungsverläufen. Wichtig sind ebenfalls die Lastgänge, in einer Liegenschaft, sowie die Nutzung eines Gebäudes, also ob dieses als Industrie-, Wohn-, oder Bürogebäude genutzt wird. Zudem ist es notwendig, den dynamischen Strompreis mit hinzuzuziehen. Diese Angaben sind notwendig, um daraus eine optimierte Regelung der Ladesäulen berechnen und einen wirtschaftlichen Vorteil bestimmen zu können.

Die wirtschaftlichen Anreize hierfür lassen sich dabei in zwei unterschiedliche Arten einteilen. Diese sind wirtschaftliche Anreize vor und hinter dem Zähler. Diese beiden Arten der Anreize lassen sich zur Kostensenkung nutzen und sind wirtschaftlich motivierte Anreize zur Lastverlagerung.

Anreize hinter dem Zähler sind Anreize, die darin begründet sind, dass der Betreiber der Ladesäulen möglichst wenig Kosten durch seine elektrische Energierechnung hat. Die Anreize hinter dem Zähler lassen sich hierbei als erhöhter Eigenverbrauch, gesenkte Netzanschlusskosten durch eine verringerte Spitzenlast sowie die Vermeidung von Netzengpässen durch ungesteuerten Leistungsbezug innerhalb der Liegenschaft

herausarbeiten. Durch einen höheren Eigenverbrauch, insbesondere von PV-Energie kann eine Kosteneinsparung durch das Verwenden der günstigen, eigenen PV-Energie statt der kostenintensiveren Energie vom Stromanbieter, die über das öffentliche Stromnetz transportiert werden muss, erreicht werden. Bei Netzanschlusspunkten zahlen gewerbliche Verbraucher in der Regel einen Preis pro kW am Ende des Jahres tatsächlich genutzter Anschlussleistung. Kann durch Peak-Shaving die Anschlussleistung reduziert werden, hat das einen direkten Einfluss auf die leistungsbezogenen Netznutzungsentgelte und generiert so ein Einsparpotenzial. Dazu hat die Vermeidung von Netzengpässen ebenfalls einen Einfluss, da eine Erhöhung der Anschlussleistung und hierfür benötigte Umbaumaßnahmen vermieden werden können.

Anreize vor dem Zähler sind als Möglichkeit zu verstehen, durch netzdienliches Ladeverhalten Kosten zu sparen. So kann marktorientiertes Laden realisiert werden, also eine Abnahme der Energie in Zeiten eines Überangebotes und ein daraus resultierender geringerer Energiepreis. Ein weiteres Einsparpotenzial ergibt sich durch die Möglichkeit des netzdienlichen Ladens, welches in einem Vorschlag der BNetzA vom 24.11.22 formuliert wurde. Hierbei kann durch eine dynamische Steuerung durch den Netzbetreiber die Ladeleistung abgesenkt werden, um die Netzstabilität zu gewährleisten und zu verhindern, dass durch vielfach gleichzeitigen Leistungsbezug Leistungsengpässe im Verteilnetz entstehen. Eine pauschale Reduktion der Netzentgelte als Belohnung für die Steuerung lässt sich so realisieren.

Diese verschiedenen Faktoren werden bereits durch die Ladeoptimierung der Firma InnoCharge umgesetzt. In dieser Arbeit soll mithilfe dieses Programmes eine Modellierung von Liegenschaften möglich gemacht werden. So sollen mögliche Einsparungen bereits vor Einsatz der Ladeoptimierung aufgezeigt werden. Dies ist wichtig, um die Akzeptanz und die Vorteile für Verbraucher durch ein intelligentes Lademanagement zu erhöhen.

Die möglichen Einsparpotenziale sollen hierbei nach deren Optimierungsanreizen aufgeschlüsselt werden, um aufzuzeigen, welcher Anreiz in welchem Maße zu der Gesamtkosteneinsparnis durch die Ladeoptimierung beiträgt. Hierzu ist die Nachvollziehbarkeit der dargestellten Ergebnisse innerhalb des Programms ein wichtiger Aspekt.

### 1.2.3 Kooperation mit der Firma InnoCharge

Die Bearbeitung der Masterarbeit erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma InnoCharge , einem Spin-Off aus dem FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe. Der Optimierer wurde von InnoCharge entwickelt und wird mit deren Einverständnis in dieser Arbeit genutzt. InnoCharge möchte das durch diese Arbeit entstehende Programm nutzen, um wirtschaftliche Vorteile ihrer Ladeoptimierung schnell für verschiedene Szenarien und Liegenschaften aufzuzeigen.

## 1.3 Forschungsfragen

Die Forschungsfragen, welche sich aus der Aufgabenstellung dieser Masterarbeit ergeben, sind nachfolgend aufgeführt und beschrieben:

**Forschungsfrage 1: Welche Einflussfaktoren gibt es in einer Liegenschaft mit Auswirkungen auf die Ladekosten von E-Fahrzeugen und wie können diese durch eine Optimierung genutzt werden?**

Eine Übersicht über die verschiedenen Einflussfaktoren wird im Kapitel 2.2 gegeben. Dazu werden diese Einflussfaktoren im gesamten Kapitel 2 besprochen und in den jeweiligen Unterkapiteln genauer vorgestellt. Deren Einflüsse auf das Optimierungsergebnis werden im Kapitel 5.2 aufgezeigt und die Ergebnisse werden gegenübergestellt, um die ökonomischen Einflüsse der einzelnen Einflussfaktoren herauszuarbeiten.

**Forschungsfrage 2: Wie muss ein Analyseprogramm zur Quantifizierung von Ladeoptimierungspotenzialen aufgebaut sein? Welche Annahmen müssen hierbei getroffen werden und welche Interaktionen gibt es zwischen den einzelnen Programmteilen und Klassen?**

Der Programmaufbau wird im Kapitel 3 anhand von Übersichtsgraphiken und Klassendiagrammen gegeben. Hier wird dazu eine Übersicht über die notwendigen Interaktionen zwischen den Programmteilen gegeben. Die Daten sowie die Annahmen, welche getroffen werden müssen, werden in den Kapiteln 4.1 sowie 4.2 vorgestellt.

**Forschungsfrage 3: Welche verschiedenen Szenarien gibt es bei Liegenschaften, wie können diese miteinander und in ihren Ergebnissen verglichen werden? Was sind hierbei die Relevanten Parameter mit großer Auswirkung auf das Optimierungsergebnis?**

In der Arbeit werden zwei Referenzszenarien in Anlehnung an zwei gewerblichen Liegenschaften in Karlsruhe genauer betrachtet. Die Referenzszenarien werden hierfür im Kapitel 4.2 vorgestellt. Um die relevanten Parameter herausarbeiten zu können, werden die Einflussfaktoren der Referenzszenarien im Kapitel 4.3 verändert. Im gesamten Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Simulation vorgestellt. Hierbei werden im Kapitel 5.1.3 die Ergebnisse der Referenzszenarien verglichen. Die relevanten Parameter werden im Kapitel 5.2 herausgearbeitet. Dazu findet eine zusammenfassende Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse und der relevanten Parameter im Kapitel 5.5 statt.