

Vorgelegt an der Universität Stuttgart  
Institut für Energieübertragung und  
Hochspannungstechnik



## **Entwicklung eines intelligenten Lade- und Lastmanagementsystems für den Parkraum**

### **Development of an intelligent charge and load management system for parking areas**

**Masterarbeit**

von

**Philipp Metzler**

**3320350**

Beginn der Arbeit:	01.04.2019
Ende der Arbeit:	01.10.2019
Betreuer:	Bernhard Wittenberg (M.Sc.) Domenico Perrino (M.Sc.) Tim Streubel (M.Sc.)
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Krzysztof Rudion



## **Sperrvermerk**

Die vorliegende Masterarbeit enthält Informationen, die der Öffentlichkeit nicht bekannt sind und die der Geheimhaltung unterliegen. Zum Schutze der Unternehmensinteressen ist diese Arbeit daher vertraulich zu behandeln und über die fachlichen Inhalte, die nicht allgemein bekannt sind, Dritten gegenüber Stillschweigen zu bewahren.

Diese Verpflichtung trifft nicht die Weitergabe der schriftlichen Arbeit an Mitarbeiter der Hochschule im Rahmen des hochschulinternen Prüfungsverfahrens.

## Erklärung

Ich, Philipp Metzler versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig durchgeführt und verfasst habe, abgesehen von den Anregungen, die mir von Seiten meiner Betreuer Herr Bernhard Wittenberg (M.Sc.) Herr Domenico Perrino (M.Sc.) und Herr Tim Streubel (M.Sc.) gegeben worden sind und, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

---

Ort

Datum

Unterschrift

## Kurzfassung/Abstract

### Kurzfassung

Der notwendige Umstieg des Individualverkehrs auf Elektromobilität, mit dem Ziel die  $CO_2$  Emissionen im Verkehrssektor zu senken, kann nur auf Grundlage einer weitreichenden Durchdringung von Ladeinfrastruktur gelingen. Um den steigenden Leistungsbedarf in den Verteilnetzen durch Ladeinfrastruktur zur Reduktion des Netzausbaus begrenzen zu können, ist es notwendig die zeitliche Verschiebbarkeit von Ladeleistung zu nutzen. Im Forschungsprojekt i-LiME werden Verfahren zur Einhaltung der verfügbaren Netzanschlussleistung bei Anbinden von Ladeinfrastruktur untersucht. Hierfür kommt ein übergeordnetes Lastmanagementsystem zum Einsatz, von dem aus ein Speicher und das Lastmanagementsystem der Ladeinfrastruktur anhand der verfügbaren Leistung dynamisch gesteuert wird. Inhalt dieser Masterthesis ist die Entwicklung eines Lastmanagementsystems für die verwendete Ladeinfrastruktur.

Die Arbeit umfasst das statische und dynamische Lastmanagement für Ladeinfrastruktur. Mit dem Lastmanagementsystem können Leistungs- und Stromgrenzen statisch und dynamisch eingehalten werden. Zudem ist das entwickelte Lastmanagementsystem in der Lage Anforderungen der TAB-Niederspannung einzuhalten.

Für die Entwicklung des Lastmanagementsystems beleuchtet die Arbeit das Ladeverhalten verschiedener Elektrofahrzeuge und zieht hieraus Schlüsse. Anhand dieser Erkenntnisse diskutiert die Arbeit verschiedene Konzepte zur Umsetzung eines Lastmanagementsystems. Im Anschluss an die Auswahl des geeignetsten Verfahrens erfolgt die Erarbeitung einer praktischen Umsetzung. Das Lastmanagementsystem wird zur Erprobung in *Matlab/Simulink* und nach grundlegenden Versuchen in der Programmiersprache *java* entwickelt. Zudem ist es Bestandteil der Arbeit, das entwickelte Lastmanagementsystem in das Lademanagement der Ladeinfrastruktur einzubinden.

Die Erprobung der Grundfunktionalität erfolgt in der Simulationsumgebung von *Matlab/Simulink*. Nach bestätigen der Funktionalität erfolgt die Erprobung mithilfe einer praxisnahen Simulation. Hierfür wird in der Programmiersprache *Python* ein Dummy entwickelt, der die Ladeinfrastruktur vollumfänglich nachbilden soll. Nach der Erprobung und Kalibrierung mithilfe des Dummy-Systems erfolgt die Erprobung an der realen Anlage. Dazu werden unter Zuhilfenahme von neun Elektrofahrzeugen verschiedene Zustände erprobt. Zuletzt erfolgt die erste Erprobung in der Praxis.

### Abstract

The necessary transformation of the individual mobility to electromobility, with the aim of reducing the  $CO_2$  emissions in the transport sector, can only succeed on the basis of a far-reaching penetration of charging infrastructure. In order to be able to limit the increasing power demand in the distribution networks through charging infrastructure to reduce network expansion, it is necessary to use the temporal shiftability of charging power. In the i-LiME research project, procedures for maintaining the available grid connection capacity when connecting charging infrastructure are investigated. For this purpose, a

higher-level load management system is used, from which a storage facility and the load management system of the charging infrastructure are dynamically controlled on the basis of the available capacity. The content of this master thesis is the development of a load management system for the used charging infrastructure.

The work includes static and dynamic load management for charging infrastructure. With the load management system, performance and current limits can be kept statically and dynamically. In addition, the developed load management system is able to keep the requirements of the TAB low voltage.

For the development of the load management system, the work examines the charging behaviour of various electric vehicles and draws conclusions from this. On the basis of these findings, the work discusses various concepts for the implementation of a load management system. Following the selection of the most suitable procedure, a practical implementation is developed. The load management system is developed for testing in *Matlab/ Simulink* and after basic tests in the programming language *java*. Furthermore, it is part of the work to integrate the developed load management system into the charging management of the charging infrastructure.

The basic functionality is tested in the simulation environment of *Matlab/ Simulink*. After confirming the functionality, the testing takes place with the help of a practical simulation. For this a dummy is developed in the programming language *Python*, which shall completely simulate the charging infrastructure. After testing and calibration with the help of the dummy system, it is tested on the real plant. For this purpose, different states are tested with the aid of nine electric vehicles. Finally, the first practical tests are carried out.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Sperrvermerk</b>	<b>i</b>
<b>Erklärung</b>	<b>ii</b>
<b>Kurzfassung/Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>xi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Forschungsprojekt: intelligentes Ladeinfrastruktur-Management für Elektromobilität (i-LIME) . . . . .	3
2.2. Technische Grundlagen beim Laden von Elektrofahrzeugen . . . . .	5
2.2.1. Ladetechniken . . . . .	5
2.2.2. Steckersysteme . . . . .	5
2.2.3. Ladevorgang . . . . .	8
2.3. Das Ladekonzept von ChargeHere . . . . .	8
2.4. Restriktionen beim Anschluss an das Stromnetz . . . . .	12
2.4.1. Technische Anschlussrichtlinien in der Niederspannung . . . . .	12
2.4.2. Auslöseverhalten von Überstromschutzeinrichtungen . . . . .	13
2.5. Lastmanagement . . . . .	14
2.5.1. Statisches Lastmanagement . . . . .	14
2.5.2. Dynamisches Lastmanagement . . . . .	15
2.5.3. Priorisiertes Lastmanagement . . . . .	15
<b>3. Kozeptionierung</b>	<b>19</b>
3.1. Regelungstechnisches Lastmanagementkonzept . . . . .	19
3.2. Optimierungsbasiertes Lastmanagementkonzept . . . . .	21
<b>4. Simulationsmodell</b>	<b>25</b>
4.1. Lademodell eines Elektrofahrzeugs . . . . .	25
4.2. Simulation des optimierungsbasierten Lastmanagementkonzepts . . . . .	28
4.3. Erkenntnisse aus der Simulation . . . . .	31

<b>5. Lösung des Optimierungsproblems</b>	<b>35</b>
5.1. Algorithmen zur Lösung von Optimierungsproblemen . . . . .	35
5.1.1. Simulated Annealing . . . . .	35
5.1.2. Greedy-Algorithmus . . . . .	36
5.1.3. Evolutionärer Algorithmus . . . . .	36
5.2. Reduktion der Kombinationsmöglichkeiten . . . . .	37
5.3. Auswahl des Verfahrens . . . . .	39
<b>6. Praktische Umsetzung des Konzepts</b>	<b>41</b>
6.1. Einbinden in das SPS-Programm . . . . .	41
6.2. Entwicklung des Lastmanagement-Programms . . . . .	44
6.2.1. Hauptklasse . . . . .	45
6.2.2. Prüfzyklus . . . . .	48
6.2.3. Leistungsumwandlung . . . . .	49
6.2.4. Stellstromreduktion . . . . .	49
6.2.5. Optimierer . . . . .	52
6.2.6. Datenlogger . . . . .	54
6.2.7. Kommunikationsschnittstelle . . . . .	54
<b>7. Kalibrierung und Erprobung mithilfe eines Software-Dummys</b>	<b>57</b>
7.1. Aufbau des Software-Dummys . . . . .	57
7.1.1. Fahrzeugsimulation . . . . .	57
7.1.2. Kommunikationsschnittstelle . . . . .	58
7.1.3. Prüfplan . . . . .	58
7.1.4. Datenlogger und Visualisierung . . . . .	59
7.2. Versuche mit dem Software-Dummy . . . . .	59
7.2.1. Prüfzyklus unter Stressbedingungen . . . . .	60
7.2.2. Einhalten einer statischen Grenzleistung . . . . .	62
7.2.3. Einhalten statischer Grenzströme . . . . .	64
7.2.4. Einhalten von Vorgaben der VDE-AR-N 4100 . . . . .	67
7.2.5. Einhalten einer dynamischen Grenzleistung . . . . .	69
7.2.6. Einhalten einer Leistungsgrenze bei inkonstantem Ladeverhalten . . . . .	71
<b>8. Kalibrierung und Erprobung im Realbetrieb</b>	<b>75</b>
8.1. Gestellter Realbetrieb . . . . .	75
8.2. Statisches Lastmanagement im Niederspannungsnetz . . . . .	75
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>79</b>
9.1. Zusammenfassung . . . . .	79
9.2. Ausblick . . . . .	80
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>83</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>87</b>
A.1. Aufgabenbeschreibung der Masterarbeit . . . . .	87



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Zielsetzung und Beteiligungen der einzelnen Partner des Forschungsprojektes i-LIME. . . . .	4
2.2. Gängige Steckertypen für das AC-Laden von Elektrofahrzeugen. . . . .	6
2.3. Aufbau und Pinbelegung des IEC 62196 Typ 2 -Steckers. . . . .	7
2.4. Zeitlicher Verlauf der Ladeströme der Phasen $L_1$ , $L_2$ , $L_3$ und Ladeleistung beim vollständigen Laden eines dreiphasig angebundenen Elektrofahrzeugs. oben, Mitte oben, Mitte unten: Dreiphasig ladende Fahrzeuge mit unterschiedlichem Ladeverhalten. unten: Einphasig ladendes Fahrzeug. . . . .	9
2.5. Normalverteilung der geladenen Energiemengen. Aufgegliedert für einphasige-, zweiphasige und dreiphasige Fahrzeuge. Ermittelt aus 310 Ladeprofilen privater und nicht privater Fahrzeuge im Parkhaus der EnBW. . . . .	10
2.6. Schaltung zur Überwachung des CP-Signals eines Elektrofahrzeugs für das Multiplexerkonzept von ChargeHere. . . . .	10
2.7. Erreichbarkeit der Ladepunkte von den Ladeeinheiten (LE) über die Multiplexer der ChargeBase von ChargeHere. . . . .	11
2.8. Beispiel einer mittleren Zeit-/Strom-Kennlinie von NH-Sicherungssätzen nach DIN Gr.00-3 gG AC 400 V. . . . .	14
2.9. Exemplarische Darstellung der Funktion des statischen Lastmanagements bei einer statischen Lastgrenze von 40 kW. . . . .	15
2.10. Exemplarische Darstellung der Funktion des dynamischen Lastmanagements bei einer dynamischen Lastgrenze zwischen 30 kW und 90 kW. . . . .	16
2.11. Exemplarische Darstellung der Funktion des priorisierten Lastmanagements bei einer dynamischen Lastgrenze von 30 kW bzw. 20 kW mit drei angeschlossenen Fahrzeugen, von denen ein Fahrzeug priorisiert geladen wird. . . . .	17
3.1. Variables Lademodell eines Elektrofahrzeugs zur Erprobung des Lastmanagements. Erstellt in Matlab/Simulink. . . . .	20
3.2. Ablauf des Prüfzykluses zur Bestimmung des Fahrzeugverhaltens bei einem dreiphasig ladenden Fahrzeug. . . . .	22
3.3. Ablauf des optimierungsbasierten Lastmanagements. . . . .	24
4.1. Variables Lademodell eines Elektrofahrzeugs zur Erprobung des Lastmanagements. Erstellt in Matlab/Simulink. . . . .	26
4.2. Eingangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge. links: Zeitlicher Verlauf der zu ladenden Energiemenge. rechts: Anzahl der Phasen über die das Elektrofahrzeug lädt. . . . .	27

4.3.	Ausgangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge aus Matlab/Simulink. oben: Binärwerte die eine steigende Flanke ausgeben, sobald ein Fahrzeug angeschlossen wird (links) oder ein Ladevorgang beendet ist (rechts). unten links: Resultierende Ladeleistung des Elektrofahrzeugs aus den Eingangsparametern und dem Stellstrom. unten rechts: Noch zu ladende Energiemenge eines Angeschlossenen Elektrofahrzeugs. . . . .	28
4.4.	Ausgangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge aus Matlab/Simulink. oben und unten links: Zeitlicher Verlauf der Ladeströme $I_{L1}$ , $I_{L2}$ und $I_{L3}$ aus den Eingangsparametern und einem Stellstrom von 16 A. unten rechts: Verlauf der geladenen Strommenge. . . . .	29
4.5.	Ergebnisse des optimierungsbasierten Lastmanagements mit vier Fahrzeugen. . . . .	31
4.6.	Stellströme, optimierte und maximale Leistungen von vier Fahrzeugen, die an das optimierungsbasierte Lastmanagement angebunden sind. . . . .	32
4.7.	Verhältnis der Anzahl möglicher Kombinationen zur Anzahl der ladenden Fahrzeuge. . . . .	33
5.1.	Vollständiger Suchraum des Scores und der entsprechenden Leistung innerhalb dessen die Optimierung stattfindet. . . . .	36
5.2.	Reduzierter Suchraum des Scores und der entsprechenden Leistung innerhalb dessen die Optimierung stattfindet. . . . .	38
6.1.	Ablaufdiagramm der SPS-Steuerung der ChargeBase von ChargeHere für die Zustände der angebundenen Parkplätze. . . . .	42
6.2.	Ablaufdiagramm der SPS-Steuerung der ChargeBase von ChargeHere für die Zustände der angebundenen Ladecontroller. . . . .	43
6.3.	Zustandsautomat des Hauptprogramms des entwickelten Lastmanagementsystems. . . . .	46
6.4.	Zustandsautomat des Programmabschnitts des Lastmanagementsystems zur Reduktion der in die Optimierungsfunktion einfließenden Stellströme. . . . .	50
6.5.	Auswahlmöglichkeiten zur Reduktion der Stellströme. . . . .	51
6.6.	Pseudocode der rekursiv arbeitenden Optimierungsfunktion des Lastmanagementsystems mit dem Parkplatz-Iterator $nCPi$ und der Anzahl ladender Fahrzeuge $nCPaktiv$ . . . . .	53
6.7.	Aufbau der Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Lastmanagementsystem auf dem RevPi und der SPS der Ladeeinrichtung mit dem Kommunikationsprotokoll Modbus TCP. . . . .	55
7.1.	Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy ohne festgelegte Grenzwerte beim eintreffen von acht Fahrzeugen innerhalb von 20 Sekunden. . . . .	60
7.2.	Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy ohne festgelegten Grenzwert beim eintreffen von acht Fahrzeugen innerhalb von 20 Sekunden. . . . .	61
7.3.	Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Leistungsbegrenzung auf 50 % der Anlagennennleistung. . . . .	62

7.4. Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer festgelegten Leistungsgrenze auf 50 % der Anlagennennleistung. . . . .	63
7.5. Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Begrenzung des Leiterstroms $I_{L1,grenz}$ auf 64 A. . . . .	65
7.6. Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Begrenzung des Leiterstroms $I_{L1,grenz}$ auf 64 A. . . . .	66
7.7. Maximale und optimierte Summe der Phasenunsymmetrie der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy unter Einhaltung der Anforderungen der VDE-AR-N 4100. . . . .	67
7.8. Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy unter Einhaltung der Symmetrievorgaben nach VDE-AR-N 4100. . . . .	68
7.9. Summe der möglichen $S_{max}$ , optimierten $S_{ist}$ und Grenzleistung $S_{Grenz}$ für die Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy und einer dynamischen Lastgrenze die sich 100 % bzw. 50 % der Nennleistung. . . . .	70
7.10. Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angeschlossenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy und einer dynamischen Lastgrenze die sich 100 % bzw. 50 % der Nennleistung. . . . .	71
7.11. Mögliche, optimierte und Grenzleistung bei der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer statischen Lastgrenze von 45 kW und einem Fahrzeug mit einem nicht-statischen Ladeverhalten. . . . .	72
7.12. Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen der Fahrzeuge 1 bis 8 der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer statischen Lastgrenze von 45 kW und einem Fahrzeug mit nicht-statischem Ladeverhalten. . . . .	73
8.1. Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems an einer realen Anlage ohne vorgegebene Grenzwerte mit acht nacheinander eintreffenden Fahrzeugen. . . . .	76
8.2. Leistungsverläufe aller acht geprüften Fahrzeuge einer realen Anlage beim aufeinander folgenden Eintreffen der Fahrzeuge ohne vorgegebenen Grenzwert. . . . .	77



# Tabellenverzeichnis

2.1. Für das CP-Signal definierte Ladezustände nach IEC 62196 für den Stecker Typ 2. . . . .	7
4.1. Leistungen $P$ in Abhängigkeit vom Stellstrom $I_S$ unterschiedlicher Fahrzeugtypen zur Erprobung des regelungstechnischen Lastmanagements. .	30
7.1. Leiterströme der Fahrzeuge die für die Erprobung des Lastmanagementsystems vom Software-Dummy simuliert werden. . . . .	59



# Formelzeichen und Darstellungskonventionen

Akronym	Bedeutung
ACK	<b>A</b> cknowledgement
BPL	<b>B</b> reitband <b>p</b> ower <b>l</b> ine
BSI	<b>B</b> undesamt für <b>S</b> icherheit in der <b>I</b> nformationstechnik
EEG	<b>E</b> rneuerbare- <b>E</b> nergien- <b>G</b> esetz
FIN	<b>F</b> inish
FMS	<b>F</b> lexibilitäts- <b>M</b> anagement- <b>S</b> ystem
GEMS	<b>G</b> ebäude- <b>E</b> nergie- <b>M</b> anagement- <b>S</b> ystem
GLMS	<b>G</b> rid- <b>L</b> oad- <b>M</b> anagement- <b>S</b> ystem
GOOSE	<b>G</b> eneric <b>O</b> bject <b>O</b> riented <b>S</b> ubstation <b>E</b> vents
IANA	<b>I</b> nternet <b>A</b> ssigned <b>N</b> umbers <b>A</b> uthority
IP	<b>I</b> nternet <b>P</b> rotocol
ONS	<b>O</b> rtsnetz <b>s</b> tation
REMS	<b>R</b> egionales- <b>E</b> nergie- <b>M</b> anagement- <b>S</b> ystem
RONT	regelbarer <b>O</b> rtsnetz <b>t</b> ransformator
SML	<b>S</b> mart- <b>M</b> essage- <b>L</b> anguage
SYN	<b>S</b> ynchronize
TCP	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotokol
UDP	<b>U</b> ser <b>D</b> atagram <b>P</b> rotocol

# 1. Einleitung

Die europäische Union strebt an bis 2050 die  $CO_2$ -Emissionen bezogen auf das Referenzjahr 1990 um 60 % zu reduzieren. Bis zum Jahr 2016 konnten die  $CO_2$ -Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr bereits um 23 % reduziert werden. Diese  $CO_2$ -Reduktionen sind auf alle betrachteten Sektoren außer den Verkehrssektor zurückzuführen. Im Verkehrssektor sind die  $CO_2$ -Emissionen im Betrachtungszeitraum sogar um etwa 25 % gestiegen. Auf den Verkehrssektor bezogen gehen 60 % aller  $CO_2$ -Emissionen vom Individualverkehr auf der Straße aus. Zuletzt sind die fahrstreckenbezogenen  $CO_2$ -Emissionen aller Neuzulassungen sogar gestiegen. Als einziger vielversprechender Weg zur Reduktion der  $CO_2$ -Emissionen gilt derzeit die Elektromobilität. [q14, q15]

Einer der notwendigen Faktoren für die Etablierung von Elektrofahrzeugen ist eine flächendeckend ausgebaut Ladeinfrastruktur. Im Mai 2019 standen in Deutschland jedoch erst 17.260 öffentlich zugängliche Ladepunkte zur Verfügung, vor allem an Verkehrsknotenpunkten. Etwa 95 % aller Fahrzeugnutzer wollen ihr Fahrzeug aber in der Nähe ihres Wohnsitzes laden. Neben der Nähe zum Wohnort ist vor allem der Preis für die Ladung relevant und dieser ist an öffentlichen Ladeeinrichtungen höher als beim privaten Laden. Gerade in Ballungszentren gibt es kaum Tiefgaragen und Parkhäuser mit Ladeeinrichtungen. Einer ADAC-Studie zufolge besitzen derzeit lediglich etwa 2 % der Tiefgaragen mindestens einen Stellplatz mit Lademöglichkeit. Im Rahmen der Studie wurden Immobilienunternehmen, die insgesamt 4816 Tiefgaragen besitzen oder verwalten, befragt. Das Nachrüsten von Bestandsgebäuden für Elektromobilität ist teuer und wird daher oftmals aufgeschoben oder gar nicht in Betracht gezogen. Ohne eine bessere Ladeinfrastruktur ist allerdings kein Ausbau der Elektromobilität möglich. [q16, q17]

Neben der Ladeinfrastruktur selbst gilt das Stromnetz, an das diese angeschlossen ist, häufig als nicht ausreichend ausgebaut. Die Belastung des Stromnetzes durch Elektromobilität zeigt sich im Wesentlichen auf der Verteilnetzebene. In einzelnen Regionen mit einem überdurchschnittlich hohen Anteil an Elektrofahrzeugen kann es zukünftig zu kritischen Netzzuständen kommen. Insbesondere der Anschluss einer größeren Anzahl von Ladeeinrichtungen in der Niederspannung, wie beispielsweise bei Parkflächen, birgt die Gefahr einer Netzüberlastung. Dem gegenüber steht jedoch der netzdienliche Effekt von Elektrofahrzeugen, durch deren hohes Flexibilisierungspotenzial. Dieses ist bedingt durch die langen Standzeiten eines PKWs womit der Ladevorgang über eine große Zeitspanne hinweg verteilt oder verschoben und dem Netzzustand angepasst werden kann. Um diesen positiven Effekt von Elektrofahrzeugen auf das Stromnetz überhaupt nutzen zu können, bedarf es einem flächendeckenden Ausbau von Ladeeinrichtungen im Parkraum und Möglichkeiten diese Ladeeinrichtungen netzdienlich zu steuern. [q18, q19]

Im Forschungsprojekt 'intelligentes Ladeinfrastruktur-Management für Elektromobilität' (i-LIME) wird die Integration einer größeren Anzahl von Ladepunkten in einen bestehendes Parkhaus in urbanem Umfeld untersucht. Das Projekt besteht aus einer Kooperation der



Parkraumgesellschaft Baden-Württemberg (PBW), dem IEH der Universität Stuttgart, den Stuttgarter Netzen und ChargeHere. Ziel ist durch die Integration eines übergeordneten Lastmanagements in Kombination mit einem Batteriespeicher sowie einem lokalen Lastmanagements für die Ladeeinrichtungen, den bestehenden Netzanschluss nicht zu überlasten. Herausforderung ist hierbei den Netzzustand, Kundenprofile und den Energiebedarf des Gebäudes mit der Ladeinfrastruktur in Einklang zu bekommen. Hierfür wird im Rahmen dieser Arbeit ein dynamisches Lastmanagement für das zentralisierte Ladekonzept von ChargeHere entwickelt.

Die Arbeit ist in acht Kapitel aufgeteilt. Nach der Einleitung in Kapitel 1 folgt die Einführung in die Thematiken Laden von Elektrofahrzeugen und Lastmanagement in Kapitel 2. Anschließend werden in Kapitel 3 Konzepte für ein Lastmanagementsystem entworfen. Das vielversprechendste Konzept wird in Kapitel 4 mithilfe einer Simulation erprobt. Im Anschluss diskutiert die Arbeit in Kapitel 5 Schwächen des Lastmanagementkonzepts und gibt hierfür Lösungsansätze. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ist in Kapitel 6 die Umsetzung des Lastmanagementsystems aufgezeigt. Um die Funktionalität des Lastmanagementsystems zu gewährleisten erfolgt in Kapitel ?? eine umfangreiche Systemerprobung mithilfe eines Software-Dummys und an einer realen Anlage. Eine Zusammenfassung und einen Ausblick ist in Kapitel 9 gegeben.

## 2. Grundlagen

Im Forschungsprojekt i-LIME soll mithilfe eines übergeordneten Lastmanagement die Netzanschlussleistung eines Gebäudekomplexes, trotz Integration einer Ladeeinrichtung eingehalten werden. Die Thematik des Forschungsprojektes i-LIME wird in Abschnitt 2.1 beschrieben. Um auch die Ladeeinrichtung steuern zu können wird in dieser Arbeit ein lokales Lastmanagementsystem entwickelt. Hierfür sind in Abschnitt 2.2 die technischen Grundlagen für das Laden von Elektrofahrzeugen erläutert. Des Weiteren gibt Abschnitt 2.3 einen Überblick über die verwendete Ladelösung. Parameter die ein Lastmanagementsystem im Stromnetz einhalten muss, zeigt Abschnitt 2.4 auf. Die Arten des Lastmanagements werden in Abschnitt 2.5 aufgezeigt.

### 2.1. Forschungsprojekt: intelligentes Ladeinfrastruktur-Management für Elektromobilität (i-LIME)

Das Forschungsprojekt i-LIME ist der Rahmen innerhalb dessen diese Arbeit erstellt wird. Es befasst sich mit der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Parkhäusern. Die Beteiligten an diesem Projekt sind die Parkraumgesellschaft Baden-Württemberg mbH (PBW), das Institut für Energieübertragung und Hochspannungsnetze der Universität Stuttgart, das Innovationsprojekt ChargeHere der EnBW AG und die Stuttgart Netze Betrieb GmbH. Projektträger ist die Parkraumgesellschaft PBW, die für das Projekt das bestehende Parkhaus Tivoli im Stadtzentrum Stuttgarts zur Verfügung stellt. Gefördert wird das Forschungsprojekt durch das Land Baden-Württemberg im Zuge des Programms 'BWPLUS' des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr. Abbildung 2.1 zeigt die Arbeitsteilung der einzelnen Projektpartner. [q13]

Durch die steigende Anzahl elektrisch betriebener Fahrzeuge im Straßenverkehr steigt auch der Bedarf an passenden Ladeeinrichtungen. Neben Schnellladeeinrichtungen an Verkehrsknotenpunkten sollen vor allem im Parkraum vermehrt Ladeeinrichtungen entstehen. Mit diesem Hintergrund soll im Projekt i-LIME die Integration von Ladeinfrastruktur in bestehenden Parkhäusern untersucht werden. Ziel ist die Vermeidung bzw. Reduktion von Netzausbaumaßnahmen. Hierfür wird eine zentralisierte und intelligent agierende Steuerung erprobt. Neben den Ladeeinrichtungen umfasst die Steuerung einen Batteriespeicher. Dieses übergeordnete Lastmanagement entwickelt das IEH der Universität Stuttgart. [q13]

Den Knotenpunkt des Praxisversuchs bildet das übergeordnete Lastmanagement. Es erstellt unter Berücksichtigung von Einspeiseprognosen erneuerbarer Energien, Profile ladender Fahrzeuge und des Zustandes angrenzender Netze, einen Fahrplan für den

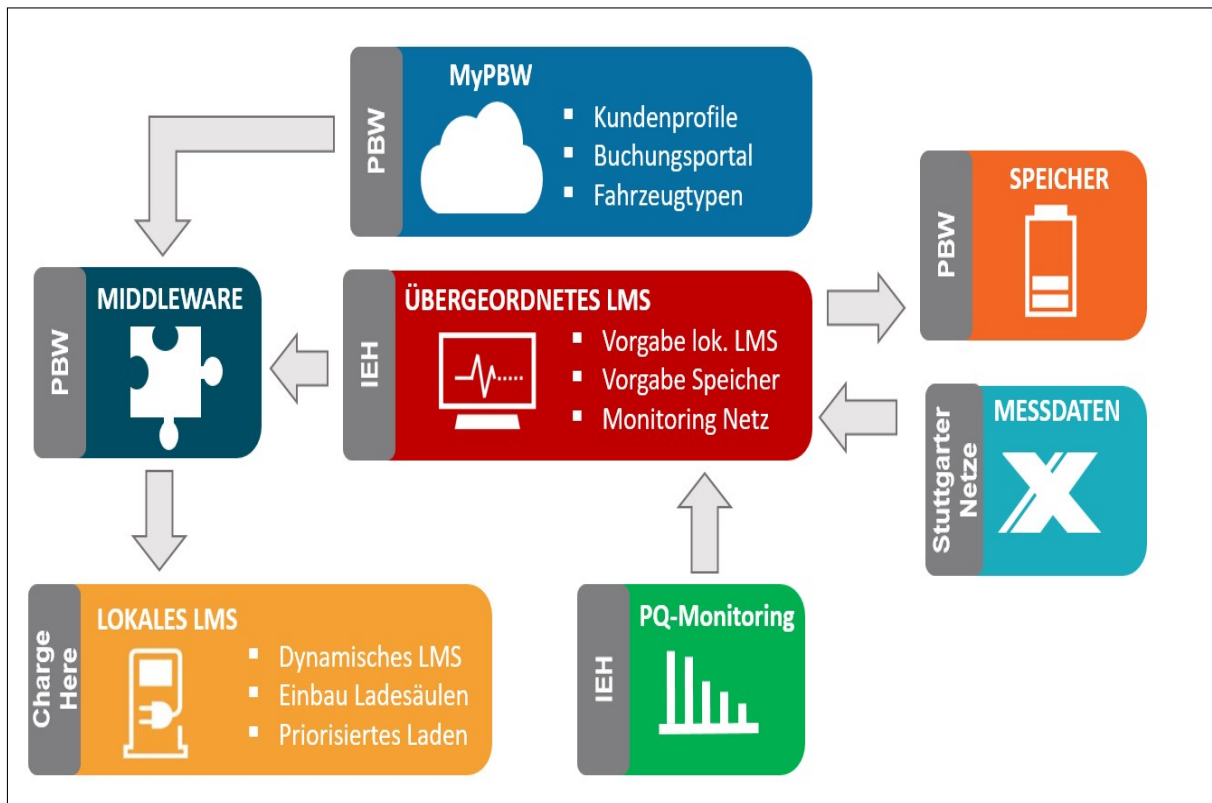


Abbildung 2.1.: Zielsetzung und Beteiligungen der einzelnen Partner des Forschungsprojektes i-LIME. [q13]

Speicher und das Lastmanagement der Ladeeinrichtung. Somit gibt das übergeordnete Lastmanagement dem Lastmanagement der Ladeeinrichtungen eine dynamische Lastgrenze vor. Hierbei darf die verfügbare Anschlussleistung nicht überschritten und das Laden der Elektrofahrzeuge nur möglichst gering begrenzt werden. [q13]

Um Lastprofile der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen für das übergeordnete Lastmanagement erstellen zu können verwendet die PBW Daten ihres Kundenportals. Über dieses Kundenportal soll der Kunde seine angestrebte Ladezeit, den Typ seines Elektrofahrzeugs und ob es sich um Kurzzeit- oder Langzeitparken handelt angeben. Auf Grundlage dieser Daten erstellt PBW eine Lastprognose. Mithilfe dieser Lastprognosen und auf Grundlage historischer Messdaten legt das IEH der Universität Stuttgart den Batteriespeicher so aus, dass damit Netzengpässe vermieden werden können.

Als Ladeeinrichtung kommt die Ladelösung von ChargeHere zum Einsatz. Diese verwendet einen zentralisierten Ansatz, bei dem ausgehend von einer 'ChargeBase' bis zu zwanzig Parkplätze elektrifiziert werden können. Um mit der Ladelösung von ChargeHere externe vorgegebene Ladeleistungen einhalten zu können wird im Rahmen dieser Arbeit ein lokales Lastmanagementsystem entwickelt. Mit diesem soll eine diskriminierungs-freie Reduktion der summarischen Ladeleistung ermöglicht werden. Des Weiteren bindet ChargeHere eine Schnittstelle für das priorisierte Laden von Elektrofahrzeugen in das bisherige Lademanagement ein.

## 2.2. Technische Grundlagen beim Laden von Elektrofahrzeugen

Das Laden von Elektrofahrzeugen ist nicht allgemein standardisiert sondern abhängig von der Ladetechnik und dem Steckersystem. Somit ist auch die Kommunikation zwischen Ladeeinrichtung und Fahrzeug in Abhängigkeit vom Steckersystem definiert. Nicht einbezogen ist jedoch die Ladeleistung und die Anzahl der verwendeten Phasen. Im Folgenden werden die Themen Ladetechniken 2.2.1, Steckersystem 2.2.2 und Ladevorgang 2.2.3 erläutert.

### 2.2.1. Ladetechniken









Für das Laden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen kommt zum einen das induktive und zum anderen das konduktive Laden in Frage. Das induktive Laden hat sich im Bereich Elektromobilität noch nicht durchgesetzt und wird aus diesem Grund nicht weiter betrachtet. Beim konduktiven Laden werden Ladeverfahren mit Gleichstrom und Wechselstrom eingesetzt. Gleichstrom wird meist zum schnellen Laden eingesetzt. Zum Laden auf Parkflächen mit höheren Standzeiten kommt in der Regel Wechselstrom direkt über den Netzanschluss zum Einsatz. [q1]

Ladesäulen an denen mit Gleichstrom geladen werden kann, besitzen einen eigenen Gleichrichter. Somit ist es nicht notwendig den Gleichrichter des Fahrzeugs zu verwenden. Beim sogenannten Schnellladen sind derzeit Ladeleistungen von deutlich über 300 kW möglich [q2]. Aus diesem Grund werden Schnellladeeinrichtungen meist an Fernstraßen und Raststätten eingesetzt, wo in kurzer Zeit möglichst viel Energie geladen werden soll. DC-Ladeeinrichtungen sind deutlich teurer als Ladeeinrichtungen mit Wechselstrom weshalb diese Anlagen auf möglichst hohe Betriebszeiten ausgelegt sind. Auf Parkflächen sind DC-Ladeeinrichtungen daher nur vereinzelt sinnvoll und wirtschaftlich. [q1]

Beim AC-Laden wird der Gleichrichter des fahrzeugeigenen Ladesystems verwendet. Diese sind fahrzeugabhängig und in verschiedenen Konfigurationen auf dem Markt vertreten. Es gibt 3-Phasig, 2-Phasig und 1-Phasig ladende Fahrzeuge die meist einen maximalen Ladestrom von 16 A oder 32 A ermöglichen. Mit steigender Ladeleistung der fahrzeugeigenen Ladeeinrichtung steigen auch die Kosten, das Gewicht und der benötigte Bauraum im Fahrzeug. Aus diesem Grund werden diese nicht größer dimensioniert. [q1]

### 2.2.2. Steckersysteme

Zum Laden von Elektrofahrzeugen haben sich verschiedene Steckertypen etabliert. Grund für die verschiedenen Steckertypen sind der unterschiedliche Netzaufbau sowie sicherheitstechnische und herstellerabhängige Präferenzen. In der Norm IEC 62196 sind die gängigen Steckertypen definiert. Es gibt unterschiedliche Stecker zum AC- und DC-Laden. Für das DC-Laden gibt es den CHAdeMO-, GB-, Typ 1 CSS- und Typ 2 CSS-Stecker wobei es sich bei den CSS-Steckern (Combined Charging System) um Erweiterungen der AC-Stecker handelt. Da im Rahmen dieser Arbeit nur das AC-Laden betrachtet wird werden die DC-Stecker nicht weiter berücksichtigt. [q1]

	Haushalts - Steckdose	CEE Steckdose „blau“	CEE Steckdose „rot“	Typ 1 Stecker	Typ 2 Stecker	Tesla Supercharger	CSS Stecker Combo 2	CHAdeMo Stecker
Lade-Art	AC-Wechselspannung					DC-Gleichspannung		
Bauform Ladestecker, Ladesteck- dose								
Maximale Ladeleistung	einphasig bis zu 2,3 kW	einphasig bis zu 3,7 kW	dreiphasig bis zu 22 kW	einphasig bis zu 7,4 kW	dreiphasig bis zu 43 kW	bis zu 120 kW	bis zu 350 kW	bis zu 150 kW
Benötigtes Ladekabel	Mode 2 Ladekabel	Mode 2 Ladekabel	Mode 2 Ladekabel	Mode 3 Ladekabel	Mode 3 Ladekabel	Ladekabel wird von der Ladestation bereitgestellt	Ladekabel wird von der Ladestation bereitgestellt	Ladekabel wird von der Ladestation bereitgestellt
Zusätzliche Informationen	Der „Schuko“- Stecker besitzt eine Phase und bietet und Dauerbelastung maximal 2,3 kW	Der „blaue“- Stecker ist auch als „Camping- stecker“ bekannt	Der „Rote“- Stecker (CEE16/32, 11/22 kW) auch als „Starkstrom- anschluss“	Dieser Stecker (SAE J1772-2009) ist vor allem bei asiatischen Herstellern verbaut	Wird auch als „Mennekes- Stecker“ bezeichnet und hat sich als EU- Standard etabliert; wird von den meisten Ladesäulen und Fahrzeugen in Europa verwendet	Umgewandelter Typ 2 Stecker – ausschließlich für Tesla Fahrzeuge geeignet	Der Typ 2 Stecker wird um zwei Kontakte für DC- Ladung erweitert; ebenfalls als EU- Standard definiert – hier können auch Typ 2 Stecker für den AC-Betrieb eingesteckt werden	Der als japanische Standard definierte Ladestecker findet sich häufig in asiatischen Fahrzeugen

HOME &amp; SMART

Copyright by home&amp;smart

Abbildung 2.2.: Gängige Steckertypen für das AC-Laden von Elektrofahrzeugen. [q10]

Die IEC 62196 definiert die AC-Ladestecker Typ 1, Typ 2 und Typ 3. Der Typ 1-Stecker ist für ein- und zweiphasiges Laden konzipiert und wird aus diesem Grund in Ländern ohne Dreiphasennetz eingesetzt. Stecker Typ 2 hat sich im europäischen Raum durchgesetzt und konnte den Typ 3-Stecker vollständig verdrängen. Ursprünglich wurde der Typ 3 Stecker aus einer Italienisch/Französischen Initiative heraus entwickelt um länderspezifische Sicherheitsanforderungen einzuhalten. Seitdem auch der Typ 2-Stecker diese Sicherheitsanforderungen erfüllt hat der Typ 3-Stecker im Bereich E-PKW keinen nennenswerten Marktanteil mehr. Abbildung 2.2 zeigt die gängigen Steckertypen für das AC- und DC-Laden von Elektrofahrzeugen. [q1][q3]

In der IEC 62196 werden für die drei Steckertypen Typ 1, Typ 2 und Typ 3 vier verschiedene Lademodi definiert. Lademodi eins und zwei ermöglicht ein konstantes Laden mit 16 A bzw. 32 A. Mode 3 ermöglicht das Laden mit bis zu 80 A unter Einsatz von Pulsweitenmodulation um den Strom zu steuern. In diesem Mode werden die Fahrzeuge in dieser Arbeit angesteuert. Mode vier kommt zum Einsatz, wenn die Ladung durch ein externes Ladegerät gesteuert wird. [q4]

Wie Abbildung 2.3 zeigt, verfügt der Ladestecker Typ 2 über sieben Kontakte. Vier Kontakte dienen zum ein-, zwei- oder dreiphasigen AC-Laden über die Leiter L1, L2, L3 und N. Für die Schutzerdung ist zusätzlich ein PE-Kontakt verbaut. Zur Kommunikation zwischen Ladesäule und Fahrzeug verfügt der Stecker außerdem über die zwei kommunikationskontakte Proximity Pilot (PP) und Control Pilot (CP). Der PP-Kontakt dient zur Festlegung der Strombelastbarkeit des Ladekabels. Die Ladeeinrichtung kann diesen Wert anhand des Widerstandes zwischen PP und PE erkennen. Somit kann sichergestellt werden, dass bei nicht fest mit der Ladeeinrichtung verbundenen Ladekabeln keine Überlastung auftritt. [q1]

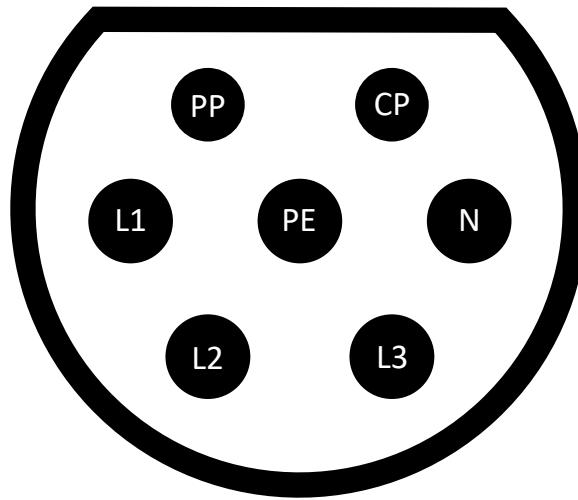


Abbildung 2.3.: Aufbau und Pinbelegung des IEC 62196 Typ 2 -Steckers. [q11]

Über den Control Pilot kann die Ladeeinrichtung mit der fahrzeuginternen Ladesteuerung kommunizieren. Umgesetzt ist dies über eine Widerstandskodierung und ein PWM-Signal. Das Fahrzeug teilt der Ladesäule über den Widerstand zwischen CP und PE mit, in welchem Zustand es sich befindet. Eingeteilt sind diese Zustände, wie in Tabelle 2.1 wiedergegeben, in die Zustände A bis F. Anhand des PWM-Signals teilt die Ladeeinrichtung dem fahrzeuginternen Ladecontroller mit, welcher Ladestrom aktuell bezogen werden kann. In der DIN EN 61851-1 sind grundsätzliche AC-Ladeströme von 6 A bis 80 A definiert. Der Ladestrom  $I_{Lade,A}$  lässt sich aus dem Tastverhältnis  $p_{PWM,\%}$  berechnen. Für ein Tastverhältnis zwischen 10 % und 85 % ergibt sich der Ladestrom aus

$$I_{Lade,A} = p_{PWM,\%} * 0,6 \quad (2.1)$$

und für ein Tastverhältnis zwischen 85 % und 96 % aus

$$I_{Lade,A} = (p_{PWM,\%} - 64) * 2,5 \quad (2.2)$$

Ladeströme unter 6 A sind nicht definiert. Außerdem kann immer nur der Ladestrom aller Phasen vorgegeben werden. Einzelne Phasen lassen sich daher nicht separat beeinflussen.

Tabelle 2.1.: Für das CP-Signal definierte Ladezustände nach IEC 62196 für den Stecker Typ 2. Quelle

Zustand	Spannung	Dekodierung
A	12 V	kein Fahrzeug angeschlossen
B	9 V	Fahrzeug angeschlossen
C	6 V	Laden
D	3 V	Laden mit Belüftung
E	0 V	keine Ladeleistung
F	-12 V	Fehler

### 2.2.3. Ladevorgang

Um einen Ladevorgang beginnen zu können muss die Ladeeinrichtung und das zu ladende Fahrzeug verbunden sein. Erkennen Fahrzeug und Ladeeinrichtung, dass diese verbunden sind, wird der Typ 2 Stecker verriegelt. Erst nach dem beidseitigen Verriegeln der Stecker beginnt der eigentliche Ladevorgang.

Prinzipiell kann während des Ladevorgangs die Ladeleistung mithilfe des CP-Signals von der Ladeeinrichtung gesteuert werden. Beeinflussen lässt sich somit aber nicht die Leistung direkt, sondern nur der Strom. Folglich wird hiermit nicht bei allen Fahrzeugen gleichermaßen die Leistung gesteuert, da die Fahrzeuge ein-, zwei- oder dreiphasig laden. Außerdem haben Versuche gezeigt, dass nicht alle Fahrzeuge das CP-Signal identisch umsetzen. So lassen sich manche PKW zwischen 6 A und 16 A in 1 A-Schritten steuern, andere wiederum nur auf die Ströme 6 A und 16 A festlegen.

Das Ladeverhalten von Hybrid- und rein elektrische Fahrzeugen ist nichtlinear und von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich. Im mittleren SOC-Bereich (state of charge) lässt sich der Ladestrom in der Regel steuern. In den Randbereichen des SOC, also bei einem SOC über 80 % und vermutlich auch bei einem sehr geringen SOC implementieren die Hersteller meist eine Zellschutzfunktion. Diese begrenzt den Ladestrom in den Randbereichen. Somit werden die Alterungsprozesse der Akkuzellen reduziert [q5]. Die Reduktion der Ladeleistung lässt sich in Abbildung 2.4 erkennen. Außerdem lässt sich dem Diagramm entnehmen, dass zur Leistungsreduktion mehrphasig ladender Fahrzeuge nur noch über eine Phase geladen wird. Folglich ändert sich der Ladestrom von Phasensymmetrisch zu Phasenasymmetrisch. Im Hinblick auf ein Lastmanagementsystem erschwert diese Tatsache das Einhalten von Grenzwerten.

## 2.3. Das Ladekonzept von ChargeHere

Die durchschnittliche Tagesfahrleistung aller in Deutschland zugelassenen Personenkraftwagen lag 2017 bei unter 40 km [q7]. Der Energiebedarf eines rein elektrisch angetriebenen PKWs im Realbetrieb liegt zwischen 0,147 kWh/km und 0,281 kWh/km [q8]. Folglich liegt der durchschnittliche tägliche Energiebedarf eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs zwischen 5,88 kWh und 11,24 kWh. Aktuelle Elektrofahrzeuge verfügen über eine AC-Ladeleistung zwischen 3,7 kW und 22 kW womit unter den dargestellten Bedingungen ein Fahrzeug im Idealfall in 16 min und im schlechtesten Fall in 3,04 h die täglich benötigte Energiemenge geladen hat. Durchschnittlich liegen die Standzeiten von PKWs bei 95 % des Tages, das entspricht etwa 23 h [q29]. Somit ist es auf Parkplätzen mit hohen Standzeiten wie in Wohnanlagen oder beim Arbeitgeber nicht notwendig für jedes Elektrofahrzeug eine eigene Ladeeinrichtung vorzuhalten. Außerdem ist die Netzanschlussleistung oftmals nicht ausreichend, um alle Fahrzeuge gleichzeitig zu laden.

Diesen Ansatz greift ChargeHere auf. Ladelösungen von ChargeHere verfügen über eine geringere Anzahl an Ladetechnik als angebundene Parkplätze. Somit müssen sich mehrere Stellplätze eine Ladeeinheit bestehend aus Ladecontroller, Zähler und die Schutzrichtung teilen. Die Ladeeinheiten werden mithilfe einer Multiplexermatrix den einzelnen

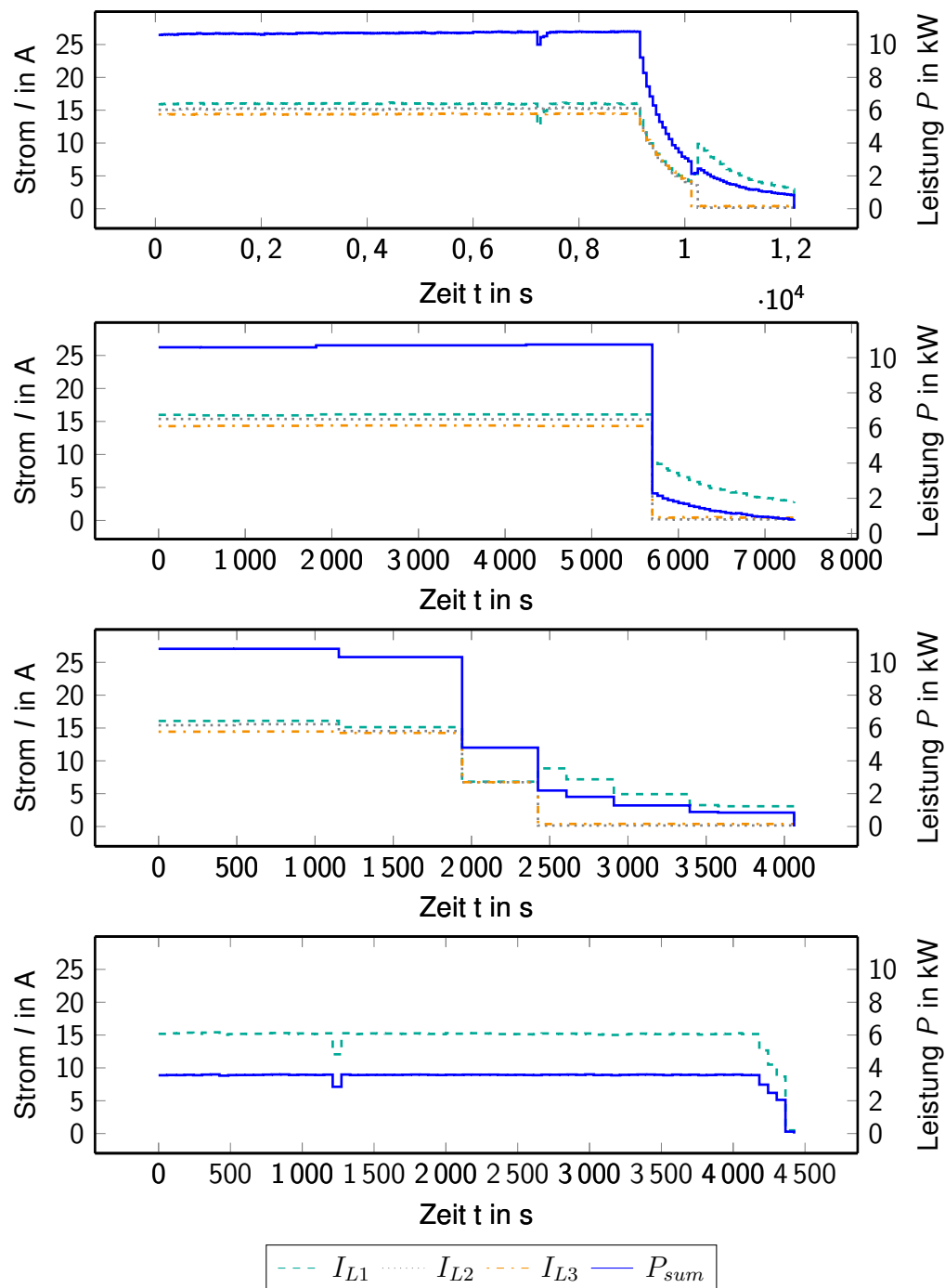


Abbildung 2.4.: Zeitlicher Verlauf der Ladeströme der Phasen  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  und Ladeleistung beim vollständigen Laden eines dreiphasig angebundenen Elektrofahrzeugs. oben, Mitte oben, Mitte unten: Dreiphasig ladende Fahrzeuge mit unterschiedlichem Ladeverhalten. unten: Einphasig ladendes Fahrzeug.

Parkplätzen zugeschaltet. Hierdurch ist es möglich kosteneffizient an vielen Parkplätzen eine Lademöglichkeit zu schaffen.

Die Standardversion der ChargeBase von ChargeHere verfügt über acht Ladeeinheiten und kann bis zu zwanzig Stellplätze anbinden. Nicht von jeder Ladeeinheit aus ist es



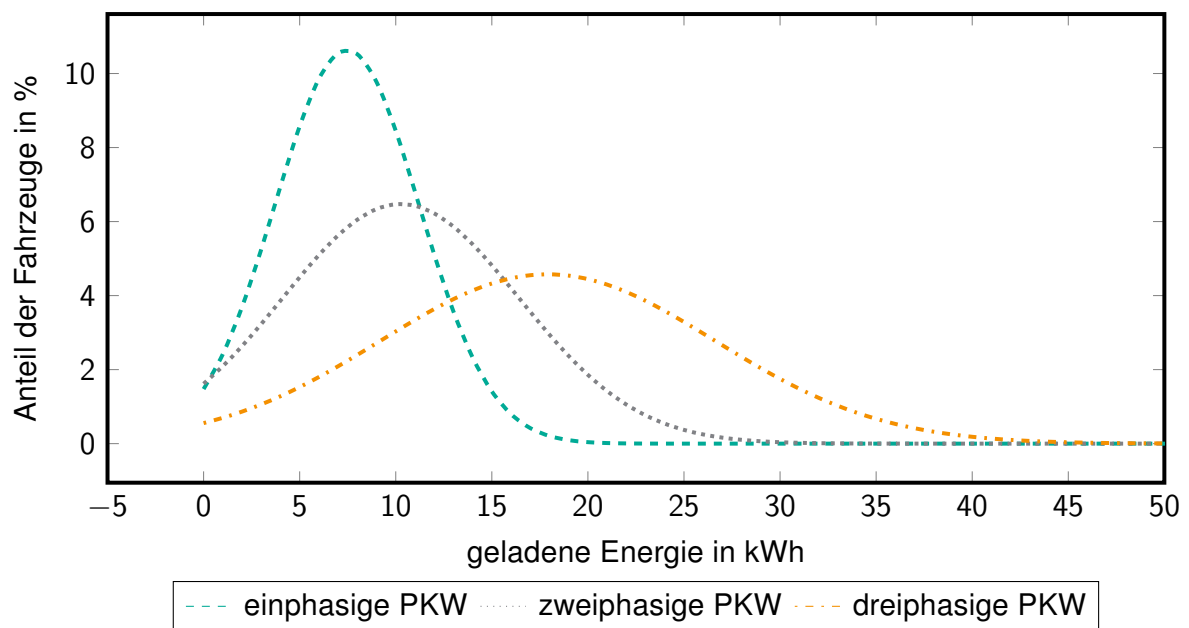


Abbildung 2.5.: Normalverteilung der geladenen Energiemengen. Aufgegliedert für einphasige-, zweiphasige und dreiphasige Fahrzeuge. Ermittelt aus 310 Ladeprofilen privater und nicht privater Fahrzeuge im Parkhaus der EnBW.

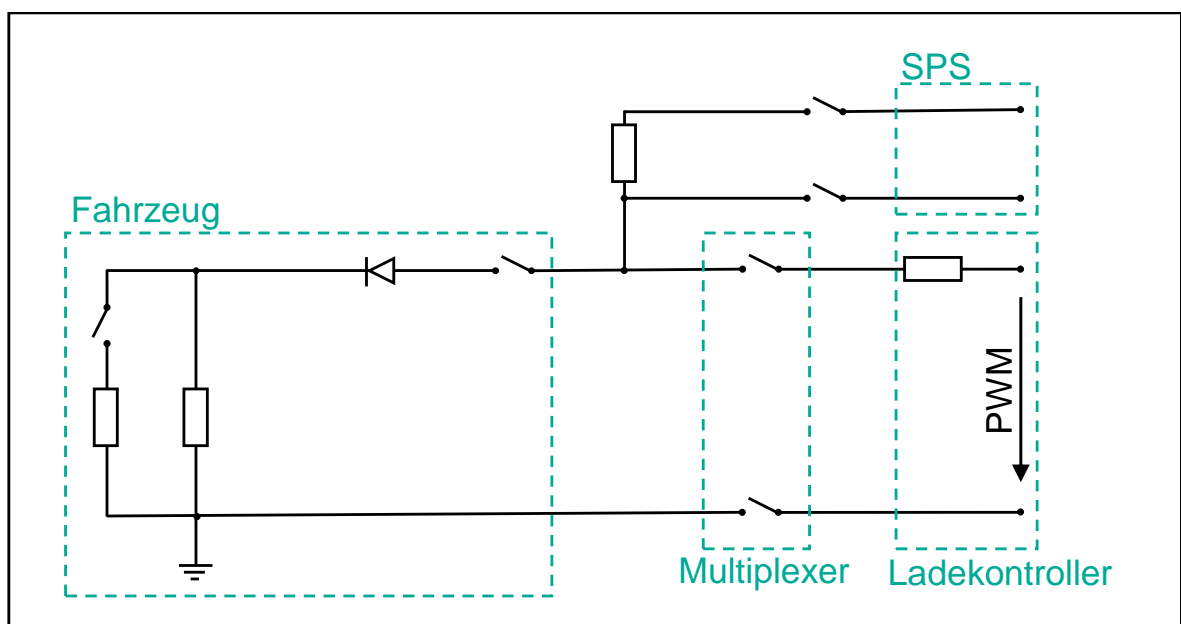


Abbildung 2.6.: Schaltung zur Überwachung des CP-Signals eines Elektrofahrzeugs für das Multiplexerkonzept von ChargeHere.

möglich auf alle Stellplätze zuzugreifen, aber jeder Stellplatz ist an mehrere Ladeeinheiten angebunden werden. Erkennt die SPS mithilfe der Schaltung aus Abbildung 2.6 ein neu angeschlossenes Fahrzeug, kann das System über die Multiplexer jeweils eine Ladeeinheit mit maximal fünf Parkplätzen verbinden. Diese Multiplexermatrix ist Schematisch

in Abbildung 2.7 dargestellt. Die Abbildung zeigt zudem von welcher Ladeeinheit die ChargeBase Fahrzeuge auf den jeweiligen Stellplätze laden kann.

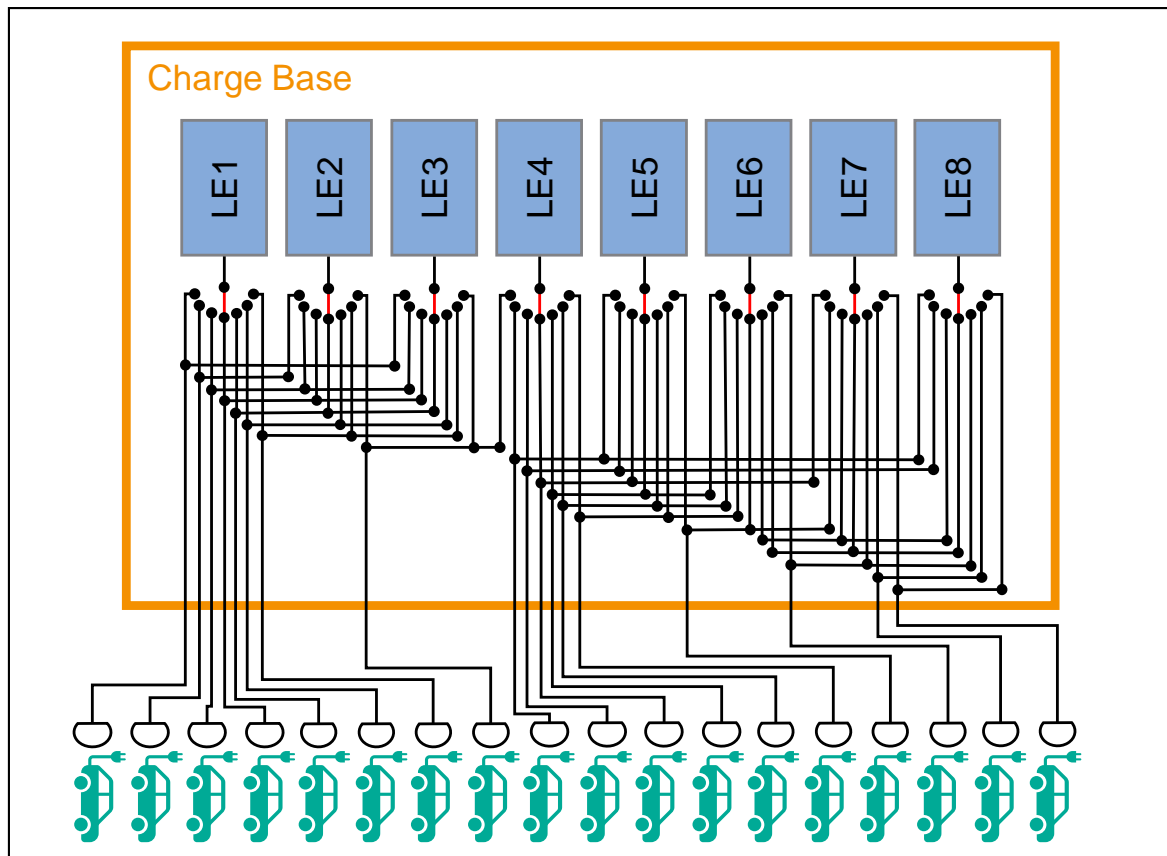


Abbildung 2.7.: Erreichbarkeit der Ladepunkte von den Ladeeinheiten (LE) über die Multiplexer der ChargeBase von ChargeHere.

Da bei diesem Ladekonzept nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig laden können, bedarf es einer Logik zur diskriminierungsfreien Vergabe der Ladezeiten. Hierfür wird ein Score-Konzept verwendet. Das heißt, jedes Fahrzeug bekommt zum Zeitpunkt der Ankunft einen immer gleichen Score. Während ein Fahrzeug lädt sinkt dieser Score abhängig von der Ladezeit. Sobald mehr Fahrzeuge laden möchten als Ladeeinheiten vorhanden sind, vergleicht das System den Score aller Fahrzeuge miteinander. Unterschreitet der Score eines ladenden Fahrzeugs den eines nicht ladenden Fahrzeugs um eine festgelegte Hysterese ändern sich die Zustände. Das bisher ladende Fahrzeug geht in die Ladepause, das Fahrzeug mit dem höheren Score bekommt über die Multiplexer die nun frei gewordenen Ladeeinheit zugeschaltet. Voraussetzung für diesen Zustandswechsel ist, dass beide Parkplätze über den Multiplexer auf die gleiche Ladetechnik zugreifen können.

Aufgrund des Ladekonzepts kommt es beim Laden der Fahrzeuge immer wieder zu Ladepausen. Ursache ist eine höhere Anzahl von Ladepunkten als Ladeeinheiten. Findet jedoch direkt nach dem Anschließen des Fahrzeugs kein Ladevorgang statt, so geht der Ladecontroller des Fahrzeugs in den Ruhezustand. Aus dem Ruhezustand heraus ist es nicht mehr möglich das Fahrzeug zu Laden. Wird das Fahrzeug jedoch nach dem Anschließen zumindest kurzzeitig geladen, bleibt der fahrzeuginterne Ladecontroller auch während Ladepausen aktiv. Dieser Vorgang wird als Anladen bezeichnet.

Um die Netzbelastung bei ein- und zweiphasig ladenden Fahrzeugen möglichst symmetrisch zu halten, muss der Installateur die Leiter bei jedem Parkplatz versetzt anschließen. Für eine Installation im Niederspannungsnetz genügt dies jedoch nicht um die Phasensymmetrie nach VDE-EN-4100 zu gewährleisten. Wird die Anlage von einem firmen- oder parkhauseigenen Transformator gespeist kann die Anlage betrieben werden.

## **2.4. Restriktionen beim Anschluss an das Stromnetz**

AC-Ladeeinrichtungen werden immer in der Niederspannung angeschlossen. Entweder sind diese Ladeeinrichtungen direkt an das öffentliche Niederspannungsnetz angeschlossen oder über einen privaten Transformator an eine höhere Spannungsebene. Ist die Anlage direkt an das Niederspannungsnetz angeschlossen müssen die technischen Anschlussrichtlinien in der Niederspannung aus Unterabschnitt 2.4.1 berücksichtigt werden. In der Regel ist der Netzanschluss bzw. die Niederspannungsseite des Transformators über eine NH-Sicherung abgesichert. Alternativ ist die Absicherung über Leitungsschutzschalter gegeben. Folglich kann die mögliche Fehlertoleranz des Lastmanagementsystems anhand deren Auslöseverhalten wie in Unterabschnitt 2.4.2 quantifiziert werden.

### **2.4.1. Technische Anschlussrichtlinien in der Niederspannung**

Selbst größere Zahlen an Ladepunkten sind teilweise an das öffentliche Niederspannungsnetz angeschlossen. Hierbei müssen die technischen Anschlussbedingungen in der Niederspannung berücksichtigt werden. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) veröffentlicht die technischen Anschlussbedingungen, die auf der VDE-AR-N 4100 basieren. Die aktuelle Ausgabe ist aus dem Jahr 2011, die aktuelle VDE Richtlinie von 2019 ist in diese Ausgabe noch nicht eingebunden. Da die VDE-AR-N 4100 bereits in Kraft ist, bezieht sich das Folgende ausschließlich darauf.

Ein wichtiger Aspekt für den Betrieb von Ladeeinrichtungen in der Niederspannung ist die Phasensymmetrie. Grundsätzlich muss der Betreiber einer solchen Anlage dafür sorgen, dass die Phasen nur mit einer maximalen Unsymmetrie von 4,6 kVA belastet werden. Aus diesem Grund müssen Ladeeinrichtungen mit einer Ladeleistung von über 4,6 kVA dreiphasig angeschlossen werden. Üblicherweise liegt die Ladeleistung einphasig angebundener Elektrofahrzeuge bei etwa 3,7 kVA. Sofern keine Maßnahmen zur Einhaltung der Symmetrie umgesetzt sind, darf nur ein 1-Phasiges Elektrofahrzeug pro Phase angebunden werden. Außerdem ist der Netzbetreiber berechtigt festzulegen auf welcher Phase eine einphasige Ladeeinrichtung angebracht werden muss. [q6]

Um dennoch mehrere Elektrofahrzeuge auf einer Phase laden zu können, muss eine Symmetrieeinrichtung implementiert werden. Diese garantiert in Summe das Einhalten des 4,6 kVA Grenzwertes. Jedoch darf der Betreiber trotz Symmetrieeinrichtung nur maximal 13,8 kVA einphasig anbinden. Zur Berechnung der Symmetrie dient der gleitende 1-Minuten-Wert. Verletzungen der Symmetrie muss die Symmetrieeinrichtung innerhalb von 100 ms korrigieren. Kommt es zu einem Ausfall der Symmetrieeinrichtung dürfen pro Phase nur noch 4,6 kVA einphasige Lasten betrieben werden. [q6]

In den Anwendungsregeln sind zudem besondere Anforderungen an Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge genannt. So sind Ladeeinrichtungen mit einer Ladeleistung von über 4,6 kVA anmeldepflichtig [q9]. Außerdem können Ladeeinrichtungen in das Lastmanagementsystem des Netzbetreibers eingebunden werden. Auch der Leistungsfaktor ist vorgegeben, wird jedoch beim AC-Laden von der fahrzeuginternen Ladeelektronik beeinflusst und lässt sich daher nicht vom Ladestellenbetreiber verändern. Alle Ladeeinrichtungen mit einer Leistung von über 12,5 kVA müssen zudem durch den Netzbetreiber steuerbar sein. Dies kann durch eine Leistungssteuerung, eine zeitliche Steuerung oder eine Unterbrechbarkeit realisiert werden.

Die Einhaltung der Vorgaben durch die VDE-AR-N 4100 müssen mittels Konformitätserklärung sichergestellt werden.

### 2.4.2. Auslöseverhalten von Überstromschutzeinrichtungen

Überstromschutzeinrichtungen werden in der Niederspannung als Leitungsschutzschalter mit elektromechanischer Schutzfunktion oder als Schmelzsicherungen verwendet. Das Auslöseverhalten einer elektromechanischen Überstromschutzeinrichtungen ist dem einer Schmelzsicherung nachempfunden. Eingesetzt werden Überstromschutzeinrichtungen unter anderem zum Absichern von Leitungen und Transformatoren und somit auch von Ladeinfrastruktur. Sicherungen sind für verschiedene Ströme und Spannungen verfügbar. Die Auslösekennlinien am Beispiel einer NH-Sicherungen für eine Spannung von 400 V sind in Grafik 2.8 dargestellt. Durch den typischen Strom-Zeit-Verlauf lösen diese Sicherungen mit steigendem Strom exponentiell schneller aus. [q20]

An einem Beispiel wird das Auslöseverhalten von NH-Sicherungen in Verbindung mit einer ChargeBase von ChargeHere quantifiziert. Hierbei wird eine ChargeBase mit maximal 88 kW Ladeleistung angenommen. Somit liegt der maximal mögliche Leiterstrom bei 128 A. Für den Fall einer Absicherung der Zuleitungen auf 100 A müsste das Lastmanagement die Leistung auf 78 % der Nennleistung begrenzen. Kann das Lastmanagement die Ladeleistungen nicht korrekt begrenzen führt das zu einem maximalen Überschreiten der Leiterströme von 28 A. Nach Abbildung 2.8 könnte die Anlage in diesem Zustand für etwa zwei Stunden weiter betrieben werden.

Das vorgestellte Beispiel ist eher überspitzt zu betrachten. In der Praxis ist eine vollständige Auslastung der Anlagen mit den derzeit verfügbaren Fahrzeugen eher die Ausnahme, da nicht alle Fahrzeuge 3-Phasig geladen werden. Außerdem wird der Strom meist nicht von der Zuleitung an die ChargeBase, sondern der Summe der Leistungen, am Netzanschlusspunkt bzw. Transformator begrenzt. Da hier meist eine größere Leistung angebunden ist, sind auch die Sicherungsströme höher. Folglich ist eine deutlich höhere Überlastung möglich.

Im Praxisbetrieb sollen die vorgegebenen Ströme vom Lastmanagement nicht überschritten werden. Diese Abschätzung dient ausschließlich der Quantifizierung möglicher Auswirkungen ausgehend von einer Trägheit des Systems.

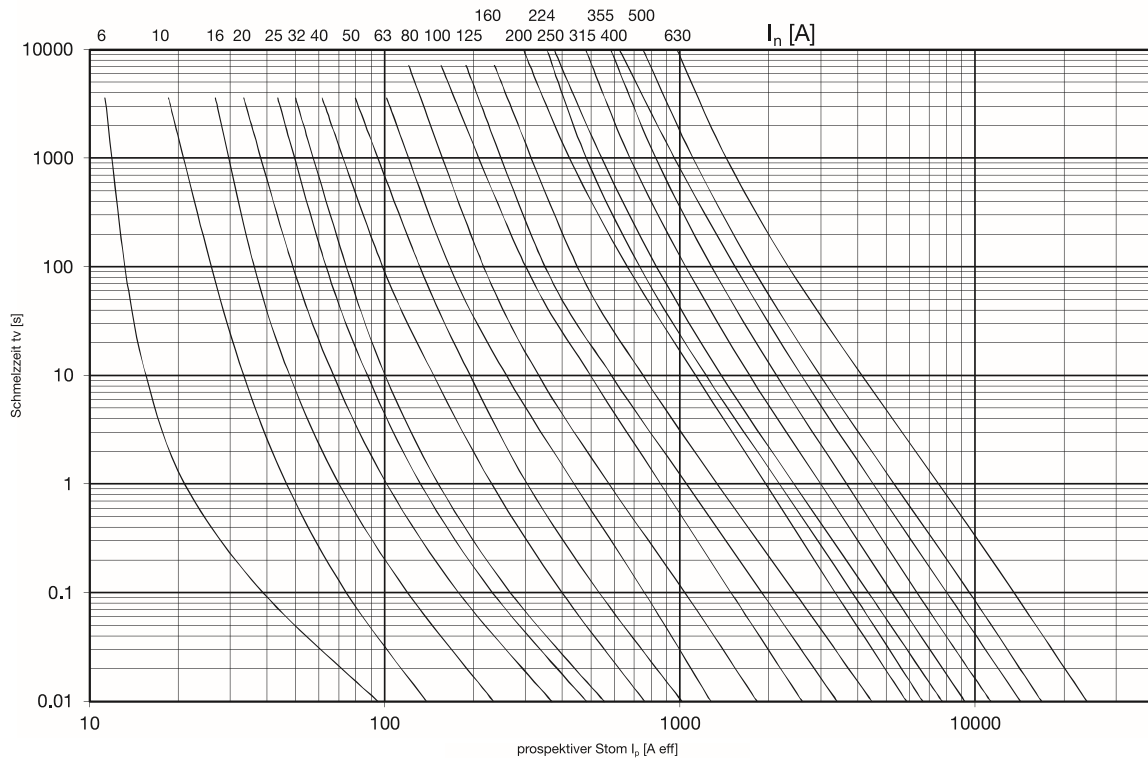


Abbildung 2.8.: Beispiel einer mittleren Zeit-/Strom-Kennlinie von NH-Sicherungsätzen nach DIN Gr.00-3 gG AC 400 V. [q20]

## 2.5. Lastmanagement

Grundsätzlich dient ein Lastmanagement dazu, die angeschlossene Last zu beeinflussen und hierdurch einen festgelegten Grenzwert nicht zu überschreiten. Die Beeinflussung kann hierbei mit einer Regel- oder Steuereinrichtung erreicht werden. Das Lastmanagement beim Laden von Elektrofahrzeugen sollte die Leiterströme, die Leiterleistungen oder die summarische Leistung beinhalten. Des Weiteren kann das Lastmanagement in diesem Kontext auch die Funktionen einer Symmetrieeinrichtung übernehmen. Wird die Lastgrenze statisch festgelegt, spricht man von einem statischen Lastmanagement. Im Gegensatz hierzu werden beim dynamischen Lastmanagement meist Grenzwerte von einem Monitoringsystem oder übergeordneten Lastmanagement dynamisch vorgegeben. Außerdem gibt es das priorisierte Lastmanagement. Bei diesem wird anhand gesammelter Daten oder externer Vorgaben die Lastverteilung angepasst. Das statische, dynamische und priorisierte Lastmanagement wird im Folgenden genauer erklärt.

### 2.5.1. Statisches Lastmanagement

Das statische Lastmanagement wird bei zeitlich unveränderlichen Grenzwerten eingesetzt. Zu den Einsatzgebieten zählt beispielsweise eine begrenzte Anschlussleistung, eine begrenzte Erzeugungsleistung in einem Inselnetz oder eine pauschale Leistungsbegrenzung aufgrund eines zeitlichen Engpasses. Außerdem ist eine Symmetrieeinrichtung

für die Niederspannung nach Abschnitt 2.4.1 ein statisches Lastmanagementsystem, da das System hier einen gleichbleibenden Wert eingehalten muss. In Abbildung 2.9 ist beispielhaft die Funktion des statischen Lastmanagements dargestellt. Die statische Lastgrenze ist hierbei auf 40 kW festgelegt. Alle Leistungen unter 40 kW werden nicht beeinflusst. Erst wenn die angeschlossenen Lasten die Lastgrenze überschreiten greift das Lastmanagementsystem ein.

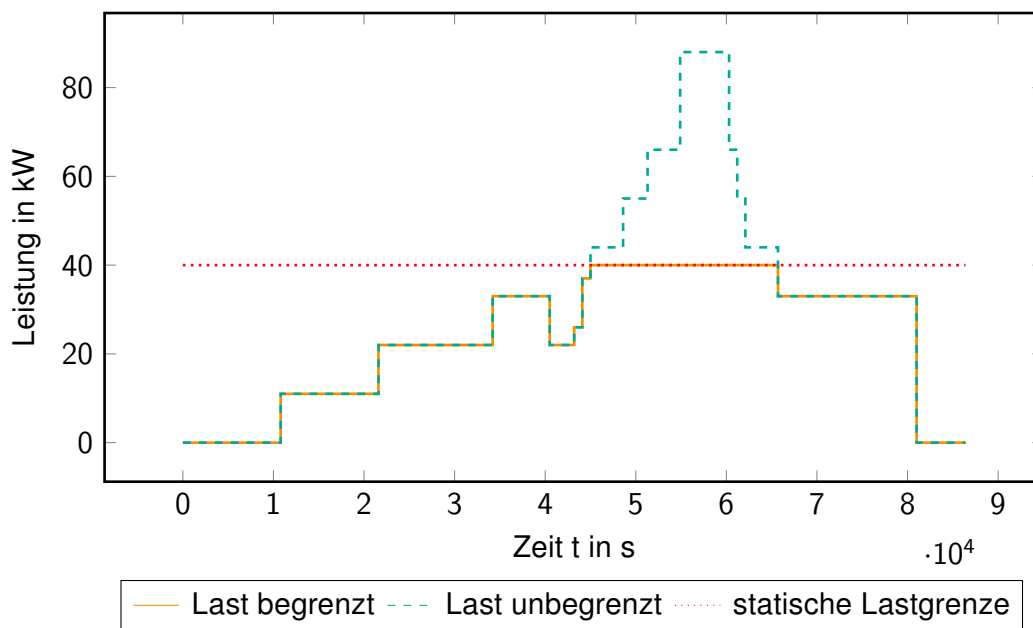


Abbildung 2.9.: Exemplarische Darstellung der Funktion des statischen Lastmanagements bei einer statischen Lastgrenze von 40 kW.

### 2.5.2. Dynamisches Lastmanagement

Ein dynamisches Lastmanagement verfügt über zeitlich veränderliche Lastgrenzen. Diese werden dem System von außen vorgegeben. Eingesetzt wird dieses bei zeitweiligen Engpässen am Netzanschluss oder falls die Anschlussleistung mit anderen, nicht konstanten Lasten geteilt werden muss. Ein Beispiel hierfür ist das Parkhaus eines Unternehmens mit Großküche. In Großküchen fallen zeitweise hohe Spitzenlasten an. Soll über den selben Netzanschluss Ladeinfrastruktur angeschlossen werden, kann es wirtschaftlicher sein die Ladeleistung zeitweise durch ein dynamisches Lastmanagement zu reduzieren, anstatt den Netzanschluss auszubauen. Als Eingangsparmeter können hierfür gemessene Leistungswerte vom Netzanschlusspunkt oder Prognosen verwendet werden. Ein solches dynamisches Lastmanagement ist schematisch in Abbildung 2.10 dargestellt. Das Diagramm zeigt die zeitweilige Leistungsreduktion zwischen 22 kW und 90 kW.

### 2.5.3. Priorisiertes Lastmanagement

Das priorisierte Lastmanagement wird verwendet um festgelegte Lasten bei einer Leistungsreduktion vorrangig zu betreiben. Benötigt wird dies z.B. um Fahrzeuge mit kür-

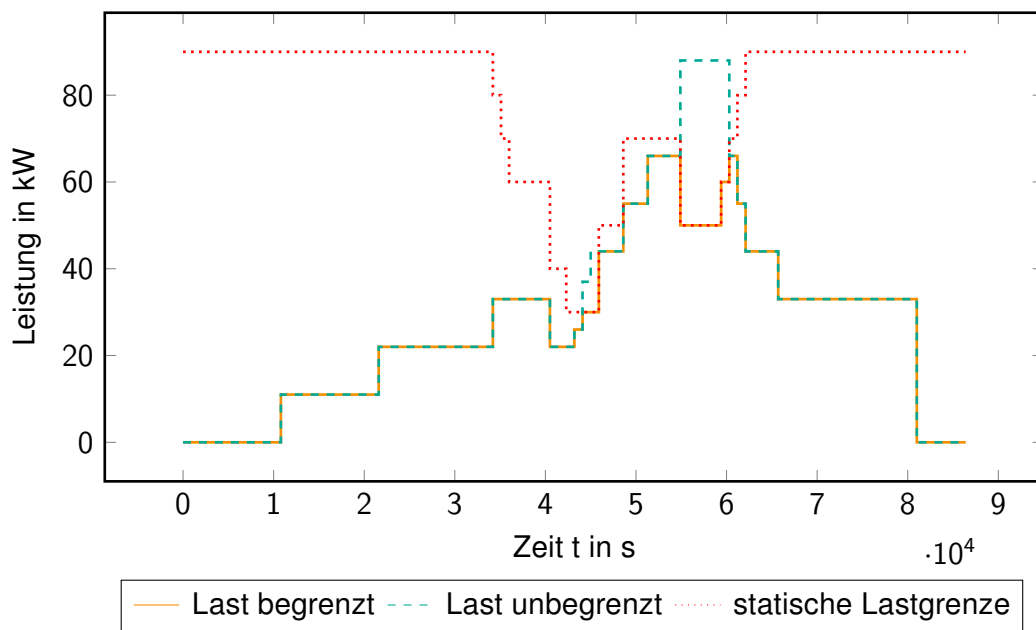


Abbildung 2.10.: Exemplarische Darstellung der Funktion des dynamischen Lastmanagements bei einer dynamischen Lastgrenze zwischen 30 kW und 90 kW.

zeren Standzeiten denen mit hoher Standzeit zu bevorzugen. Abweichend zur Standzeit kann auch die anstehende Fahrstrecke oder der SOC des Fahrzeugs als Grundlage hierfür genommen werden. Da es derzeit nicht möglich ist zwischen Fahrzeug und Ladeeinrichtung zu kommunizieren, müssen Daten über Standdauer, SOC oder benötigte Reichweite dem Lastmanagement extern vorgegeben werden. Alternativ ist es möglich anhand historischer Daten der Ladevorgänge eines Fahrzeugs eine Priorisierung zu ermitteln. Die Grafik 2.11 zeigt exemplarisch wie sich ein priorisiertes Lastmanagement im Fall einer Leistungsbegrenzung verhält. Am Beispiel von drei Fahrzeugen, von denen eines priorisiert betrieben wird, ist in der Abbildung die Aufteilung der Leistungsreduktion gezeigt. Während der priorisierte PKW nach Reduktion der Lastgrenze uneingeschränkt geladen wird, ist die Ladeleistung der anderen PKWs auf 60 % begrenzt.

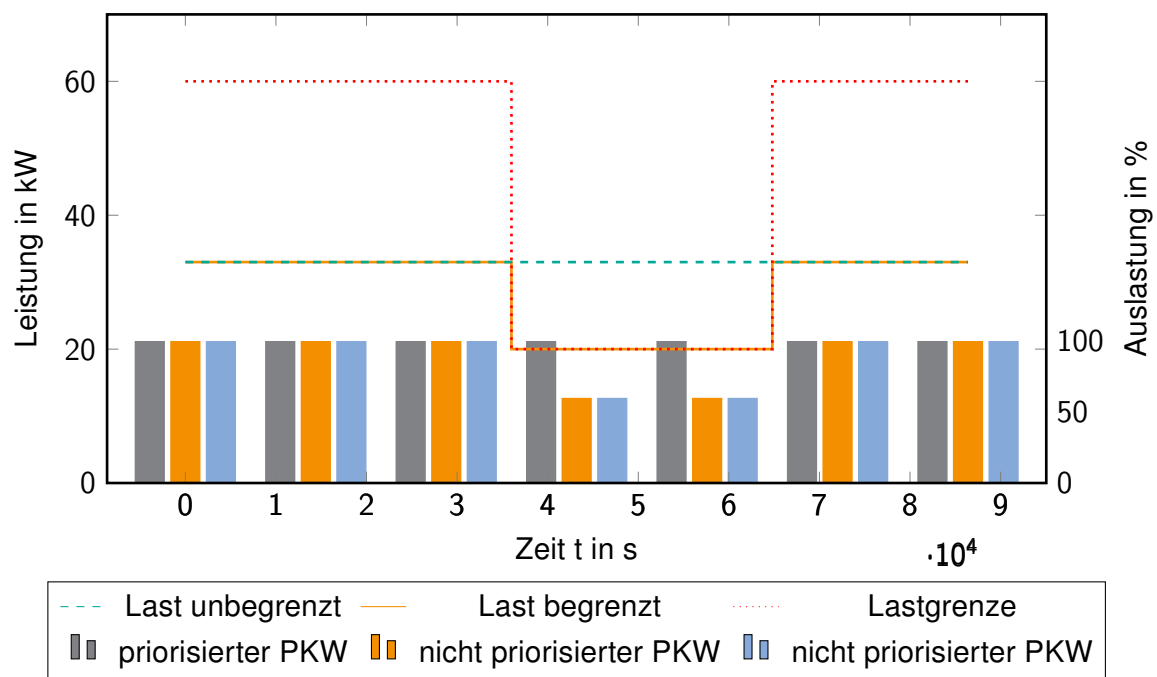


Abbildung 2.11.: Exemplarische Darstellung der Funktion des priorisierten Lastmanagements bei einer dynamischen Lastgrenze von 30 kW bzw. 20 kW mit drei angeschlossenen Fahrzeugen, von denen ein Fahrzeug priorisiert geladen wird.





### 3. Kozeptionierung

Lastmanagementsysteme zur Koordination von Ladevorgängen sind meist Herstellerspezifisch entwickelt und nicht öffentlich verfügbar. Außerdem ist es nur schwer möglich an Informationen über das Steuerverhalten von Elektrofahrzeugen zu gelangen. Die einzige Möglichkeit ist hierbei das eigenhändige Überprüfen möglichst vieler Fahrzeuge. Vorliegende Erkenntnisse über das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen werden in Kapitel 2 vorgestellt. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden in diesem Kapitel zwei verschiedene Konzepte für ein Lastmanagementsystem entwickelt. Zum Einen das regelungstechnische Lastmanagement in Abschnitt 3.1 und zum Anderen das optimierungsbasierte Lastmanagement in Abschnitt 3.2.

#### 3.1. Regelungstechnisches Lastmanagementkonzept

Beim regelungstechnischen Lastmanagement soll ein vorgegebener Grenzwert durch eine Regelung eingehalten werden. Das heißt, das Lastmanagementsystem definiert das von der Ladeeinheit ausgehende Steuersignal an das Elektrofahrzeug anhand der Differenz zwischen dem angestrebten und dem aktuell vorliegenden Zustand. Das Lastmanagement soll Leistungen, Leiterströme und die Phasensymmetrie einhalten. Folglich sind diese elektrischen Kenngrößen die Sollwerte des Reglers. [q28]

Anhand der in Kapitel 2 vorgestellten Abläufe beim Laden eines Elektrofahrzeugs kann ein entsprechendes Regelkonzept abgeleitet werden. Das Regelkonzept des Lastmanagements ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Es besteht aus den sechs Elementen: Führungsgröße, Regelglied, Steller, Steck, Messeinrichtung und Messeinrichtung. Allen Elementen in der Grafik sind die entsprechenden Bauteile, die dieses Element im Realbetrieb ausführen zugeordnet. Im Folgenden wird der Aufbau genauer vorgestellt.

Die Führungsgröße gibt an, auf welchen Wert der Regler das System regeln soll [q28]. In diesem Fall sind die Führungsgrößen: Leiterstrom, Leistung, Phasensymmetrie und Priorisierung denkbar. Prinzipiell kann die Führungsgröße statisch oder dynamisch sein. Bei dynamischen Führungsgrößen muss allerdings das Einschwingverhalten des Reglers berücksichtigt werden. Ändert sich die Führungsgröße in zu geringen Zeitabständen verschlechtert dies das Regelverhalten.

Das Regelglied ist der eigentliche Regler, der die Differenz zwischen Führungsgröße und gemessener Größe interpretiert. Als Ausgangsgröße gibt das Regelglied einen dem Steller angepassten Wert zurück. Als Regelglied in Frage kommt ein P-, PI-, PD- und PID-Regler. Implementiert wird der Regler auf dem RevPi und somit nicht auf der Steuerung (SPS) selbst. [q28]

Beim Steller handelt es sich um die Einrichtung, die den Stellparameter umsetzt [q28]. Das Ausgangssignal des Stellers ist der Stellstrom. Mögliche Stellströme sind 0 A, 6 A ...

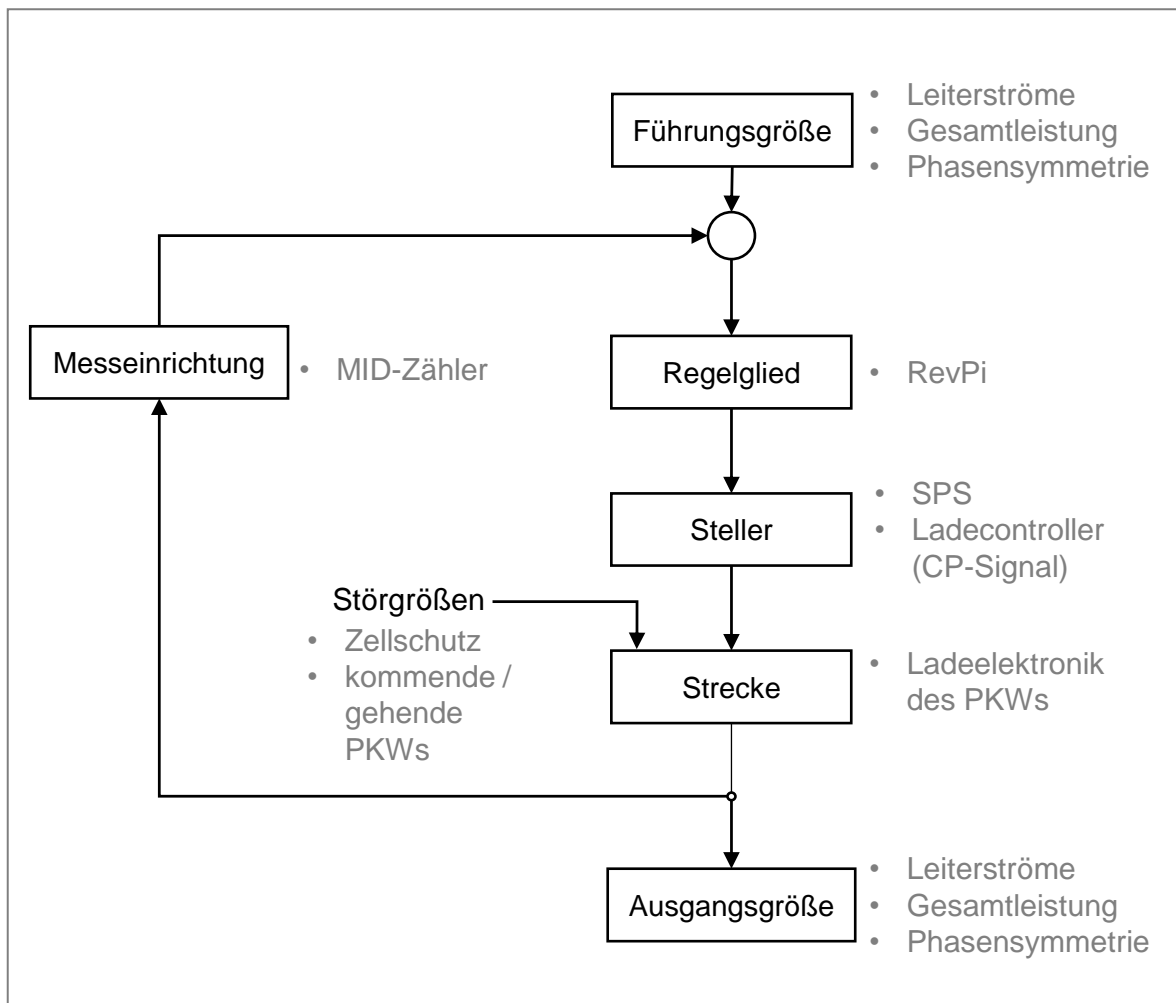


Abbildung 3.1.: Variables Lademodell eines Elektrofahrzeugs zur Erprobung des Lastmanagements. Erstellt in Matlab/Simulink.

16 A. In der Praxis werden diese Stellströme als PWM-Signal kodiert <sup>und</sup> an das Fahrzeug weitergegeben. [q28]

Das Element ~~Strecke~~ <sup>weiche</sup> des Regelkreises ist die Einheit, die auf Grundlage der vorliegenden Situation und des Stellparameters <sup>den</sup> neuen Zustand definiert [q28]. Die Strecke ist in diesem Fall das zu ladende Elektrofahrzeug, insbesondere dessen Ladeelektronik. Folglich wird durch die Strecke der Stellstrom in eine Ladeleistung umgewandelt.

Auf die Strecke wirken Störgrößen ein. Störgrößen sind sowohl vorhersehbare als auch nicht vorhersehbare Ereignisse, die zu einer Abweichung vom Sollwert führen [q28]. Zu den Störgrößen beim Laden von Elektrofahrzeugen zählen Leistungsänderungen für den Zellschutz, Fehler beim Laden, das Kommen und Gehen von Fahrzeugen, aber auch das Unterbrechen von Ladevorgängen durch den Nutzer oder das Fahrzeug selbst. Diese Störgrößen erschweren das <sup>Einhalten</sup> eines Sollwerts und müssen bei der Parametrierung des Regelglieds berücksichtigt werden [q28].

Werte, die von der Strecke resultieren sind die Ausgangsgrößen des Reglers [q28]. Mögliche Ausgangsgrößen sind ~~die~~ Ladeleistung, Leiterströme und ~~die~~ Phasensymmetrie.

Um die aktuell vorliegenden Werte ermitteln zu können, verfügt ein Regelkreis immer über eine Messeinrichtung [q28]. ~~In diesem Regelkreis werden als Messeinrichtung die für die Abrechnung verbaute MID-Zähler verwendet.~~ Von den MID-Zählern können die Wirkleistung sowie die Leiterströme ausgegeben werden. Die Frequenz in der das System die MID-Zähler ausliest hängt von der Anzahl der Zähler ab, da das System diese nacheinander abfragt. Im Realbetrieb liegt die Auslesetaktung ~~der~~ acht verbaute Zählern ~~etwa bei fünf Sekunden.~~ mit

~~bei etwa~~ Theoretisch ist die Übertragungsfunktion von Steller und Strecke eine Proportionale Funktion des Stellstroms  $I_{Stell}$ , der Phasen über die das Fahrzeug Leistung bezieht  $x_L$  und der vorliegenden Leiterspannungen  $U_L$ . Hieraus ergibt sich für die Summenleistung ~~die~~ Übertragungsfunktion:

der

$$P_{Sum} = I_{Stell} * (x_{L1} * U_{L1} + x_{L2} * U_{L2} + x_{L3} * U_{L3}) \quad (3.1)$$

In der Praxis trifft diese Funktion allerdings nur bedingt zu. Ursache ist die von Fahrzeug zu Fahrzeug abweichende Umsetzung der Stellströme. Des Weiteren ist der verwendete Ladecontroller in der ChargeBase von ChargeHere nur in der Lage Stellströme als Integer-Werte umzusetzen. Somit können nur ganzzahlige Stellströme realisiert werden. **Hinzu kommt die Eingrenzung der Ladeströme auf Werte zwischen 6 A und 80 A durch die DIN-EN-61851 bzw. zwischen 6 A und 16 A durch die Ladeeinrichtung.** Hieraus ergibt sich eine Stufenfunktion in 1 A-Schritten, je nach Fahrzeug sogar noch größeren Schritten, die auf Werte zwischen 6 A und 16 A begrenzt sind. Dadurch

Ein regelungstechnisches Lastmanagement für das Laden von Elektrofahrzeugen benötigt nur eine geringe Rechenleistung, was in jedem Fall von Vorteil ist. Die gesamte Steuerung der Ladevorgänge ist jedoch nicht-kontinuierlich und nicht mit vertretbarem Aufwand zuverlässig umsetzbar. Diskrete Vorgänge, wie beispielsweise in digitalen Systemen, lassen sich mit angepassten Reglern kontrollieren, doch die Diskretisierung ist hier sehr grobgranular. Zudem verhält sich jeder Fahrzeugtyp unterschiedlich. Regelparameter müssten daher aktiv an den jeweiligen Fahrzeugtyp angepasst werden. Durch die steilen Flanken, beim Steuern von Elektrofahrzeugen, kann der Regler außerdem kaum auf eine Laständerung reagieren. Des Weiteren ist das System von Störgrößen geprägt, da sich die Lastzustände stetig ändern. **Hinzu kommt die dynamische und für eine effiziente Regelung zu große Zeitspanne die zwischen dem Auslesen der Zählerwerte liegt.** Überdies hinaus müsste ein Regler, der mehrere Fahrzeuge und Parameter gleichzeitig regelt mehrstufig aufgebaut sein. Alle diese Aspekte sprechen gegen ein regelungstechnisches Lastmanagement, weshalb dieses Konzept nicht weiter verfolgt wird. zusätzlich

## 3.2. Optimierungsbasiertes Lastmanagementkonzept

Das optimierungsbasierte Lastmanagement verfolgt im Gegensatz zum regelungstechnischen Lastmanagement den Ansatz eines rückkopplungslosen Lastmanagements. Somit wird nicht der aktuelle Zustand als Grundlage für das Lastmanagement verwendet, sondern vorhandene Daten. Jedes Fahrzeug wird anfangs vom System geprüft und die gemessenen Werte hinterlegt. Anhand dieser gemessenen Werte prüft das System alle Möglichkeiten auf das Einhalten der Grenzwerte. Zudem bewertet das System alle mögli-

werden  
ab, um die Grenzwerte einzuhalten.

einhalten

chen Kombinationen <sup>um</sup> die die vorgegebenen Grenzwerte <sup>einhalten</sup> einhalten. Die Kombination mit der besten Bewertung setzt das System anschließend um.

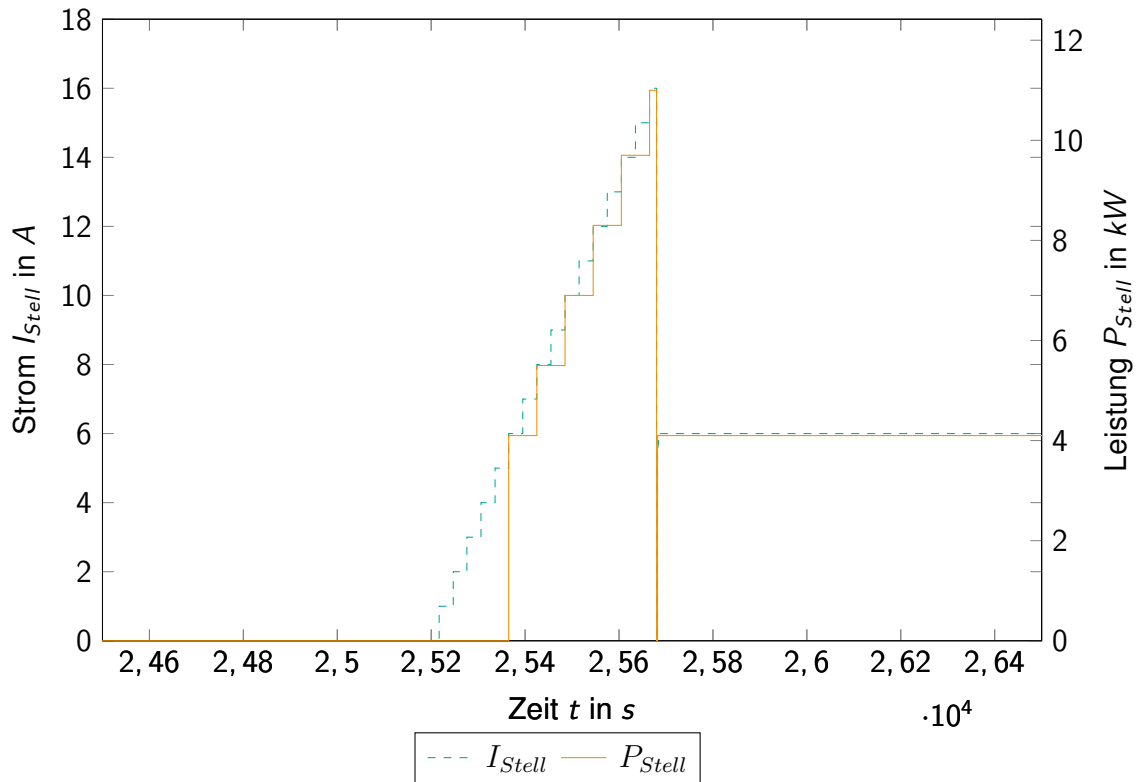


Abbildung 3.2.: Ablauf des Prüfzykluses zur Bestimmung des Fahrzeugverhaltens bei einem dreiphasig ladenden Fahrzeug.

Zur Prüfung des Ladeverhaltens wird jedes Fahrzeug nach dem Anschließen einem Prüfzyklus unterzogen. In diesem Prüfzyklus gibt das System dem zu prüfenden Fahrzeug für eine festgelegte Zeitspanne jeden möglichen Stellstrom vor und misst hierbei die resultierende elektrischen Größen. Geprüft werden alle ganzzahligen Ampereströme zwischen 6 A und 16 A. Den Stellstrom 0 A muss das System nicht prüfen, da dieser durch das Beenden des Ladevorgangs in jedem Fall möglich ist. Sind alle elf Stellströme geprüft stellt das System die Resultate einer Optimierungsfunktion zur Verfügung. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft den Ablauf eines Prüfzyklus für ein 3-Phasig ladendes Fahrzeug. Bei diesem handelt es sich um einen Fahrzeugtyp, der Stellströme nur in 2 A-Schritten umsetzen kann.

In der Regel ergeben sich beim Überprüfen aller möglichen Kombinationen der Stellströme und Fahrzeuge mehrere Varianten, die alle vorgegebenen Grenzwerte einhalten. Unter diesen Varianten sind allerdings auch Kombinationen, die die Leistung deutlich unterschreiten oder einzelne Fahrzeuge mit maximaler Leistung laden, andere Fahrzeuge hingegen gar nicht laden. Um auch diese Aspekte berücksichtigen zu können wird zusätzlich ein Score eingeführt. Mit diesem Score soll die Ausnutzung der Grenzleistung und gerechte Verteilung der Ladeleistung quantifiziert werden.

Der Score zur Bewertung der Kombination von Stellströmen und Fahrzeugen berechnet sich aus zwei Parametern. Ein Parameter ist die Abweichung zwischen der Leistung der

jeweiligen Kombination  $P_{Kombi}$  und der einzuhaltenden Grenzleistung  $P_{Grenz}$ . Zweiter Parameter ist die Leistungsdifferenz zwischen dem Fahrzeug mit der höchsten vorgegebenen Ladeleistung  $P_{PKW,max}$  und dem mit der geringsten vorgegebenen Ladeleistung  $P_{PKW,min}$ . In beiden Fällen gilt es eine möglichst geringe Abweichung zu erreichen. Um die Abweichung verdeutlichen zu können berechnet das System die Quadrate der Abweichungen. Somit ergeben sich die Parameter  $Score_{Nutz}$  und  $Score_{eqPKW}$  aus:

$$Score_{Nutz} = (P_{Grenz} - P_{Kombi})^2 \quad (3.2)$$

$$Score_{eqPKW} = (P_{PKW,max} - P_{PKW,min})^2 \quad (3.3)$$

Der gesamte Score ergibt sich aus der Summe von  $Score_{Nutz}$  und  $Score_{eqPKW}$ . Die beiden Scores können durch eine unterschiedliche Gewichtung an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. So kann der Algorithmus hingehend zu einer hohen Gleichmäßigkeit oder einer hohen Ausnutzung der Lastgrenze optimiert werden.

Sobald ein Fahrzeug angeschlossen ist, beginnt der gesamte ~~Ablauf mit dem Prüfen~~ des neu hinzugekommenen Fahrzeugs. Hierfür werden wie in Grafik 3.2 die elektrischen Größen ~~für die~~ einzelnen Stellströme ermittelt. Nach dem Abschließen des Prüfzyklus übergibt das System die Leistungen an die Optimierungsfunktion. Der Optimierer hat somit ~~zugriff~~ auf die resultierenden Leistungen jedes Prüfstroms aller geprüften Fahrzeuge.

Immer wenn es zu einer Änderung der Grenzleistung bei einem dynamischen Lastmanagement oder den ladenden Fahrzeugen kommt, löst das System die Optimierung aus. ~~Durch das Auslösen des Optimierers~~ stellt dieser nacheinander alle möglichen Kombinationen von Stellströmen und Fahrzeugen zusammen. Das Lastmanagementsystem berechnet dann für jede Kombination die auftretenden elektrischen Größen auf Grundlage des Prüfzyklus. Diese werden anschließend auf die Einhaltung der Lastgrenze überprüft. Hält die geprüfte Kombination die Lastgrenze nicht ein, wird diese verworfen. Falls die Kombination die Leistungsgrenze einhält berechnet das System hierfür den Score. Handelt es sich bei der vorliegenden Kombination um die erste, die die Leistungsgrenze einhält speichert das System diese Kombination zwischen. Jede nachfolgende Kombination die die Lastgrenze einhält wird nun verworfen, falls diese einen höheren Score als den bisher vorliegenden Score besitzt. Andernfalls wird die gespeicherte Kombination überschrieben. Sind alle möglichen Kombinationen geprüft, erhält man die Kombination mit dem höchsten Score. In Abbildung 3.3 ist der schematische Ablauf des optimierungsbasierten Lastmanagements grafisch dargestellt.

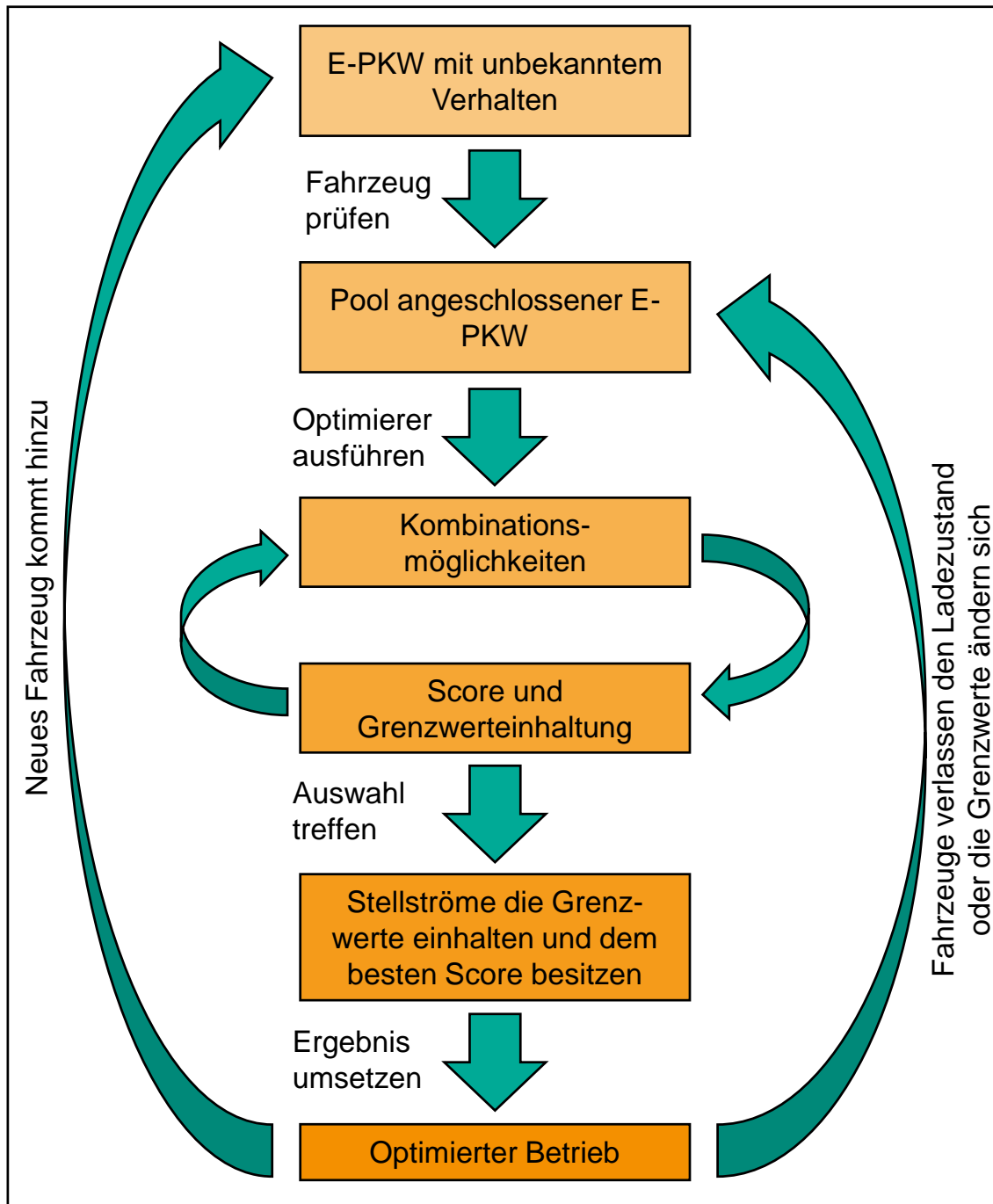


Abbildung 3.3.: Ablauf des optimierungsbasierten Lastmanagements.



## 4. Simulationsmodell

Aus den gesammelten Informationen über verschiedene Fahrzeuge lässt sich, wie in Abschnitt 4.1 vorgestellt ein Simulationsmodell erstellen. Ein Erproben und Optimieren an realen Fahrzeugen ist zu zeitintensiv und aufgrund der benötigten Fahrzeugvarianten kaum umsetzbar. Anhand dieses Fahrzeugmodells kann das entwickelte Lastmanagementkonzept erprobt und optimiert werden.

*\* Jedoch kann anhand dieses Fahrzeugmodells...*

### 4.1. Lademodell eines Elektrofahrzeugs

Zum Erstellen des Fahrzeugmodells wird das Lastverhalten einer möglichst großen Anzahl an Fahrzeugen ausgewertet. Als Datengrundlagen dienen die Logdateien bereits umgesetzter Projekte von ChargeHere. Von den Parkhäusern am EnBW-Standort Stuttgart und dem öffentlichen Parkhaus Tivoli liegen Daten für mehrere Monate vor. Insgesamt enthalten diese Logdateien etwa 400 Lastgänge. Die Logdateien sind nicht für das Aufzeichnen des Lastverhaltens einzelner Fahrzeuge ausgelegt, weshalb die elektrischen Größen teilweise nur im Abstand von mehreren Minuten aufgezeichnet sind. Um dennoch Lastgänge erzeugen zu können werden die gemessenen elektrischen Größen für diese Arbeit mit einem eigens entwickelten Python-Script ausgewertet. Als Resultat gibt das Script allgemeine Informationen wie die Anzahl der Phasen über die geladen wird, die Ladedauer und die geladenen Energiemengen, aber auch vollständige Lastgänge aller geladenen Fahrzeuge aus. Auf Grundlage dieser Daten kann jedoch kein Bezug zwischen dem Lastgang einzelner Fahrzeuge und dem jeweiligen Fahrzeugtyp hergestellt werden.

Die Ergebnisse der Auswertung sind bereits in Abschnitt 2.2.3 dargestellt. Bei den ausgewerteten Lastgängen darf nicht davon ausgegangen werden, dass darin jedes mögliche Lastverhalten eines Fahrzeuges enthalten ist. Weshalb bei der gesamten Entwicklung des Lastmanagementsystems darauf geachtet wird kein denkbar mögliches Ladeverhalten auszuschließen. Jedoch lassen sich einige Punkte den Lastgängen grundsätzlich entnehmen:

- Fahrzeuge können entweder 1-Phasig, 2-Phasig oder 3-Phasig laden
- alle Fahrzeuge lassen sich mit 16 A laden
- im Endladebereich wird die Ladeleistung in Stufen oder kontinuierlich reduziert
- während des Ladevorgangs sind die Ladeleistung und Ladeströme nicht konstant
- nicht alle Fahrzeuge ermöglichen eine Ansteuerung in Amper-Schritten
- geladenen Energiemengen korrelieren tendenziell mit der Ladeleistung

Um möglichst viele Fahrzeugtypen mit dem Modell abbilden zu können benötigt das Modell variable Eingangsparameter, über die das Fahrzeug konfiguriert werden kann.



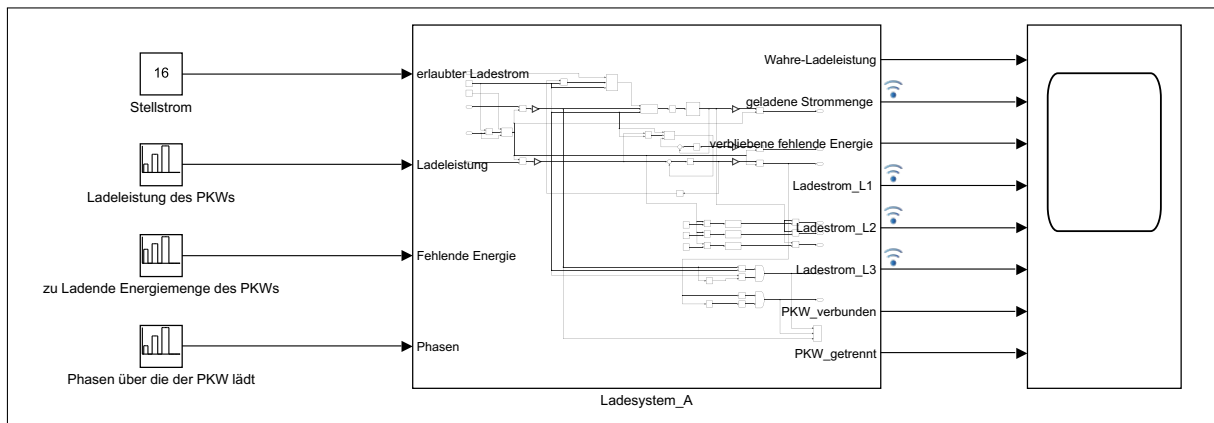


Abbildung 4.1.: Variables Lademodell eines Elektrofahrzeugs zur Erprobung des Lastmanagements. Erstellt in Matlab/Simulink.

Um verschiedene Konzepte für ein Lastmanagement zu erproben müssen nicht alle Fahrzeugparameter im Modell abgebildet sein. So ist der Status des Fahrzeugs in Form des CP-Signals für das Lastmanagement irrelevant, da dies bereits vom Lademanagement berücksichtigt wird. Des Weiteren ist die geladene Energiemenge bzw. die Ladedauer nicht zwingend für das Erproben des Lastmanagementsystems notwendig. Wichtig sind hingegen die Anzahl der Phasen über die das Fahrzeug geladen wird sowie die unterschiedliche Umsetzung der Stellströme. Realisiert wird das Fahrzeugmodell und die Erprobung unterschiedlicher Konzepte für das Lastmanagement mithilfe des Simulationsprogramms Matlab/Simulink.

Das Fahrzeugmodell verfügt wie Abbildung 4.1 zeigt über vier Eingänge und acht Ausgänge. Die Eingänge bestehen aus dem Stellstrom, der Ladeleistung des Fahrzeugs, der zu ladenden Energiemenge sowie die Anzahl der Phasen über die das Fahrzeug geladen wird. Alle Eingänge lassen sich mit Variablen belegen. Den Input für den Stellstrom kann das Lastmanagement vorgegeben und ist im Fahrzeugmodell auf 16 A begrenzt. Über die dynamischen Eingangsparameter kann eine Abfolge von mehreren unterschiedlichen Fahrzeugen betrachtet werden.

Vom Lastmanagement können die acht Ausgangsparameter Ladeleistung, geladene Strommenge, fehlende Energiemenge, Ladeströme der einzelnen Phasen sowie ein Binärsignal mit dem das Modell signalisiert, wann ein Ladevorgang beginnt oder endet. Bei der ausgegebenen Ladeleistung handelt es sich um die Leistung, die sich beim jeweiligen Stellstrom ergibt. Die geladenen Strommenge und die noch zu ladende Energie ist für das Lastmanagement grundsätzlich nicht notwendig, ermöglicht jedoch eine einfache Validierung des erprobten Lastmanagementsystems. Das Binärsignal mit dem das Verbinden und Trennen eines Fahrzeugs signalisiert wird ist notwendig, da auch ein Lastmanagementsystem ohne Rückkopplung erprobt werden soll.

Mit dem Fahrzeugmodell ist es ohne großen Aufwand möglich verschiedene Fahrzeugtypen zu modellieren. Alle Eingabeparameter lassen sich erweitern und für verschiedene Charakteristiken anpassen. Vom Fahrzeugmodell wird automatisch ein Signal generiert, das sowohl Ladebeginn als auch das Ende des Ladevorgangs an das Lastmanagement weitergibt. Mithilfe eines in das Modell integrierten Lookup-Tables lassen sich auch Charakteristiken von Fahrzeugen erzeugen, die kein scharfes Umsetzen der Stellströme

← \* Du sprichst doch eh schon vom Modell...  
umschreiben

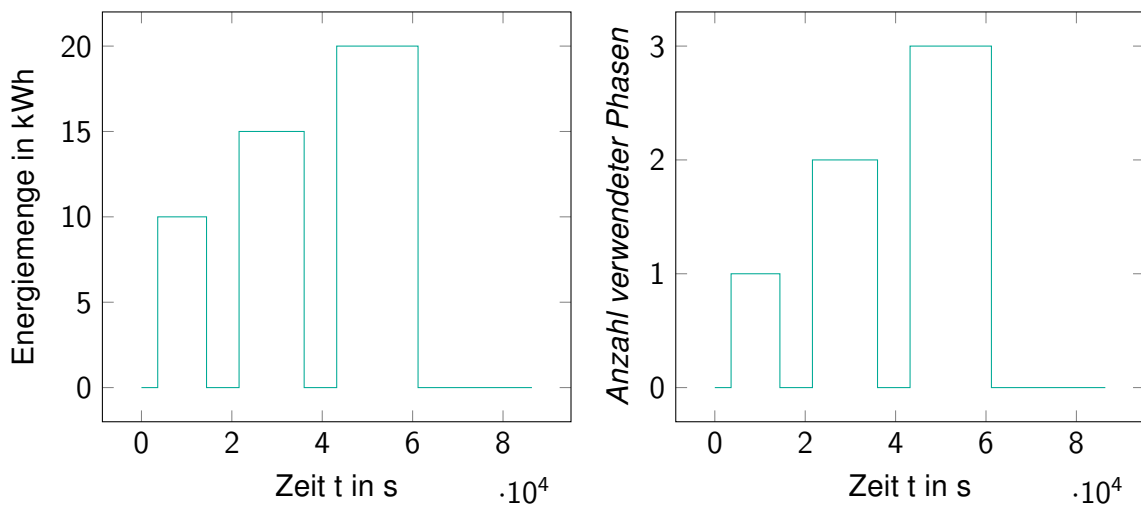


Abbildung 4.2.: Eingangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge. links: Zeitlicher Verlauf der zu ladenden Energiemenge. rechts: Anzahl der Phasen über die das Elektrofahrzeug lädt.

**ermöglichen.** Der Ladezustand des angeschlossenen Fahrzeugs wird überwacht. Sobald die zu ladende Energiemenge erreicht ist, beendet das Lademodell den Ladevorgang selbstständig.

Nicht abgebildet wird vom Lademodell das nicht konstante Verhalten der Leistung und der Ströme im stationären Bereich. Dieses Verhalten wird zwar bei allen Fahrzeugen festgestellt, das Schwanken dieser Parameter liegt jedoch in einem Bereich der für die Einhaltung der Last nicht ausschlaggebend ist und von einem Lastmanagementsystem nicht effizient korrigiert werden kann. Grund ist die verbaute Messtechnik, deren eigentlicher Einsatz das Zählen von Energiewerten ist und deshalb nur mit geringer Frequenz ausgelesen werden kann. Im Bereich eines hohen Ladezustands reduziert das Fahrzeug die Ladeleistung um die Batteriezellen zu schonen. Grundsätzlich ist es denkbar, dass Elektrofahrzeuge ein umgekehrtes Verhalten im Bereich eines geringen Ladezustandes besitzen. Von den untersuchten Lastgängen besitzt jedoch keiner ein solches Verhalten. Dieses Verhalten im Bereich geringer als auch im Bereich hoher Ladung wird nicht in das Modell integriert. Dieses Verhalten soll in der ~~Grundlegenden~~ <sup>9</sup> Simulation noch nicht betrachtet werden. )

Die Funktionalität des Fahrzeugmodells ist in den Abbildungen 4.2, 4.3 und 4.4 aufgezeigt. Bei einem gleichbleibenden Stellstrom sind drei unterschiedliche Fahrzeugtypen simuliert. Zwischen Sekunde 0 und 300 ist ein einphasig ladendes Fahrzeug angeschlossen. Nach Sekunde 300 wird ein zweiphasiges Fahrzeug abgebildet. Ab Sekunde 600 ist ein dreiphasig angebundenes Fahrzeug angeschlossen. Abbildung 4.2 zeigt die gegebenen Eingangsparameter Energiemenge und verwendete Phasen in Form einer Datenreihe. In der Abbildung 4.3 sind die resultierenden Binärwerte, die den Beginn und das Ende eines Ladevorgangs signalisieren. Neben den Binärwerten zeigt diese Grafik auch die wahre Ladeleistung, in die bereits der Stellstrom inbegriffen ist. Da in diesem Fall ein statischer Stellstrom von 16 A vorgegeben ist, gleicht diese Grafik der Eingangsleistung. Abweichend ist dagegen die Dauer für die diese Leistung vorliegt. Wie die Grafik mit der zu ladenden Energiemenge in Abbildung 4.3 zeigt ist die Energiemenge bereits vor Ende der Standzeit erreicht. Infolge dessen wird der Binärwert zur Signalisierung des Ladeendes auf *True*

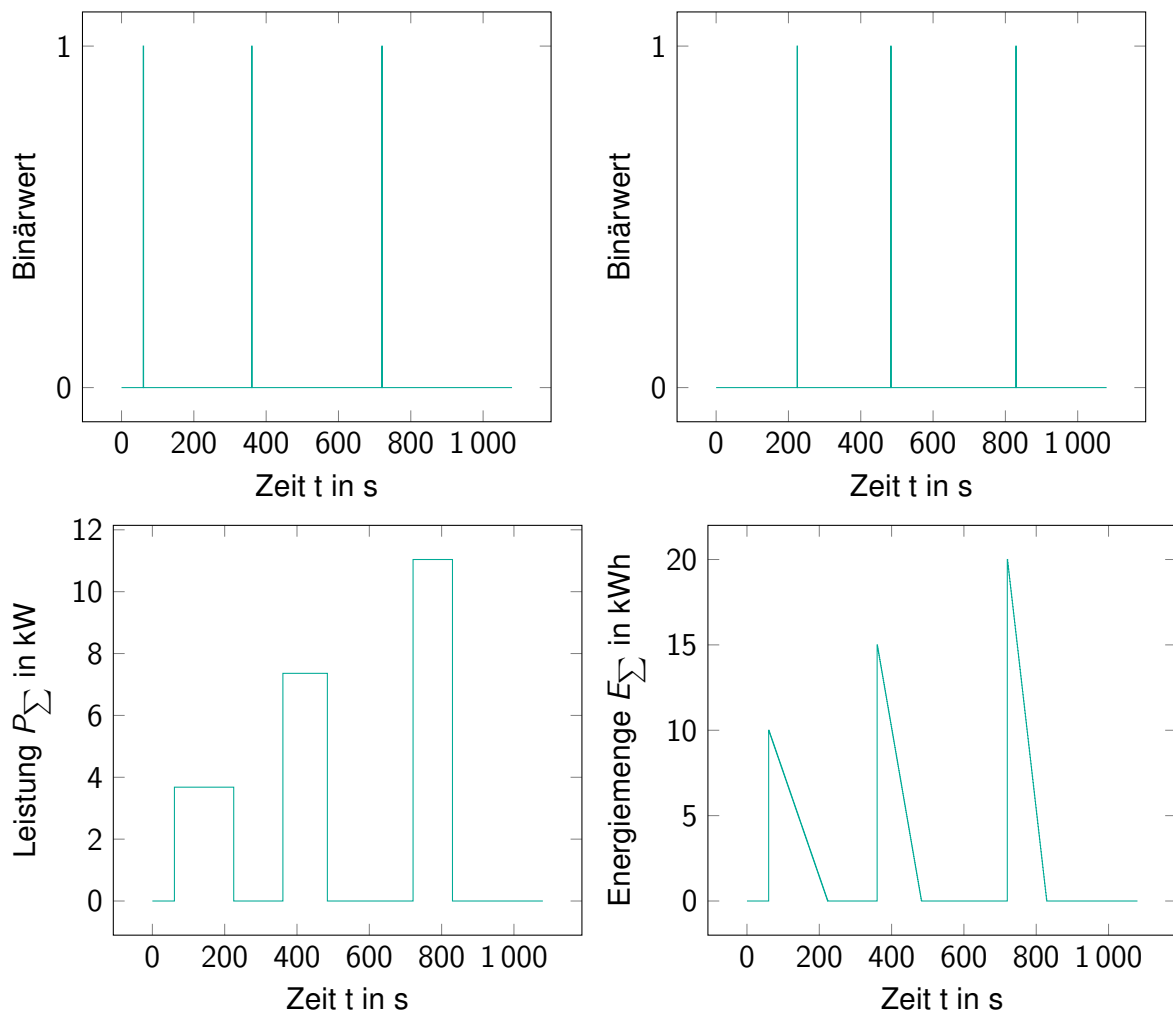


Abbildung 4.3.: Ausgangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge. <sup>3</sup>Oben: Binärwerte, die eine steigende Flanke ausgeben, sobald ein Fahrzeug angeschlossen wird (links) oder ein Ladevorgang beendet ist (rechts). <sup>7</sup>Unten links: Resultierende Ladeleistung des Elektrofahrzeugs aus den Eingangsparametern und dem Stellstrom. <sup>1</sup>Unten rechts: Noch zu ladende Energiemenge eines <sup>1</sup>angeschlossenen Elektrofahrzeugs.

und die Ladeleistung auf <sup>N</sup>null gesetzt. Abbildung 4.4 zeigt die Ladeströme für die Leiter  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$ , sowie die geladenen Strommenge für jedes Fahrzeug. Die Phasenströme  $IL_1$ ,  $IL_2$  und  $IL_3$  werden benötigt um die symmetrische Belastung zu überwachen.

## 4.2. Simulation des optimierungsbasierten Lastmanagementkonzepts

Das in Kapitel 3 vorgestellte optimierungsbasierte Lastmanagement verfolgt im Gegensatz zum regelungstechnischen Lastmanagement den Ansatz eines rückkopplungslosen Lastmanagements. Somit wird nicht der aktuelle Zustand als Grundlage für das Lastma-

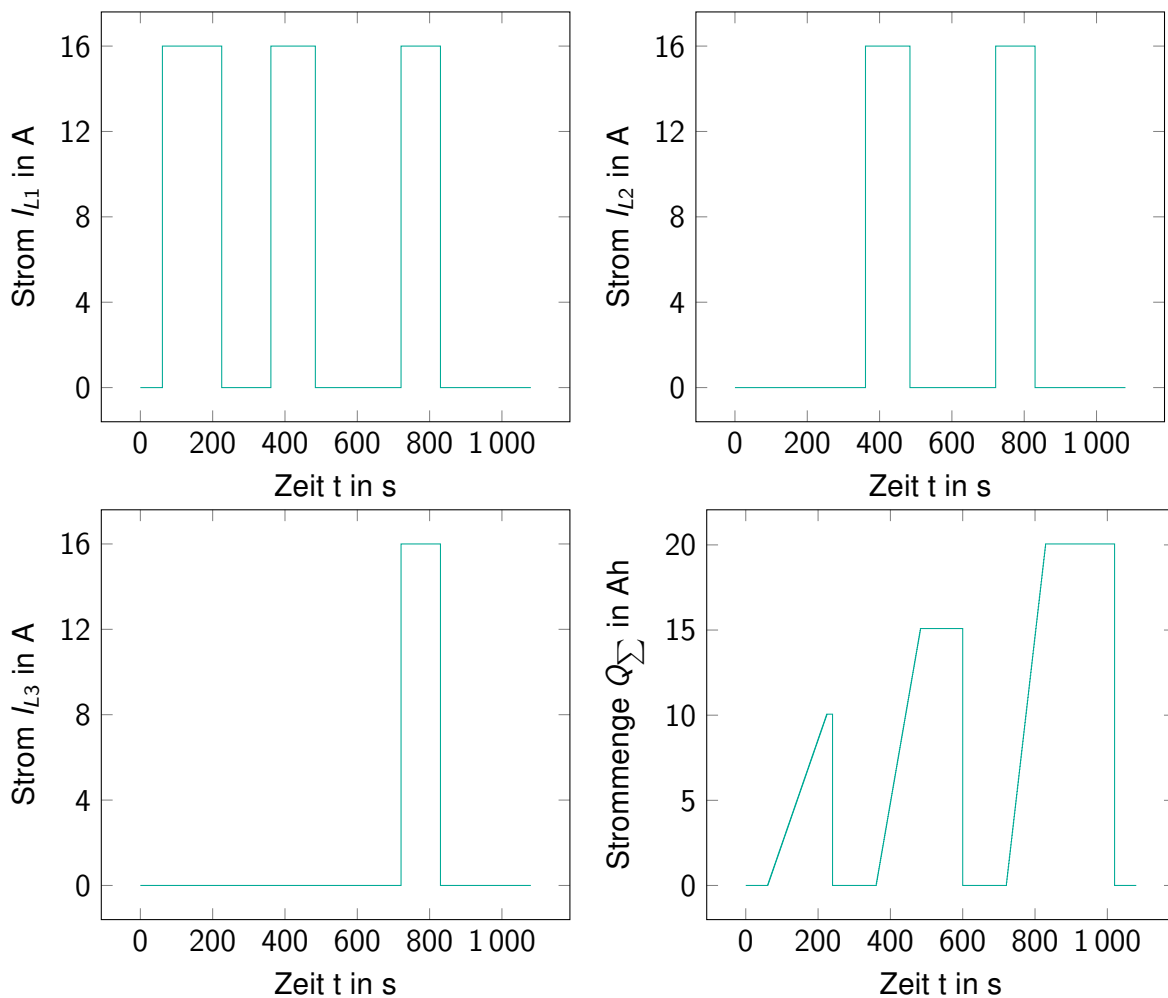


Abbildung 4.4.: Ausgangsparameter des Lademodells für Elektrofahrzeuge aus Matlab/Simulink. <sup>①</sup>Oben und unten links: Zeitlicher Verlauf der Ladeströme  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  und  $I_{L3}$  aus den Eingangsparametern und einem Stellstrom von 16 A. <sup>②</sup>Unten rechts: Verlauf der geladenen Strommenge.

nagement verwendet, sondern vorhandene Daten. Jedes Fahrzeug wird anfangs vom System geprüft und die gemessenen Werte <sup>③</sup>hinterlegt. Anhand dieser gemessenen Werte prüft das System alle Möglichkeiten auf das Einhalten der Grenzwerte. Alle möglichen Kombinationen <sup>④</sup>die die Grenzwerte einhalten bewertet das System zusätzlich. Die Kombination mit der besten Bewertung setzt das System anschließend um.

Erprobt wird das optimierungsbasierte Lastmanagement mithilfe des Fahrzeugmodells aus 4.1. Simuliert werden vier Parkplätze (PP) und insgesamt neun Fahrzeuge. Die Charakteristik dieser Fahrzeuge ist in Tabelle 4.1 aufgezeigt. Über die Nummerierung in der Leistungsbezeichnung ist die Leistung einem Parkplatz zugewiesen. Anhand des Buchstabens kann auf die Reihenfolge geschlossen werden, in der die Fahrzeuge am jeweiligen Parkplatz geladen werden.

Die Ergebnisse der Simulation sind in den Abbildungen 4.5 und ?? dargestellt. Grafik 4.5 (oben) zeigt die Anzahl der Fahrzeuge, die zum jeweiligen Zeitpunkt an das Lastmanagementsystem angebunden sind. Maximal vier Fahrzeuge können gleichzeitig angebunden

Tabelle 4.1.: Leistungen  $P$  in Abhängigkeit vom Stellstrom  $I_S$  unterschiedlicher Fahrzeugtypen zur Erprobung des regelungstechnischen Lastmanagements. Die dargestellten Leistungen sind in der Einheit kW.

$I_S$	0 A	6 A	7 A	8 A	9 A	10 A	11 A	12 A	13 A	14 A	15 A	16 A
$P_{1A}$ :	0	4,14	4,14	4,14	4,14	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	11,04
$P_{2A}$ :	0	4,14	4,14	5,52	5,52	6,9	6,9	8,28	8,28	9,66	9,66	11,04
$P_{2B}$ :	0	4,14	4,14	5,52	5,52	6,9	6,9	8,28	8,28	9,66	9,66	11,04
$P_{2C}$ :	0	1,38	1,38	1,84	1,84	2,3	2,3	2,76	2,76	3,22	3,22	3,68
$P_{3A}$ :	0	2,76	3,22	3,68	4,14	4,6	5,06	5,52	5,98	6,44	6,9	7,36
$P_{3B}$ :	0	2,76	3,22	3,68	4,14	4,6	5,06	5,52	5,98	6,44	6,9	7,36
$P_{4A}$ :	0	4,14	4,14	4,14	4,14	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	11,04
$P_{4B}$ :	0	4,14	4,14	4,14	4,14	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	11,04
$P_{4C}$ :	0	1,38	1,38	1,38	1,38	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	3,68

werden

sein. Das Diagramm soll einen möglichen Tagesverlauf an einer Ladeeinrichtung mit nur vier Ladepunkten wiedergeben.

Abbildung 4.5 (unten) veranschaulicht die summarischen Leistungen. Dargestellt ist die dynamische Grenzleistung  $P_{\text{grenz}}$ , die maximale Ladeleistung  $P_{\text{max}}$  der ladenden Elektrofahrzeuge und die optimierte Ladeleistung  $P_{\text{optimiert}}$ . Über den gesamten Zeitbereich kommt es zu keiner andauernden Leistungsüberschreitung. Ebenso tritt keinerlei Schwingung auf, wie es beim regelungstechnischen Lastmanagement der Fall ist. Einzige Ursache für das zeitweilige Überschreiten der Grenzleistung sind die Prüfzyklen. Ursache für die Überschreitung der Grenzleistung ist das nicht berücksichtigen des Prüfzykluses im Lastmanagement.

Neben den kurzzeitigen Überschreitungen der Grenzleistung fällt das zeitweise deutliche Unterschreiten dieser Grenzleistung auf. So fällt beispielsweise die optimierte Leistung  $P_{\text{optimiert}}$  zwischen Sekunde  $4 \cdot 10^4$  und  $5 \cdot 10^4$  deutlich unter die mögliche Leistung  $P_{\text{max}}$ , obwohl diese bereits unter der Grenzleistung  $P_{\text{grenz}}$  liegt. Diese Unterschreitungen von der Grenzleistung sind auf den Score zurückzuführen. Der Score  $\text{Score}_{\text{eqPKW}}$  bewertet die gleichmäßige Belastung und führt so zu einer Unterschreitung der Grenzleistung.

In der Abbildung 4.6 sind in den oberen vier Diagrammen die Stellströme an jedem angebundenen Parkplatz dargestellt. Alle Stellströme sind durch den Optimierer gesteuert. Nach dem Anschließen eines neuen Fahrzeugs sind die Stellströme des Prüfzykluses zu sehen. So ist z.B. in den Abbildungen 4.6 und 4.5 nach Sekunde  $1,1 \cdot 10^4$  der Prüfzyklus von Fahrzeug  $\text{PKW}_{4A}$  zu erkennen, welches zu diesem Zeitpunkt einen Ladevorgang beginnt. Nach Abschließen des Prüfzyklus ähneln sich die Stellströme aller Fahrzeuge zum selben Zeitpunkt. Dies ist auf den Score  $\text{Score}_{\text{eqPKW}}$  zurückzuführen, durch den alle Fahrzeuge gleichberechtigt laden können.

Die maximal möglichen Leistungen und die optimierten Leistungen aller Ladepunkte sind in den unteren vier Diagrammen aus Abbildung 4.6 dargestellt. Tendenziell ist erkennbar, dass alle Fahrzeuge unabhängig von deren maximaler Ladeleistung die optimierte Ladeleistung vorgegeben bekommen. Fahrzeuge die 1- oder 2-Phasig geladen werden, das sind  $\text{PKW}_{2C}$ ,  $\text{PKW}_{3A}$ ,  $\text{PKW}_{3B}$  und  $\text{PKW}_{4C}$ , können somit ihre Ladeleistung besser

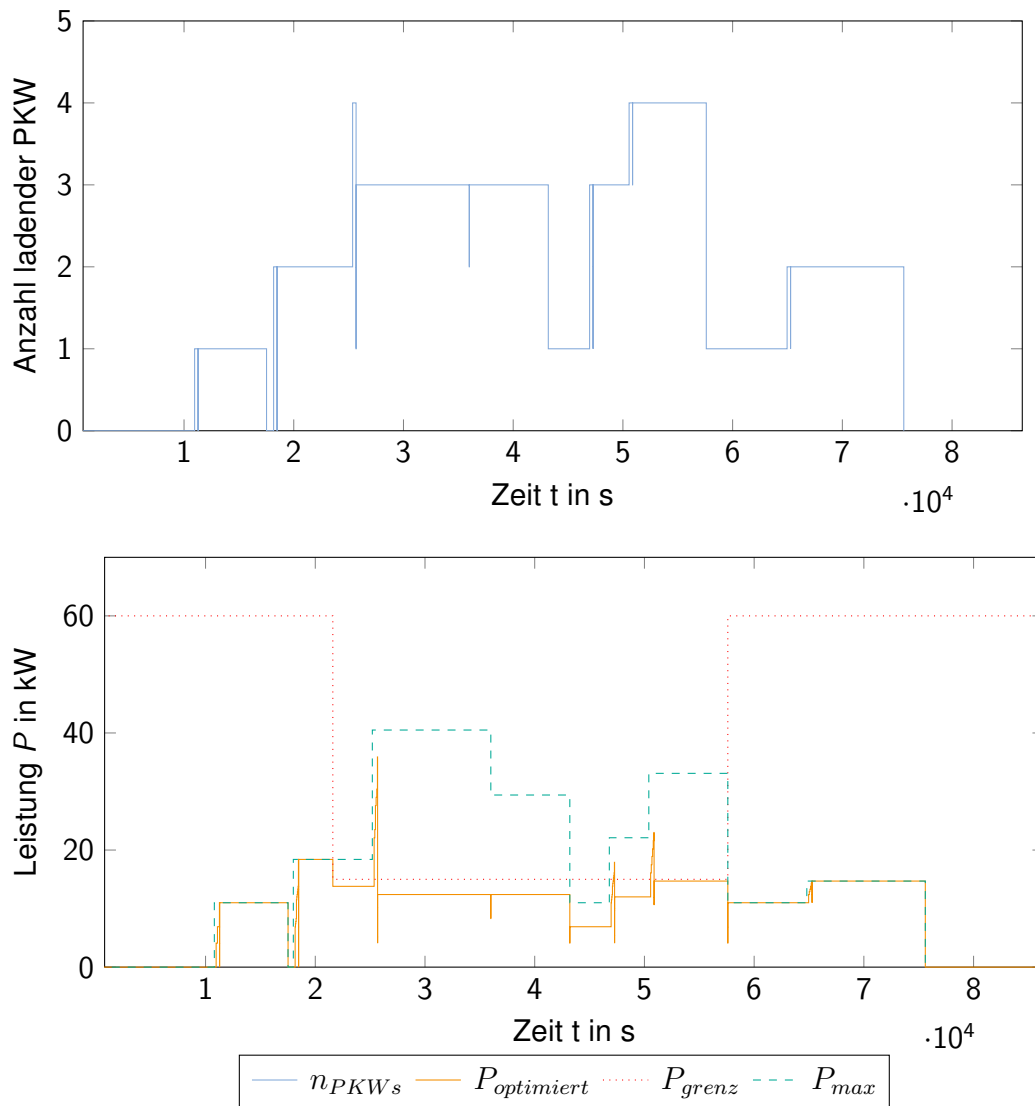


Abbildung 4.5.: Ergebnisse des optimierungsbasierten Lastmanagements mit vier Fahrzeugen. Oben: Anzahl der Fahrzeuge  $n_{PKW_s}$  die zum jeweiligen Zeitpunkt geladen werden. Unten: Einzuhaltende Grenzleistung  $P_{\text{grenz}}$ , die mit den angebunden Fahrzeugen mögliche Ladeleistung  $P_{\text{max}}$  und die optimierte Ladeleistung  $P_{\text{optimiert}}$ .

ausnutzen. Grund hierfür ist die Optimierung ~~auf~~ <sup>der</sup> die Ladeleistung und nicht auf den Stellstrom. Somit hat jedes Fahrzeug, unabhängig von der möglichen Ladeleistung Anrecht auf die selbe Ladeleistung. 11

### 4.3. Erkenntnisse aus der Simulation

Die Simulation des optimierungsbasierten Lastmanagements zeigt ein sehr positives Systemverhalten. Bis auf die vorhersehbaren Grenzwertüberschreitungen durch den Prüfzyklus zu begin <sup>der</sup> eines Ladevorgangs, hält diese Lastmanagements-einrichtung die 1

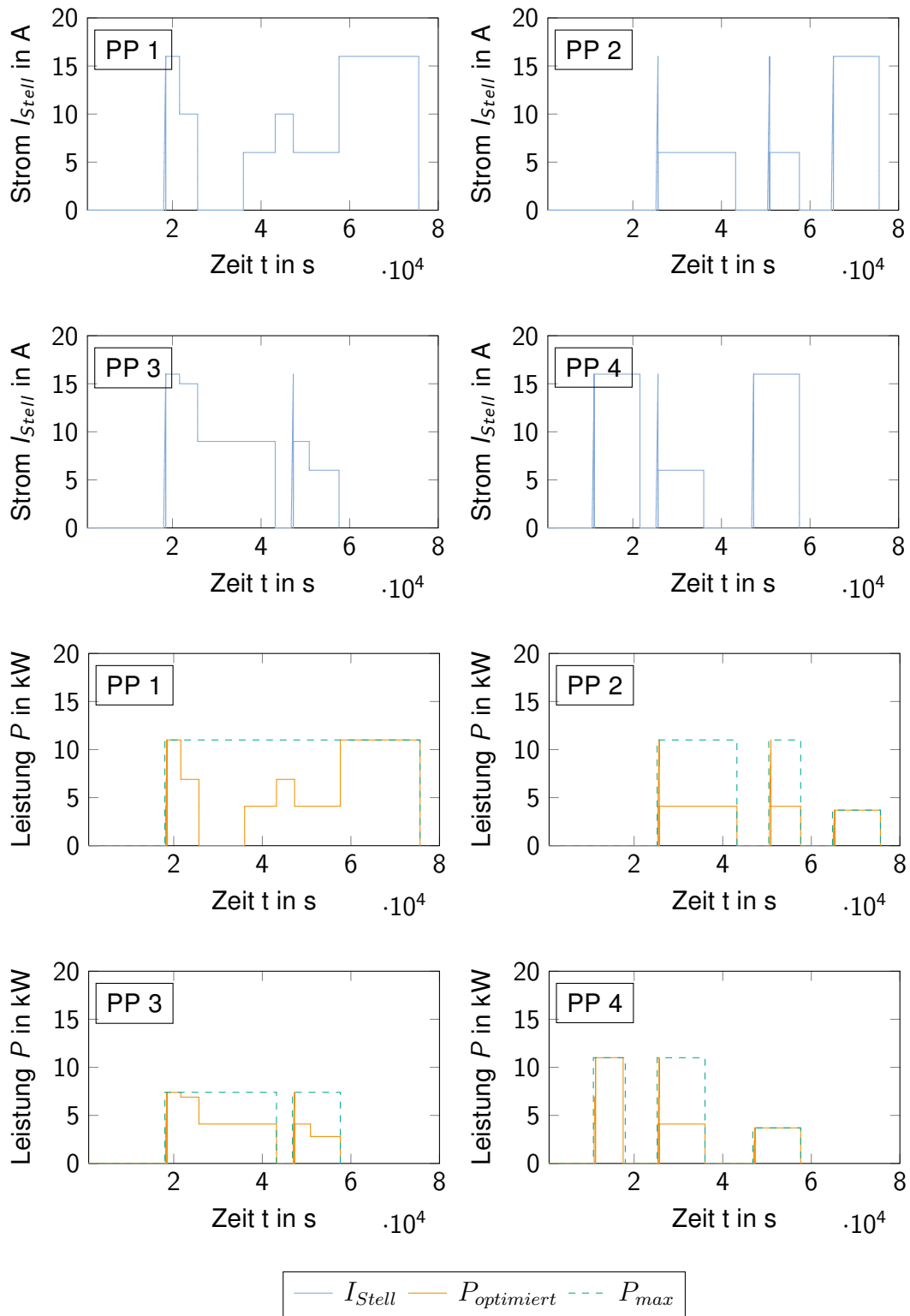


Abbildung 4.6.: Stellströme  $I_{Stell}$ , optimierte  $P_{optimiert}$  und maximale  $P_{max}$  Leistungen von vier Fahrzeugen, die an das optimierungsbasierte Lastmanagement angebunden sind. Die einzuhaltende Lastgrenze liegt zwischen Sekunde 21600 und 57600 bei 15 kW, im restlichen Zeitbereich bei 60 kW.

Grenzwerte verlässlich ein. Zwar nutzt das optimierungsbasierte Lastmanagement in der Simulation die Lastgrenzen nicht voll aus, dies kann jedoch durch eine Kalibrierung des Scores noch verbessert werden. Außerdem lassen sich der Optimierung weitere Auswahlkriterien wie die Phasensymmetrie oder Grenzströme für einzelne Leiter problemlos hinzufügen. ✓

Nachteilig ist hingegen der notwendige Prüfzyklus zu Beginn des Ladevorgangs. Dieser reduziert die Ladeleistung in diesem Zeitraum und muss zuverlässig in das System implementiert werden. Ein weiteres Problem ist das Fehlen einer Rückkopplung. Im realen Ladevorgang ändert sich die Ladeleistung beispielsweise in den Randbereichen des SOC's oder während einer Ladepause. Ermittelt das System in einem Ladebereich mit begrenzter Ladeleistung die Werte des Prüfzyklus, kann es zu Verletzungen der Grenzwerte kommen. Aus diesem Grund muss ein solches System im realen Betrieb über eine Rückkopplung verfügen.

Problematisch ist zudem das Optimierungsverfahren selbst. Es ist sehr Zeitaufwändig, da das Lastmanagement jede mögliche Kombination ermitteln muss. Für jede dieser Kombinationen müssen zudem die resultierenden Leistungs- und Stromwerte berechnet und hiermit die Fitness sowie das Einhalten der Grenzwerte geprüft werden. Jedes angebundene Fahrzeug kann theoretisch zwölf verschiedene Stellströme umsetzen. Hieraus ergibt sich eine steil ansteigende Exponentialfunktion der möglichen Kombinationen. Diese ist in Abbildung 4.3 dargestellt. )

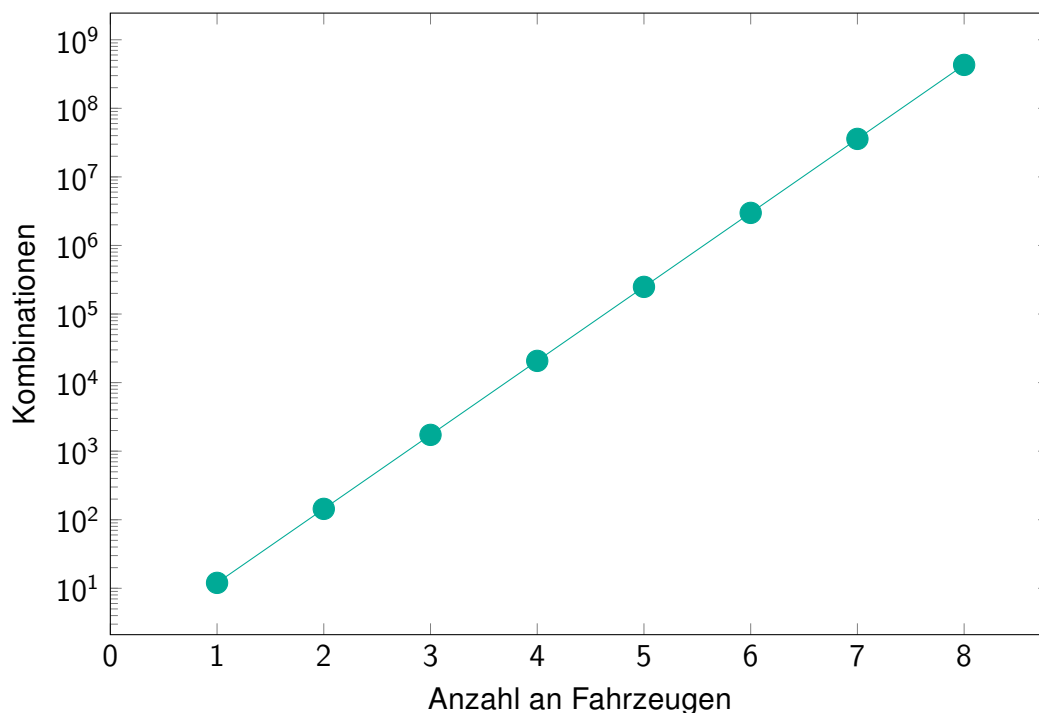


Abbildung 4.7.: Verhältnis der Anzahl möglicher Kombinationen zur Anzahl der ladenden Fahrzeuge für zwölf möglichen Ladeströme pro Fahrzeug.

Beim vorliegenden Optimierungsproblem wird versucht die Fehler mithilfe des Scores zu reduzieren. Somit handelt es sich um ein Minimierungsproblem. Dieses ist vergleichbar mit dem sogenannten 'Rucksackproblem'. Das Rucksackproblem ist ein Beispiel für



ein Optimierungsproblem aus der Kombinatorik. Hierbei sollen aus einer Vielzahl von Elementen, auf Grundlage verschiedener Parameter (Volumen, Gewicht, Preis, etc.), die Elemente ausgewählt werden, die in den Rucksack passen und den höchsten Mehrwert (z.B. Gesamtgewicht) erfüllen. So wie das 'Rucksackproblem' ist auch das vorliegende Optimierungsproblem NP-Äquivalent. Diese Problemklasse lässt sich nichtdeterministisch in Polynomialzeit lösen. Folglich steigt die Rechenzeit und die benötigte Speicherkapazität mit Zunahme der möglichen Pfade in immense Dimensionen. [q22, q23, q24]

Ein Lastmanagement auf Grundlage eines Optimierungsalgorithmus, der den gesamten Suchraum betrachtet ist daher nicht anwendbar. Der Rechenaufwand muss durch algorithmische Verfahren reduziert werden. Dieser Ansatz wird in Kapitel 5 verfolgt.

## 5. Lösung des Optimierungsproblems

Das Ermitteln der Fitness jeder einzelnen Kombination ist wie bereits in Abschnitt 4.3 dargestellt mit einer steigenden Anzahl von Fahrzeugen innerhalb einer zumutbaren Zeitspanne nichtmehr umsetzbar. Aus diesem Grund müssen hierfür alternative Verfahren eingesetzt werden. In Abschnitt 5.1 werden drei Algorithmen für das Lösen von Optimierungsproblemen vorgestellt. Abschnitt 5.2 zeigt ein alternatives Verfahren zur Reduktion der zu prüfenden Kombinationen.

### 5.1. Algorithmen zur Lösung von Optimierungsproblemen

Das vorliegende Optimierungsproblem (NP-Äquivalent) ist in der Informatik und Kombinatorik nicht unbekannt. Für die Lösung dieses Problems existieren verschiedene Ansätze. Zu den verbreitetsten Ansätzen gehören das *Simulated Annealing* (5.1.1), der *Greedy-Algorithmus* (5.1.2) und *Evolutionäre Algorithmen* (5.1.3).

Um den Suchraum besser einschätzen zu können ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Grafik zeigt den Score  $Score$  und die entsprechende Leistung  $P_{Score}$  über dem Iterator  $i$ . Der Iterator gibt die fortlaufende Zahl der Kombinationsmöglichkeit an. Datengrundlage der Grafik sind alle Kombinationen der Stellströme von drei Fahrzeugen. Unter den drei Fahrzeugen ist ein 1-Phasiges, ein 2-Phasiges und ein 3-Phasiges Fahrzeug. Obwohl es sich hierbei nur um drei Fahrzeuge und somit 1728 Kombinationsmöglichkeiten handelt, zeigt das Schaubild sehr viele lokale Maxima und Minima.

#### 5.1.1. Simulated Annealing

Das *Simulated Annealing* ist (Simulierte Abkühlung) ein heuristisches Approximationsverfahren zum Lösen von Optimierungsproblemen. Angelehnt ist das Verfahren an den Abkühlvorgang von Stoffen. Kühlt ein Stoff ab, bedeutet das eine Reduktion der Teilchenbewegung. Übertragen auf Optimierungsprobleme bedeutet dies eine Reduktion der Streuung einzelner Kombinationen sobald sich der Wert hin zu dem gesuchten Maximum oder Minimum bewegt. Wird zu Beginn des Approximationsverfahrens noch im gesamten Betrachtungsraum nach dem angestrebten Werte gesucht, kühlt das System bei der Näherung an den gesuchten Wert ab und reduziert die Streuung. Lokale Minima oder Maxima kann der Algorithmus verlassen, da weiterhin global gesucht wird, wenn auch reduziert. Allerdings garantiert Algorithmus das Finden des globalen Minima oder Maxima nicht. [q27, q25]

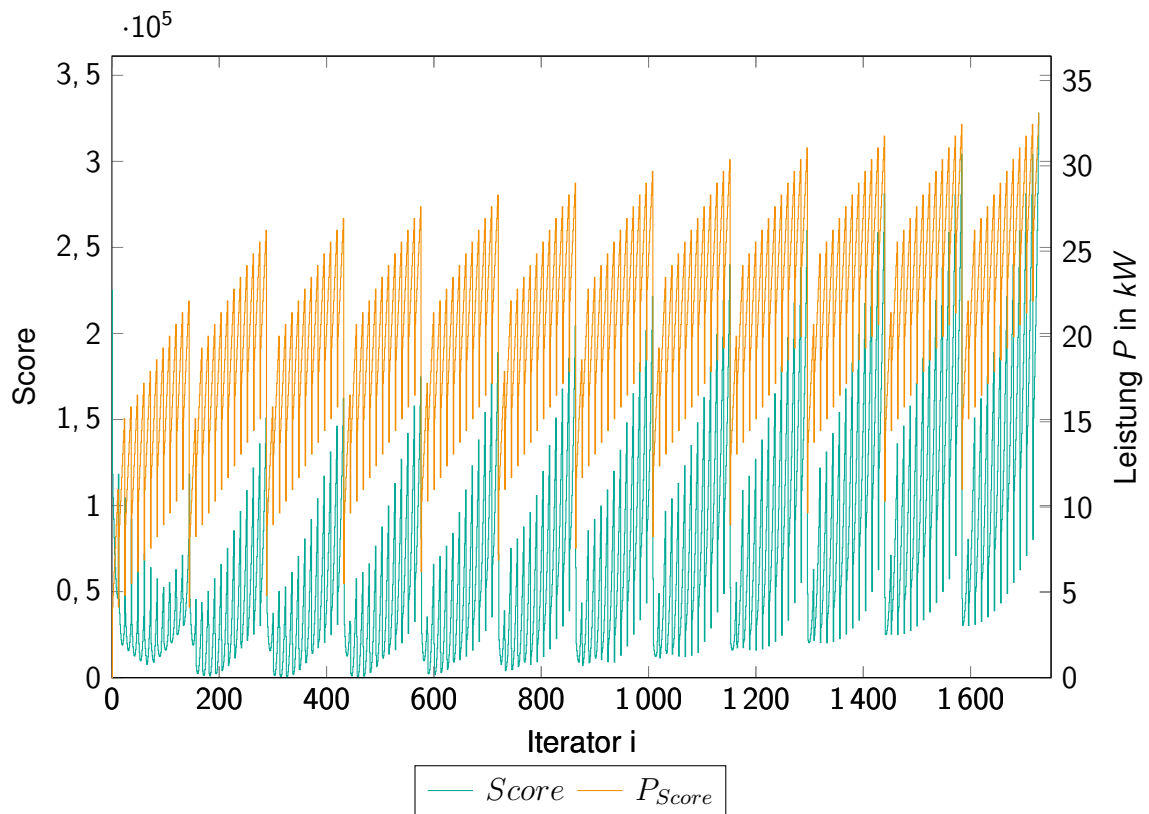


Abbildung 5.1.: Vollständiger Suchraum des Scores und der entsprechenden Leistung innerhalb dessen die Optimierung stattfindet. Betrachtet werden drei Fahrzeuge die dreiphasig laden.

### 5.1.2. Greedy-Algorithmus

Beim *Greedy-Algorithmus* (gierige Algorithmus) handelt es sich ebenfalls um einen Algorithmus für das Lösen von Optimierungsproblemen. Der Algorithmus sucht immer ausgehend von seiner lokalen Position die nächste Kombination aus. Hierbei sucht sich der Algorithmus immer die folgende Kombination aus, die den höchsten Mehrwert erzielt. Die Implementierung des Algorithmus ist weniger aufwändig als beim *Simulated Annealing* oder *Evolutionärer Algorithmus*. Allerdings findet auch dieser Algorithmus das Maximum oder Minimum nicht zuverlässig. Außerdem kann der Algorithmus nur verwendet werden, falls zwischen den einzelnen Kombinationen ein Zusammenhang besteht. Somit ist der Algorithmus für NP-Vollständige Probleme nicht geeignet. [q25, q26]

### 5.1.3. Evolutionärer Algorithmus

*Evolutionäre Algorithmen* sind an das Prinzip evolutionärer Entwicklungen in der Natur angelehnt. Der Algorithmus besteht aus den Schritten: Selektion, Rekombination, Mutation und Evaluation. Bei der Selektion wählt der Algorithmus die Kombinationen aus, die geprüft werden sollen. Anschließend werden durch Rekombination neue Kombinationsmöglichkeiten aus den bestehenden Kombinationen gewonnen. Mithilfe der Mutation erzeugt der Algorithmus neue Kombinationen die auch vollkommen unabhängig von den

bisherigen Ergebnissen sein können. Im letzten Schritt evaluiert der Algorithmus die Resultate des Durchlaufs und gibt diese an die Selektion weiter. Dieser Vorgang wiederholt sich bis Änderungsrate des Ergebnisses einen festgelegten Wert unterschreitet. [q25]

Auch *Evolutionäre Algorithmen* finden nicht unbedingt das globale Minima oder Maxima. Der Algorithmus lässt sich jedoch auch bei NT-Vollständigen Optimierungsproblemen einsetzen und findet aus lokale Maxima bzw. Minima wieder heraus. Viele lokale Maxima oder Minima erschweren jedoch die Berechnung. [q25]

## 5.2. Reduktion der Kombinationsmöglichkeiten

Ein alternativer Weg um das Optimierungsproblem zu lösen ist den Datensatz zu reduzieren. Einige Stellströme können aufgrund der vorliegenden Grenzwerte bei der Optimierung ausgeschlossen werden. Um die Stellströme zu reduzieren ohne die Qualität des Lastmanagements zu reduzieren muss die Auswahl der Stellströme auf Grundlage des einzuhaltenden Grenzwertes erfolgen. Auftreten können grundsätzlich die Zustände:

- A** keine Grenzwerteverletzung
- B** einzelne Leiterströme überschritten
- C** Phasensymmetrie nicht eingehalten
- D** Kombination aus B und C

Für jeden dieser Zustände muss die Auswahl der Stellströme separat erfolgen, bei B und C ist es zudem notwendig zu berücksichtigen über welche Phasen das Fahrzeug geladen wird.

Liegt keine Grenzwertüberschreitung (**A**) vor ist es nicht notwendig alle Kombinationen zu prüfen. Es genügt für jedes angeschlossene Fahrzeug den maximalen Stellstrom auszuwählen. Eine Optimierung ist somit nicht notwendig.

Überschreiten die ladenden Fahrzeuge nur einzelne Leiterströme (**B**) sollte das System nur die Ladeleistung der Fahrzeuge reduzieren, die über die überlastete Phase laden. Alle Fahrzeuge die dem Entsprechen werden anteilig zu den verfügbaren Leiterströmen geladen. Zu überlegen ist hierbei die Ströme der Fahrzeuge die ausschließlich auf der Überlasteten Phase laden vorrangig zu reduzieren. Um ein diskriminierungsfreies laden zu gewährleisten wird dieser Ansatz jedoch nicht realisiert.

Für den Fall einer Verletzung der Vorgaben zur Einhaltung der Phasensymmetrie (**C**) können die Stellströme 3-Phasig ladender Fahrzeug pauschal auf den maximalen Ladestrom reduziert werden. Bei 1-Phasig und 2-Phasig ladenden Fahrzeugen muss differenziert werden zwischen Fahrzeugen die die Unsymmetrie verursachen und denen die die Unsymmetrie reduzieren. Auf 2-Phasig ladende Fahrzeuge können beide Fälle zutreffen. Aus diesem Grund können die Stellströme in Zustand **C** nicht passgenau reduziert werden. Daher wählt das System für diesen Fall die Stellströme 1-Phasiger und 2-Phasiger Fahrzeuge pauschal breit gestreut aus.

Die Stellströme bei einer Kombination (**D**) aus den Zuständen **B** und **C** sind am schwierigsten effizient zu reduzieren. Das Lastmanagement muss hierfür alle Grenzwerte berücksichtigen. Daher werden die Stellströme 3-Phasig ladender Fahrzeuge wie in **B** reduziert.

Zusätzlich wird noch der maximale Ladestrom hinzugefügt um Leistungsreduktionen 1-Phasiger und 2-Phasiger Fahrzeuge auszugleichen. Bei den restlichen Fahrzeugen werden Stellströme wie in Zustand **C** reduziert.

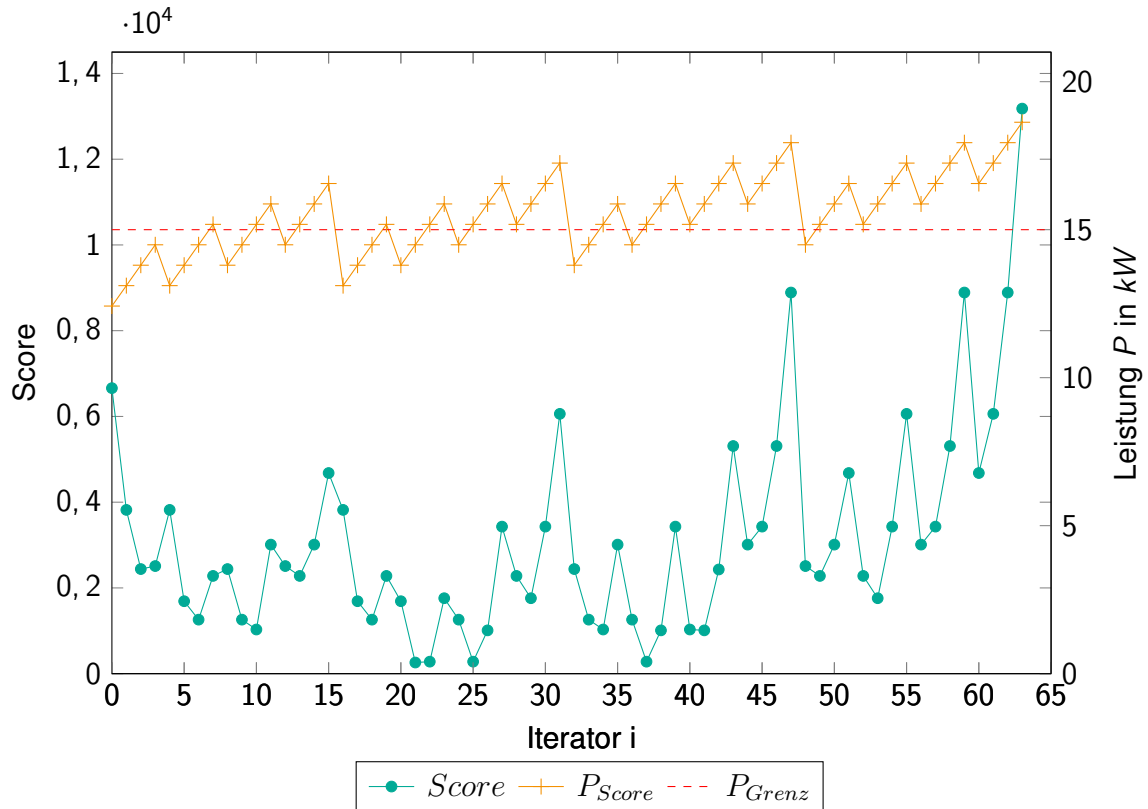


Abbildung 5.2.: Reduzierter Suchraum des Scores und der entsprechenden Leistung innerhalb dessen die Optimierung stattfindet. Betrachtet werden drei Fahrzeuge die dreiphasig laden.

Durch die Reduktion der Stellströme soll die Anzahl der Stellströme pro Fahrzeug auf maximal vier begrenzt werden. Somit ergeben sich in Abbildung 5.2 anstatt 1728 in Abbildung 5.1 nur noch 64 mögliche Kombinationen. Die Reduktion der Anzahl der möglichen Kombinationen erfolgt in Abbildung 5.2 auf Grundlage des Vorgelegten Zustands **B**. Da für diese Grafik ideale Leistungswerte aus dem Stellstrom und einer festgelegten Spannung von 230 V angesetzt sind, treten mehrere Zustände mehrmals auf. Reale Werte weichen meist von diesen idealen Leistungswerten ab. Aus diesem Grund gibt es bei einer Betrachtung mit realen Leistungswerten eine größere Anzahl unterschiedlicher Leistungswerte. Mit diesen kann eine Leistungsgrenze dann unter Umständen besser angenähert werden, als mit identischen (idealen) Leistungswerten.

Anhand eines Beispiels lässt sich dieser Zusammenhang am besten erklären. Es soll die Leistung von drei Fahrzeugen optimiert werden. Jedes dieser drei Fahrzeuge kann zwölf verschiedenen Stellströme umsetzen. Sucht man nun nach einer Kombination die eine Leistung von 15 kW einhält und den höchsten Score besitzt, so müsste man ohne eine Datenreduktion für jede Kombination in Abbildung 5.1 die Leistung und den Score prüfen. In diesem Fall wäre es auch notwendig Kombinationen zu prüfen, deren Leistung deutlich über bzw. unter der angestrebten Leistung liegen. Reduziert man die möglichen

Stellströme allerdings nach der vorgestellten Weise, so resultiert ein Suchraum nach Abbildung 5.2. Durch die reduzierte Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten reduziert sich der Aufwand zum Auswählen der besten Kombination deutlich. Dem Diagramm lässt sich so entnehmen die Kombinationen mit dem Iterator 9, 24, 33 und 36 sowohl die Leistungsgrenze einhalten und gleichzeitig den höchsten Score besitzen.

### 5.3. Auswahl des Verfahrens

Von den drei betrachteten Algorithmen kann der Greedy-Algorithmus als Lösungsweg ausgeschlossen werden. Der Greedy-Algorithmus kann NP-Äquivalente Optimierungsprobleme nicht effizient lösen. Die beiden anderen Algorithmen, Simulated Annealing und evolutionäre Algorithmus, sind in der Lage NP-Vollständige Probleme zu lösen und können somit für das vorliegende Optimierungsproblem angewandt werden. Beide Algorithmen können zwar lokale Minima bzw. Maxima überwinden, mit steigender Anzahl von lokalen Minima bzw. Maxima reduziert sich allerdings deren Effizienz. Wie Abbildung 5.1 beinhaltet der Suchraum bereits bei nur drei Fahrzeugen über 100 Extremstellen. Ein Einsatz dieser Algorithmen zum Lösen dieses Optimierungsproblems ist daher nicht effizient.

Durch das Reduzieren der Anzahl möglicher Stellströme pro Fahrzeug kann die Anzahl der möglichen Kombinationen extrem reduziert werden. Womit auch bei einer voll ausgelasteten Anlage das Berechnen jeder mögliche Kombination zeiteffizient realisierbar ist. Für eine Anlage mit maximal acht Ladeeinheiten ist dieses Verfahren geeignet. Steigt die Anzahl auf über acht Parkplätze ist auch dieses Verfahren nicht zeiteffizient genug bzw. erfordert eine zu hohe Rechenleistung. In diesem Fall ist wäre eine Kombination beider Verfahren denkbar. Also den Suchraum zu reduzieren und anschließend mithilfe des Simulated Annealing oder evolutionärer Algorithmen die beste Kombination zu suchen.

In dieser Arbeit wird Ausschließlich ein Lastmanagement für Anlagen mit maximal acht Ladeeinrichtungen entwickelt. Daher kommt im Folgenden nur die Reduktion möglicher Stellströme zum Einsatz.



## 6. Praktische Umsetzung des Konzepts

Das im Kapitel 4 erprobte optimierungsbasierte Lastmanagement muss für den realen Einsatz in das ChargeHere-System integriert werden. Bei der aktuellen Version der ChargeBase von ChargeHere geht die Systemsteuerung von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) aus. Diese interagiert mit allen Bauteilen der ChargeBase und organisiert den Ladevorgang. Um über OCPP 1.6 mit dem Backend zu kommunizieren und als Schnittstelle zur grafischen Benutzeroberfläche des Bedienterminals verfügt die ChargeBase außerdem über einen RevPi. Ein RevPi ist ein auf einem Raspberry Pi basierender Einplatinencomputer auf Industriestandard vom Hersteller Kunbus. Der Algorithmus für das Lastmanagement soll auf dem RevPi betrieben werden.

Um das Lastmanagement an die SPS-Steuerung anzubinden muss diese angepasst werden. In Abschnitt 6.1 wird dieser Teil der Arbeit vorgestellt. Das Herzstück der Arbeit ist das Lastmanagement-Programm. Es wird in der Programmiersprache Java umgesetzt und ist Abschnitt 6.2 aufgezeigt. Für die Kommunikation zwischen RevPi und SPS zum Zweck des Lastmanagements wird in 6.2.7 eine Schnittstelle entwickelt.

### 6.1. Einbinden in das SPS-Programm

Das SPS-Programm organisiert den gesamten Ladevorgang und die Aufteilung der Ladecontroller auf die angeschlossenen Fahrzeuge. Es liest die MID-Zähler aus und gibt die Zählerwerte bei Bedarf weiter. Des Weiteren überwacht die SPS die Schutzeinrichtungen. Darüber hinaus teilt die SPS einem angeschlossenen Fahrzeug nach dem Score-Konzept aus Abschnitt 2.7 einen Ladecontroller zu. Hierfür steuert die SPS sowohl die Ladecontroller selbst als auch die Multiplexermatrix. Die Steuerung ist unterteilt in den Ablauf eines jeden Parkplatzes und jeden Ladecontrollers. Beide Abläufe sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 dargestellt.

Der parkplatzbezogene Ablauf, wie in Abbildung 6.1 gezeigt, besteht aus sieben möglichen Zuständen. Als Anfangszustand, solange noch kein Fahrzeug angeschlossen ist, liegt der Zustand *EMPTY* vor. Sobald ein Fahrzeug angeschlossen ist ändert sich der Zustand von *EMPTY* zu *PENDING*. Ist das angeschlossene Fahrzeug für das Laden autorisiert, geht der Zustand in *PRE\_CHARGE\_WAIT* über, in welchem das Fahrzeug auf das Zuschalten eines Ladecontrollers wartet. Sobald der Ladecontroller zugeschaltet ist, erhält der Parkplatz den Zustand *PRE\_CHARGE*, in dem das Anladen durchgeführt wird. Nach Abschluss des Anladens geht der Parkplatz in den normalen Ladezustand *CHARGE* über. Wird der Ladevorgang durch Erreichen der maximalen Batteriekapazität abgebrochen, wechselt der Zustand zu *FINISHED*. Falls der Ladevorgang durch den Nutzer beendet wird bzw. das Ladekabel entfernt wird, stellt sich wieder der Zustand *EMPTY* ein. Laden mehr Fahrzeuge als Ladeeinrichtungen zur Verfügung stehen werden die Fahrzeuge mit



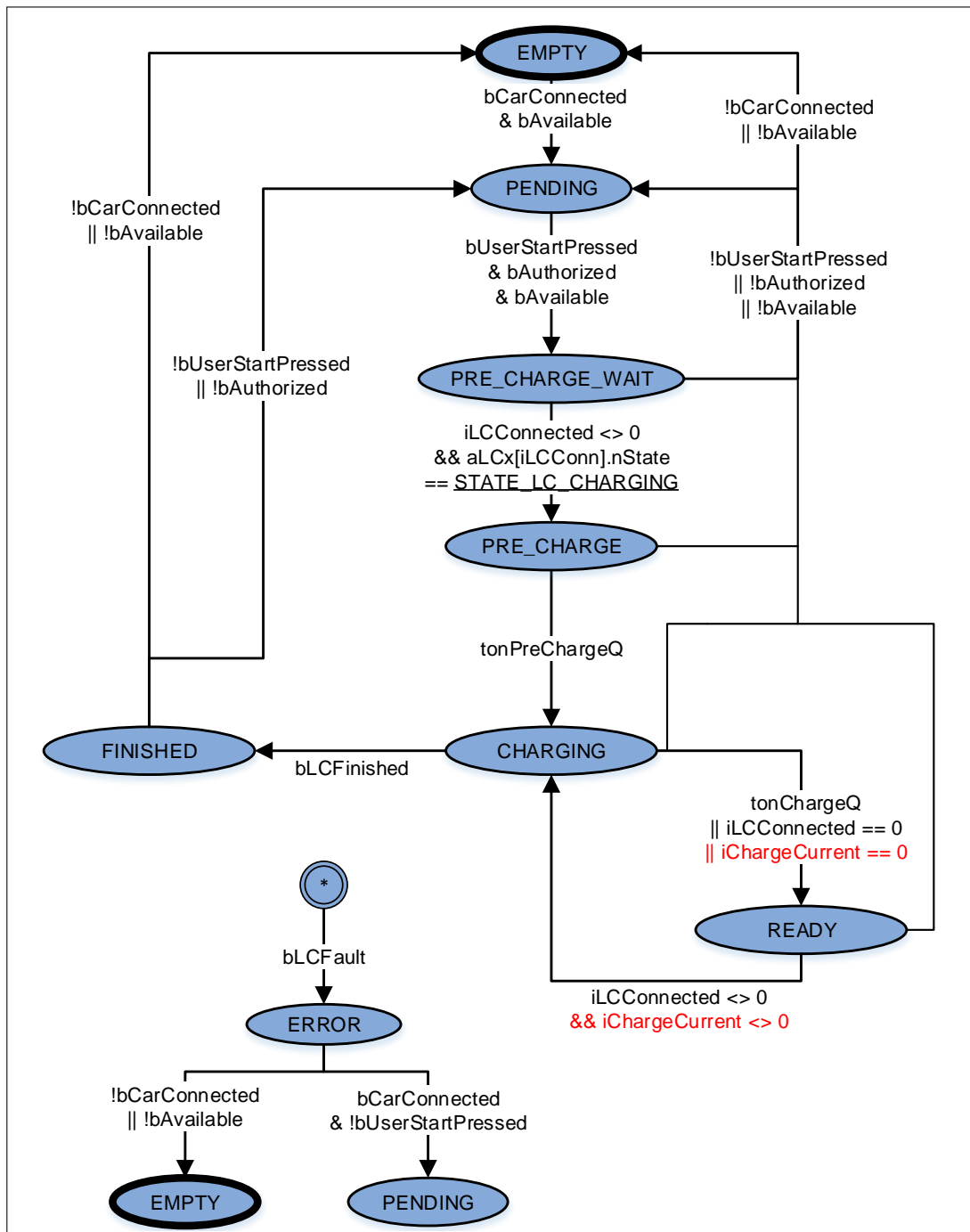


Abbildung 6.1.: Ablaufdiagramm der SPS-Steuerung der ChargeBase von ChargeHere für die Zustände der angebundenen Parkplätze. in rot: Ergänzte Bedingungen für die Integration des Lastmanagements.

dem geringsten Score in eine Ladepause versetzt, den Zustand *READY*. Aus diesem Zustand heraus kann der Ladevorgang durch den Nutzer abgebrochen (*EMPTY*) oder fortgesetzt (*CHARGING*).

Grafik 6.2 zeigt den steuerungstechnischen Ablauf bezogen auf den einzelnen Ladecontroller. Nach dem Initialisieren (*INIT*) befinden sich die Ladecontroller im Zustand *IDLE*

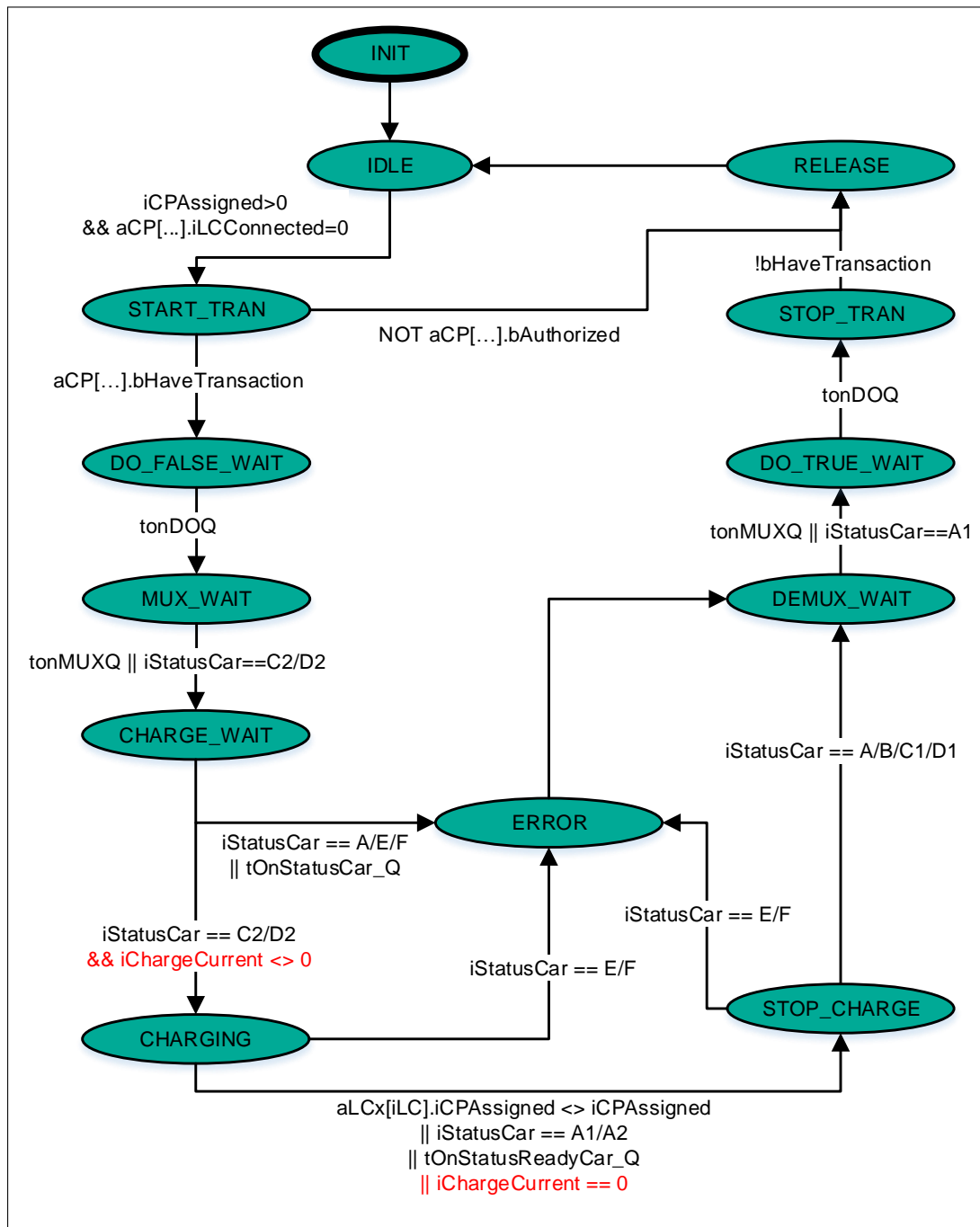


Abbildung 6.2.: Ablaufdiagramm der SPS-Steuerung der ChargeBase von ChargeHere für die Zustände der angebundenen Ladecontroller. in rot: Ergänzte Bedingungen für die Integration des Lastmanagements.

in dem diese für einen Ladevorgang verfügbar sind. Wird ein Fahrzeug angeschlossen ändert sich der Zustand zu *START\_TRAN*. Besitzt das Fahrzeug eine Autorisierung zum Laden wechselt der Zustand erst zu *DO\_FALSE\_WAIT*, dann zu *MUX\_WAIT* und anschließend zu *CHARGE\_WAIT*. Ist das Fahrzeug und die Ladetechnik bereit zum Laden, stellt sich der Zustand *CHARGING* ein. Gibt das Fahrzeug keine Ladebereitschaft an, tritt der Zustand *ERROR* ein. Ausgehend vom Zustand *CHARGING* kann bei Melden

eines fehlerhaften Zustands durch das Fahrzeug der Zustand *ERROR* oder durch das reguläre Beenden des Ladevorgangs der Zustand *STOP\_CHARGE* eintreten. Befindet sich der Ladecontroller im Zustand *STOP\_CHARGE* tritt im regulären Betrieb anschließend der Zustand *DEMUX\_WAIT*, andernfalls *ERROR*, ein. Sowohl von *DEMUX\_WAIT* als auch *ERROR* kann nur der Zustand *DEMUX\_WAIT* erreicht werden. Ausgehend hiervon wird über *DO\_TRUE\_WAIT*, *STOP\_TRAN* und *RELEASE* die Ladeeinheit wieder freigegeben.

Wie bereits in Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben ist es nicht möglich mithilfe des CP-Signals einen Stellstrom von 0 A zu definieren. Der minimal mögliche Stellstrom liegt bei 6 A. Da für das Lastmanagement jedoch der Stellstrom 0 A benötigt wird, muss dieser Softwareseitig auf der SPS realisiert werden. Hierfür werden die in den Ablaufdiagrammen 6.1 und 6.2 in rot eingezeichneten Argumente hinzugefügt. Somit können im parkplatzbezogenen Ablaufdiagramm ladende Fahrzeuge bei einem Stellstrom *iChargeCurrent* von 0 A in den Zustand *READY* gesetzt werden. Ändert sich der Stellstrom *iChargeCurrent* auf einen Wert über 0 A kann das Fahrzeug wieder in den Zustand *CHARGING* zurückkehren. Im ladecontrollerbezogenen Programmablauf führt dies dazu, dass beim Verlassen des Zustands *CHARGING* der Zustand *STOP\_CHARGE* eintritt und somit der Ladecontroller demultiplext wird. Befindet sich das Fahrzeug nicht in dem Zustand *CHARGING* bekommt das Fahrzeug auch keinen Ladecontroller zugeschaltet.

Positiver Nebeneffekt bei diesem Weg zum Setzen der Stellströme auf 0 A ist das zwangsläufige austauschen der aktuell ladenden Fahrzeuge. So kann es vorkommen, dass ein Fahrzeug aufgrund der Unsymmetrie nicht weiter geladen werden kann. Durch das freigeben des Ladecontrollers kann ein anderes Fahrzeug über den frei gewordenen Ladecontroller geladen werden. Handelt es sich bei dem jetzt verbundenen Fahrzeug um ein 3-Phasig oder auf einer schwach belasteten Phase Ladendes Fahrzeug kann hierdurch in Summe die Ladeleistung gesteigert werden. Nachteilig ist jedoch die zusätzliche Belastung der Relais durch das Zu- und Abschalten der Fahrzeuge.

## 6.2. Entwicklung des Lastmanagement-Programms

Das Lastmanagementsystem wird auf einem RevPi ausgeführt und in der Programmiersprache Java (JDK 8) entwickelt. Der Lastmanagement-Algorithmus entspringt dem Matlab/Simulink-Modell. Für die Umsetzung in Java wird das gesamte Programm neu entwickelt, da das Lastmanagement-System in Matlab/Simulink ausschließlich im Hinblick auf die Funktionalität entwickelt wurde. Neben der Anpassung an die Programmiersprache ist das Lastmanagement-System in Java auch auf die Aspekte Laufzeit, Wartbarkeit und Systemstabilität entwickelt. Des Weiteren ist das Java-Programm für eine Interaktion mit der SPS angepasst.

Aufgeteilt ist das Lastmanagementsystem in insgesamt elf Klassen von denen fünf Klassen nicht elementar sind und im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden. Zu den elementaren Klassen gehören:

1. Hauptklasse
2. Prüfzyklus

3. Leistungsumwandlung
4. Stellstromreduktion
5. Optimierer
6. Datenlogger
7. Kommunikationsschnittstelle

Die Klasse Kommunikationsschnittstelle wird in Abschnitt ?? vorgestellt. Alle anderen Klassen sind Inhalt diese Abschnitts.

### 6.2.1. Hauptklasse

Durch das Hauptprogramm wird das gesamte Lastmanagementsystem gesteuert und ist somit die übergeordnete Klasse des Systems. Das Hauptprogramm weist jedem Parkplatz einen entsprechenden Zustand zu. Dieser Zustand ist sowohl vom Lastmanagement als auch vom Zustand auf Seite der SPS-Steuerung abhängig. Es gibt die sechs Zustände *INIT*, *carEmpty*, *carWait*, *carCheck*, *carCharge* und *carSleep*. Der Zustandsautomat des Hauptprogramms ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Beim Neustart des Lastmanagementsystems befinden sich anfangs alle Parkplätze im Zustand *INIT*. In diesem Zustand beschreibt das System alle fahrzeugabhängigen mit den Anfangswerten. Außerdem wird die Schnittstelle zur SPS aufgebaut. Sobald alle Parkplätze initialisiert sind ist das System einsatzbereit.

Im Anschluss an den Zustand *INIT* wechseln alle Parkplätze auf den Zustand *carEmpty*. Der Zustand *carEmpty* besteht so lange, bis ein PKW angeschlossen wird und tritt ein sobald die Verbindung zum Fahrzeug wieder abgebrochen wird. Ist ein Fahrzeug vollständig geladen, jedoch weiterhin angeschlossen, kann dieser Zustand nicht eintreten. Somit beginnt ein Fahrzeug das aus dem Zustand *carEmpty* kommt immer einen neuen Ladevorgang. Zustand *carEmpty* kann ausgehend von jedem Zustand erreicht werden.

Nach dem Anschließen eines Fahrzeugs an die Ladeinfrastruktur stellt sich der Zustand *carCheck* ein. Allerdings muss hierfür ausreichend Kapazität zur Verfügung stehen. Von einem neu angeschlossenen Fahrzeug sind keine Daten über Phasen und Leistung bekannt. Aus diesem Grund werden alle Grenzwerte angepasst und die Ladeleistungen ladender Fahrzeuge angepasst. Das System reduziert die Grenzwerte für die Unsymmetrie um 3.7 kVA für den Fall einer Symmetrieüberwachung, die Ladeströme um 16 A pro Phase und die Summenleistung um 11 kVA. Kann das System einen dieser Werte nicht einhalten, kann das Fahrzeug nicht in den Zustand *carCheck* wechseln.

Ist ein Fahrzeug angeschlossen, kann jedoch auf Grund von Engpässen nicht in den Zustand *carCheck* wechseln, wird dem Fahrzeug der Zustand *carWait* zugeteilt. Zwar werden in *carWait* die Stromstufen nicht geprüft, das Anladen kann allerdings nicht unterbunden werden. Dies kann zu einer zeitweiligen Überschreitung von Grenzwerten führen. Da der Anladevorgang nur wenige Sekunden andauert und das gleichzeitige Anschließen mehrere Fahrzeuge sehr unwahrscheinlich ist, wird die Gefahr der kurzzeitigen Grenzwertüberschreitung in Kauf genommen. Bezüglich der Phasensymmetrie ist laut VDE-4100 in Unterabschnitt 2.4.1 der gleitende Minutenwert zu betrachten. Ein einzelner Anladevorgang überschreitet diesen nicht. Sobald Kapazität für das Prüfen des

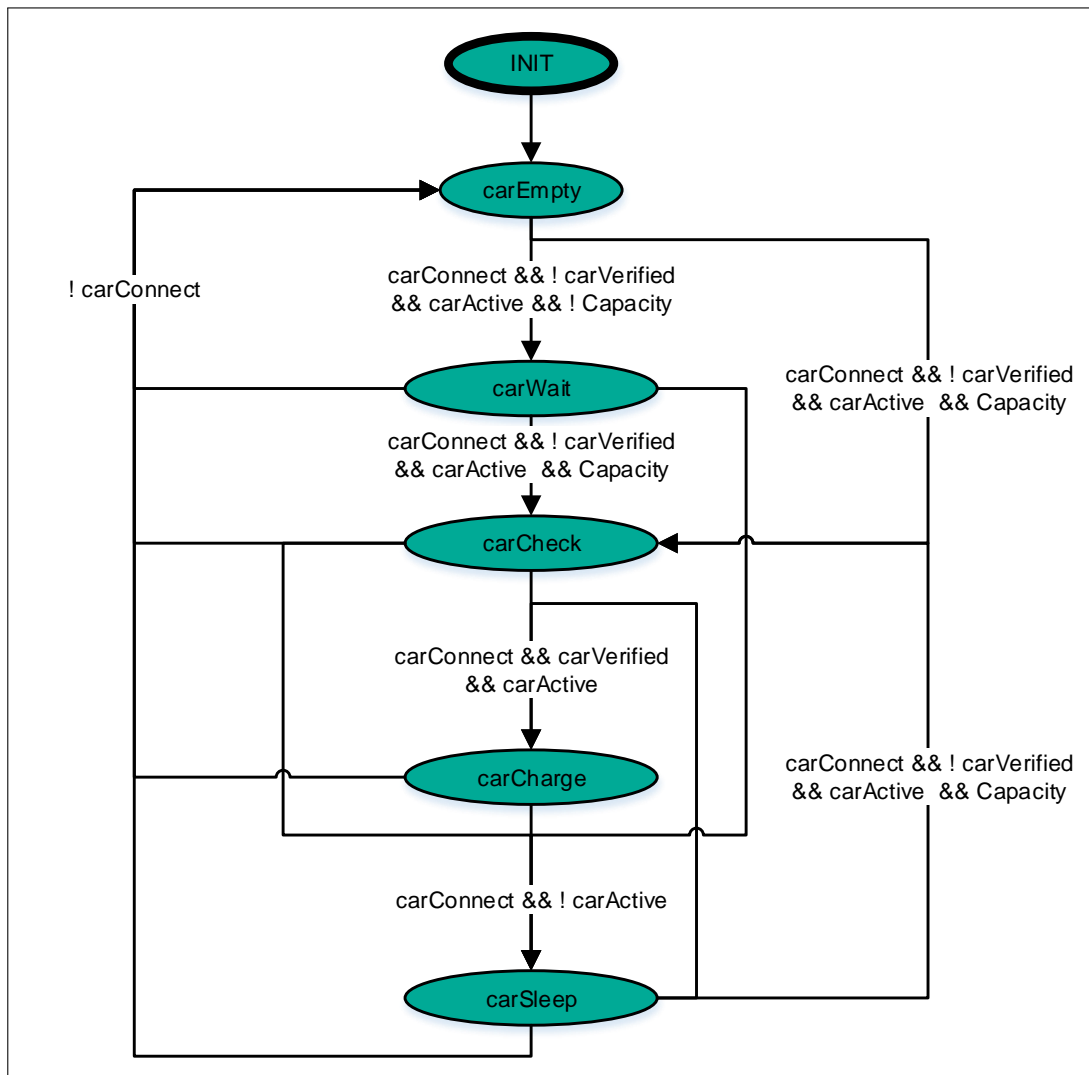


Abbildung 6.3.: Zustandsautomat des Hauptprogramms des entwickelten Lastmanagementsystems.

Stellströme frei wird, stellt sich ausgehend vom Zustand *carWait* der Zustand *carCheck* ein.

Nachdem die einzelnen Stellströme des angeschlossenen Fahrzeugs geprüft sind stellt sich der Zustand *carCharge* ein. In diesem Zustand findet der Eigentliche Ladevorgang statt. Das System kann die Stellströme des Fahrzeugs in diesem Zustand voll umfänglich steuern. Erreicht das Fahrzeug diesen Zustand aus *carCheck*, so müssen beim eintreten diesen Zustands die Grenzwerte wieder um die reduzierten Werte erhöht werden.

Befindet sich ein Fahrzeug in einer Ladepause, weil mehr Fahrzeuge angeschlossen als Ladeeinheiten verfügbar sind, weist das System dem Fahrzeug den Zustand *carSleep* zu. In *carSleep* ist das Fahrzeug bereits geprüft, allerdings kann der Zustand auch erreicht werden, wenn das Fahrzeug während des Prüfvorgangs von der Ladeeinrichtung in eine Ladepause versetzt wird. Ist das Fahrzeug vom Zustand *carCheck* in den Zustand *carSleep* versetzt worden, so müssen beim eintreten diesen Zustands wiederum die Grenzwerte um die reduzierten Werte erhöht werden. Weist das Lastmanagementsystem

einem Fahrzeug den Stellstrom 0 A zu, so setzt die SPS das Fahrzeug inaktiv und der Zustand ändert sich ebenfalls zu *carSleep*. Sobald die SPS das Fahrzeug wieder auf aktiv setzt, wofür ein Stellstrom von über 0 A und ein entsprechender Score erforderlich ist, ändert sich der Zustand wieder von *carSleep* zu *carCharge*.

Das wieder aktivieren von Fahrzeugen die eine Stellstrom von 0 A besitzen und sich somit im Zustand *carSleep* oder *carWait* muss organisiert erfolgen. Werden alle Fahrzeuge im Zustand *carSleep* oder *carWait* nach dem freiwerden von Kapazität zugeschaltet, kann es im Fall nicht ausreichender Leistung, zur fortlaufendem Zu- und Wegschalten von Fahrzeugen kommen. Hiermit verbunden sind unnötige Schalthandlungen die das System bei Möglichkeit unterbinden sollte. Zudem muss die höhere Anzahl an Ladepunkten im Vergleich zu der Anzahl der Ladeeinheiten berücksichtigt werden. Außerdem ist nicht jeder Ladepunkt von jeder Ladeeinheit erreichbar. Um ein Fahrzeug aktivieren zu können muss das System den Stellstrom auf mindestens 6 A erhöhen.

Jedes angeschlossene Fahrzeug ist in einer 'Warteschlange' enthalten. Bevor das Lastmanagement versucht ein Fahrzeug aus der Warteschlange in den Zustand *carCheck* oder *carCharge* zu holen, prüft es die verfügbare Kapazität. Hierzu prüft das System die Differenz zwischen der verfügbaren Ladeleistung und der aktuellen Ladeleistung für den Fall, dass jedes Fahrzeug den Stellstrom 6 A umsetzt. Auf diese Weise prüft das Programm die Phasensymmetrie, Leiterströme und Leistung. Genügt die Differenz um das erste Fahrzeug aus der Warteschlange zu aktivieren, gibt das System den Stellstrom 6 A vor. Anschließend wartet das System für eine festgelegte Zeit, ob sich der Zustand zu *carCharge* oder *carCheck* ändert. Kehrt das Fahrzeug nicht in den Ladezustand zurück oder liegt noch eine ausreichende Kapazität vor, prüft das System das nächste Fahrzeug in der Warteschlange. Dieser Vorgang wird immer ausgeführt, wenn sich die Leistungen und Ströme ändern.

Ob sich die Parameter eines Fahrzeuges geändert haben und somit der Zustand des Fahrzeugs angepasst werden muss, wird in einer festgelegten Frequenz geprüft. Ändert sich der Zustand eines Fahrzeugs, muss der Optimierer ausgeführt werden. Da der Optimierer immer die Stellströme aller ladenden Fahrzeuge auf einmal bestimmt, wird er bei Bedarf nachdem alle Fahrzeuge auf Zustandsänderungen geprüft sind ausgeführt, sofern mindestens ein PKW dies erfordert. Alle Ladepunkte an denen kein Fahrzeug angeschlossen ist, erhalten den Stellstrom 6 A zugewiesen und können dadurch in jedem Fall Angeladen werden. Ist die verfügbare Anschlussleistung ausgeschöpft, setzt das System die Stellströme aller Fahrzeuge im Zustand *carSleep* auf 0 A. Hierdurch vermeidet das System ein Zuschalten dieser Fahrzeuge. Wird wieder Ladekapazität frei, setzt das System die Stellströme aller Fahrzeuge im Zustand *carSleep* auf 6 A.

Für die Reduktion der Stellströme in Unterabschnitten 6.2.4 benötigt das System die Anzahl der Phasen über die das Fahrzeug lädt. Die Anzahl der Phasen gibt Aufschluss darüber ob die Belastung symmetrisch oder unsymmetrisch vorliegt. Zur Ermittlung der Phasenanzahl prüft das System für jeden geprüften Stellstrom die Phasenströme. Grundsätzlich verwendet das Fahrzeug beim Laden immer die maximal mögliche Anzahl an Phasen. Befindet sich das Fahrzeug allerdings im Endladebereich, ist ein Reduzieren der Phasenanzahl auf eine oder zwei möglich. Da eine unsymmetrische Belastung problematischer als eine symmetrische ist, verwendet das System immer die minimale Phasenanzahl.

Das entwickelte Lastmanagement besitzt keine direkte Rückkopplung. Folglich besteht die Gefahr einer Sollwertabweichung durch eine Differenz zwischen den geprüften Werten aus Zustand *carCheck* und den wahren Werten die aktuell vorliegen. Um einen hieraus resultierenden Fehler zu vermeiden werden auch die aktuell vorliegenden Werte geprüft. Hierfür vergleicht das System in festgelegten Abständen die aktuellen Messwerte mit denen des Prüfzykluses beim selben Stellstrom. Weichen die Werte zu stark voneinander ab, merkt sich das System den Ladenpunkt. Liegt beim erneuten durchlaufen der Prüfung immernoch eine Abweichung vor, überschreibt das System die Werte des Prüfstroms mit den aktuellen Werten. Folglich wird der Prüfzyklus nicht neu durchlaufen, sondern nur die Werte des vorliegenden Stellstroms aktualisiert. Trägt das System neue Werte ein, ermittelt es auch die Anzahl der Phasen neu. Hat das System sich einen Parkplatz aufgrund einer Abweichung gemerkt wird dies verworfen falls vor dem erneuten Prüfen eine Stellstromänderung durchgeführt wird. Somit wird eine Korrektur aufgrund einer Stellstromänderung vermieden.

Das Lastmanagementsystem ist so entwickelt, dass es sowohl dynamisch als auch statisch einsetzbar ist. Im Wesentlichen unterscheiden sich statisches und dynamisches Lastmanagement nur anhand der zusätzlichen Überprüfung auf eine Veränderung der Grenzwerte. Ändern sich beim dynamischen Lastmanagement die Grenzströme oder Grenzleistung, so führt das System ebenfalls eine Optimierung durch. Beim statischen Lastmanagement bleibt dies erspart. Lediglich die Schnittstelle über die das System dynamische Grenzwerte erhält ist in dieser Arbeit nicht entwickelt. Grund sind die fehlenden Vorgaben bezüglich des Kommunikationsprotokolls zum derzeitigen Zeitpunkt.

### **6.2.2. Prüfzyklus**

Die erste Version des Lastmanagementsystems hat die Prüfung der einzelnen Stellströme auf Seite der SPS durchgeführt, um das Datenaufkommen zwischen SPS und RevPi möglichst gering zu halten. Allerdings müssen zur die Überwachung des tatsächlich vorliegenden Zustands alle zwei Sekunden die Live-Daten jedes Zählers an den RevPi übertragen werden. Diese bieten sich auch zum ausführen des Prüfzyklus an. Zudem kann hierdurch der Anpassungsaufwand zur Anbindung des Lastmanagements auf Seiten der SPS reduziert werden. Insgesamt kommt die Kommunikation hierdurch mit weniger Daten aus. Außerdem ist der Ablauf der Datenübertragung somit weniger komplex. Für den Prüfzyklus müssen der SPS vom Lastmanagement somit lediglich die Stellströme vorgegeben werden.

Sobald das System ein neu angebundenes Fahrzeug erkennt, versucht es den Prüfzyklus durchzuführen. Hierfür muss allerdings ausreichend Kapazität verfügbar sein. Ist ausreichend Kapazität verfügbar, beginnt der Prüfzyklus mit der Reduktion der Grenzwerte. Leistung, Leiterströme, Phasensymmetrie und die einphasigen Lasten pro Fahrzeug werden im ersten Schritt um den Maximalwert reduziert. Also die Leistung um 11 kW, alle Leiterströme um 16 A und die Phasensymmetrie und die einphasige Leistung um 3,68 kW verschärft. Darauf hin beginnt das System mit dem Stellstrom 6 A. Jeder Stellstrom liegt für 10 s an. Innerhalb dieser 10 s liegen auf Seiten des Lastmanagements in jedem Fall die entsprechenden Messwerte an. Nach Ablauf der 10 s werden die letzten vorliegenden Werte gespeichert. Sobald der Stellstrom 7 A erreicht ist prüft das System die

Anzahl der verwendeten Phasen. Lädt das Fahrzeug mit drei Phasen, gibt das System die reservierten Symmetriekapazitäten wieder frei. Nach Erreichen des Stellstroms 16 A wird nochmals geprüft über welche Phasen das Fahrzeug lädt und ebenfalls abgespeichert.

Kann der Prüfzyklus nicht am Stück durchgeführt werden, da das zu prüfende Fahrzeug vom Lademanagement in eine Ladepause versetzt wird, kann das System diesen nach dem erneuten aktivieren des Fahrzeugs fortsetzen. Das System prüft hierfür den letzten erfolgreich durchgeführten Prüfstrom erneut und setzt den Vorgang dann fort. Hat das System den letzten Ladestrom (16 A) erfolgreich geprüft ist der Prüfzyklus abgeschlossen. Vom System wird nun die reservierte Leistung wieder freigegeben und das Fahrzeug wechselt in den Zustand *carCharge*.

### 6.2.3. Leistungsumwandlung

Das Lastmanagementsystem soll sowohl Leistungen und Ströme als statische oder dynamische Eingangsparameter einhalten können. Allerdings ist das Reduzieren der Stellströme und der Optimierungsvorgang selbst nur unter Inkaufnahme einer Steigerung des Rechenaufwands oder einer Reduktion der Ergebnisqualität in der Lage beide Parameter zu berücksichtigen. Ursache ist das gegenseitige Bedingen der Leiterströme und der Leistung. Leistungsvorgaben sind immer summarisch zu betrachten. Ströme sind hingegen auf einen Leiter bezogen. Hierbei muss immer der strengere Parameter gelten. Auf Grundlage des strengsten Parameters sollte auch die Reduktion der Stellströme und die Optimierung erfolgen.

Um der aufgezeigten Problematik zu entgehen führt das System die Stellstromreduktion und die Optimierung ausschließlich auf Grundlage von Strömen aus. Hierfür wird die Leistungsgrenze in Stromgrenzwerte umgerechnet. Dazu berechnet das System aus der Leistung einen Strom. Liegt die Summe der Leiterströme unter diesem Stromwert, verwendet das System ausschließlich die Leiterströme. Andernfalls verteilt das System den verfügbaren Strom auf die einzelnen Phasen auf. Würde das System die Ströme gleichmäßig auf alle Phasen verteilen könnte die mögliche Ladeleistung oftmals nicht ausgeschöpft werden. Ursache ist die nicht symmetrische Verteilung von Ladeleistung durch nicht 3-Phasig ladende Fahrzeuge.

Die Aufteilung des aus der Leistung berechneten, verfügbaren Stroms erfolgt anteilmäßig auf aktiven Ladeströme aller drei Phasen. Hierzu berechnet die Klasse anfangs den maximal vorliegenden Leiterstrom jeder Phase aus der Summe aller aktiven Fahrzeuge. Kann auf einer Phasen durch einen begrenzten Leiterstrom der anteilmäßige Strom umgesetzt werden, verteilt das System diese überschüssige Kapazität auf die anderen Leiter. Somit kann das Lastmanagement die Reduktion der Stellströme und das Optimierungsverfahren auf Grundlage von Stromwerten ausführen.

### 6.2.4. Stellstromreduktion

Der Optimierungsvorgang ist sehr zeitaufwändig, vor allem da das Optimierungsprogramm auf einem RavPi ausgeführt werden soll. Theoretisch sind bei acht ladenden Fahrzeugen und jeweils elf möglichen Stellströmen 430 Millionen Kombinationen möglich. Um alle



Kombinationen berechnen zu können, benötigt beispielsweise ein Notebook mit *Intel(R) Core(TM) i7-8850H CPU @ 2.60GHz* und *16 GB* Arbeitsspeicher etwa sechs Minuten. Auf einem RevPi dürfte die Rechendauer nochmals erheblich länger sein. Für den Einsatz als Lastmanagementsystem ist dies nicht hinnehmbar.

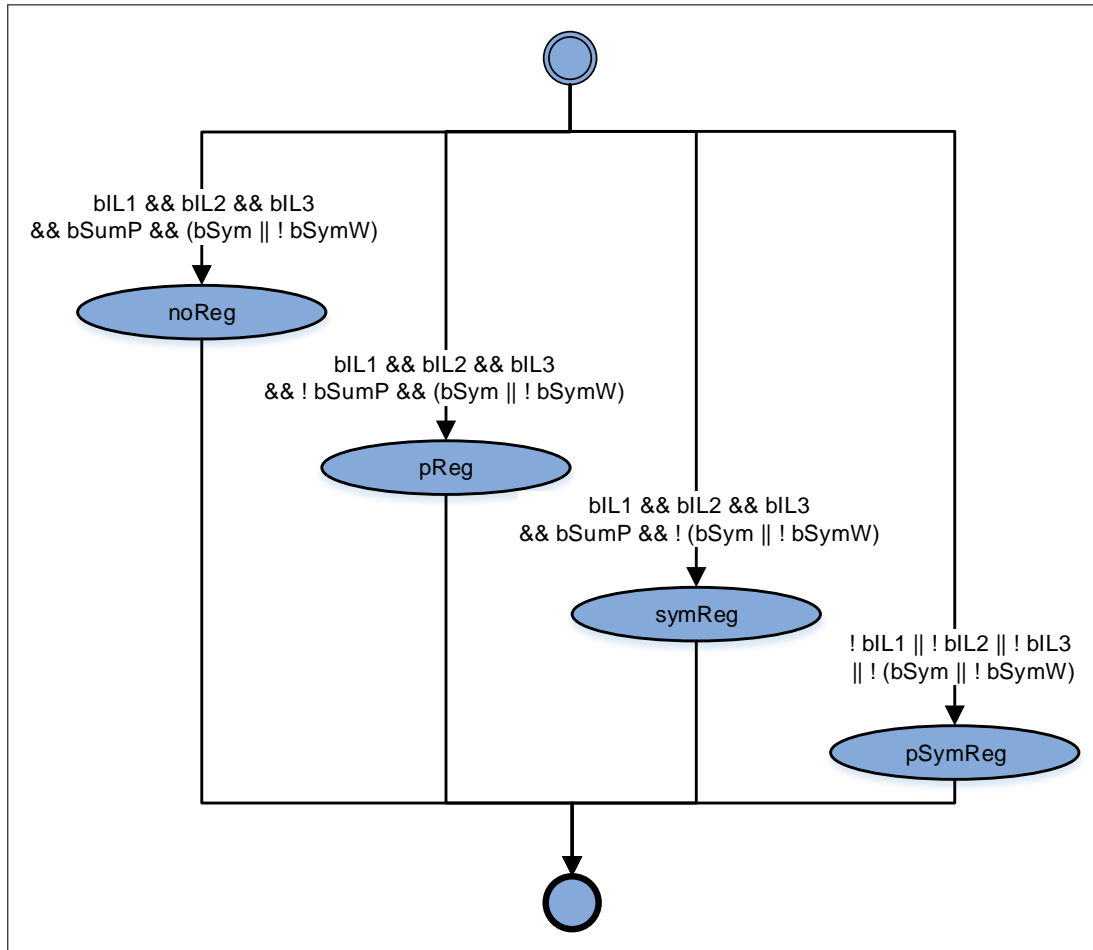


Abbildung 6.4.: Zustandsautomat des Programms zur Reduktion der in den Optimierer einfließenden Stellströme.

Um die Rechenzeit zu reduzieren begrenzt das System die Anzahl der möglichen Stellströme auf maximal vier pro Fahrzeug. Zur Auswahl der Stellströme ermittelt das System nach ausführen der Datenreduktion die Belastungsart. Unterschieden wird zwischen 'keine Steuerung notwendig', 'Leiterstromsteuerung', 'Symmetriesteuerung' und 'allgemeiner Steuerung'. Diese Arten der Grenzwertüberschreitung teilt das System anhand der Maximalwerte aller Fahrzeuge ein. Die Einteilung findet immer für alle Fahrzeuge gemeinsam statt.

Halten die Fahrzeuge alle Grenzwerte ein, liegt die Belastungsart 'keine Steuerung notwendig' vor. In diesem Fall gibt das System als mögliche Stellströme ausschließlich den maximalen Wert 16 A aus. Eine Optimierung ist in diesem Fall nicht notwendig.

Liegt ausschließlich eine Grenzwertüberschreitung bei den Leiterströmen und somit Zustand 'Leiterstromsteuerung' vor, verteilt das System die Ströme diskriminierungsfrei auf alle angeschlossenen PKWs. Die Vergabe der Ladeströme erfolgt auf Grundlage des

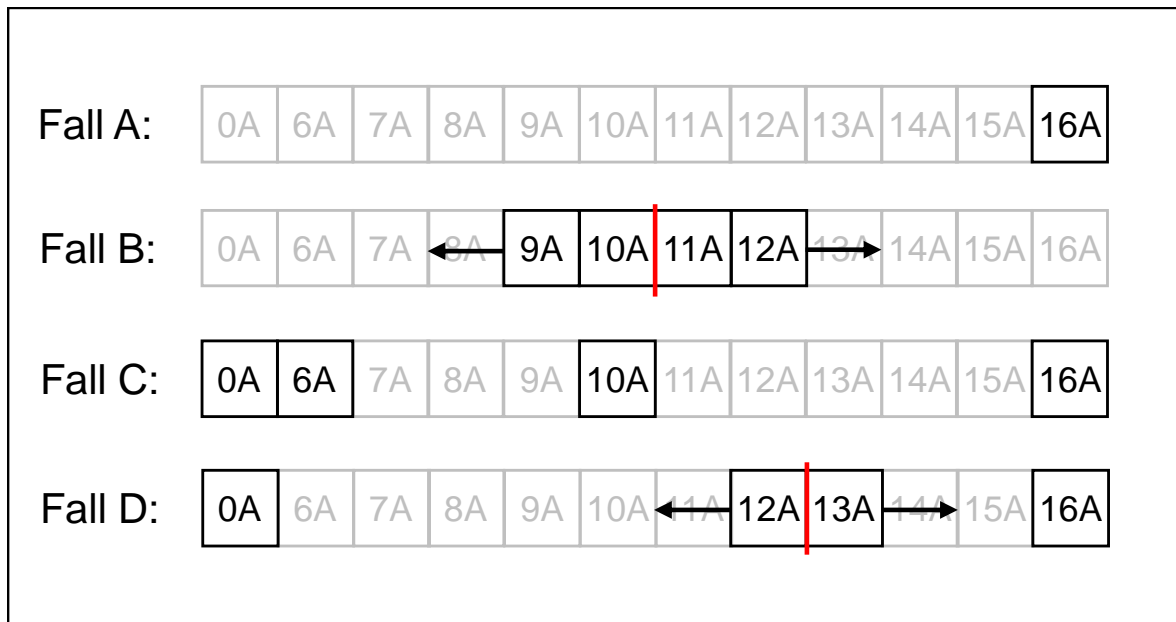


Abbildung 6.5.: Auswahlmöglichkeiten zur Reduktion der Stellströme. In rot: Mittelwert der verfügbaren Leistung. Fall A: Keine Steuerung notwendig. Fall B: Ausschließlich Leistungsreduktion notwendig. Fall C: Ausschließlich Symmetriesteuerung. Fall D: Voll umfängliche Steuerung.

Mittelwerts der Ladeströme aller verwendeter Phasen und nicht der Stellströme. 1-Phasig und 2-Phasig ladende Fahrzeuge können daher ihre Ladeleistung besser ausnutzen. Aufgeteilt wird der Ladestrom anhand des Mittelwerts des gesamten verfügbaren Ladestroms. Von jedem Fahrzeug wählt das System zwei Stellströme mit einem resultierenden Strom unter und zwei Stellströmen mit einem resultierenden Strom über dem Mittelwert aus. Sind unter den ausgewählten Stellströmen Werte mehrfach vorhanden, löscht das System die doppelten anschließend wieder.

Ermittelt das System lediglich einen Engpass im Hinblick auf die Phasensymmetrie, ergibt sich der Zustand 'Symmetriesteuerung'. Bei dieser Variante zur Reduktion der Anzahl der Stellströme betrachtet das System ausschließlich nicht dreiphasig ladende Fahrzeuge. Leistungen von Fahrzeugen die hingegen ein- oder dreiphasig laden müssen so begrenzt werden, dass in jedem Fall eine Unsymmetrie vermieden werden kann. Ein nicht symmetrisch angebundenes Fahrzeug kann zum einen auf einer übermäßig belasteten Phase eine Unsymmetrie verursachen, andererseits kann es auch auf einer gering belasteten Phase eine Unsymmetrie reduzieren. Zeiphasig angebundene Fahrzeuge können auf den Verwendeten Phasen sogar beide Zustände verursachen. Um die Anzahl der Stellströme mit möglichst geringem Rechenaufwand effektiv zu reduzieren werden daher immer die Stellströme 0 A, 6 A, 10 A und 16 A verwendet.

Im Fall einer Grenzwertüberschreitung bei Leiterströmen und Leistung und/oder Phasensymmetrie führt das System eine Stellstromreduktion im Zustand 'allgemeiner Steuerung' durch. Auch in diesem Fall wird zwischen symmetrisch und unsymmetrisch ladenden Fahrzeugen unterschieden. Symmetrisch ladende Fahrzeuge verarbeitet das System wie bei der 'Leistungssteuerung' mit ergänztem Stellstrom 0 A. Die Stellströme der unsym-

metrisch angebundenen Fahrzeuge werden wiederum wie bei der 'Symmetriesteuerung' reduziert. Somit kann das System in jedem Fall die Grenzwerte einhalten.

Abbildung 6.5 gibt einen Überblick darüber, wie das System die Anzahl der Stellströme reduziert.

### 6.2.5. Optimierer

Der Optimierer ermittelt aus allen möglichen Stellströmen die Kombinationen mit dem besten Resultat. Welche Kombination das beste Resultat ergibt, bestimmt die Fitnessfunktion. Als mögliche Kombinationen kommen alle Stellströme in Frage, die sich bei der Reduktion der Stellstromwerte ergeben haben. Sind an das System jedoch nur weniger als fünf Fahrzeuge angeschlossen und es kann bei maximaler Belastung mindestens ein Grenzwert nicht eingehalten werden, so prüft das System alle möglichen Stellströme, um das beste Ergebnis zu erreichen. Zwar ist die Reduktion der Stellströme bereits so ausgelegt, dass das System eine sehr gute Kombination finden kann, ein vollständiger Stellstrom-Pool kann dennoch in manchen Fällen ein besseres Ergebnis erreichen. Außerdem ist der Rechenaufwand bei maximal vier Fahrzeugen mit jeweils zwölf verschiedenen Stellströmen und somit weniger als 20700 Kombinationsmöglichkeiten hinnehmbar.

Aufgebaut ist der Optimierer aus einer Funktion zur Ermittlung der Fitness und einer Funktion, um alle möglichen Kombinationen zu ermitteln. Um bei einer variablen Anzahl von Fahrzeugen effizient alle möglichen Stellstromkombinationen zu erhalten, ist das System rekursiv aufgebaut. Das heißt, die Funktion ruft sich selbst immer wieder auf. Der Ablauf dieser rekursiven Funktion ist in Abbildung 6.6 als Pseudocode dargestellt.

Die Fitnessfunktion ist elementarer Bestandteil des Lastmanagements. Erst mit der Fitnessfunktion kann das System die bestmögliche Kombination der einzelnen Ladeströme ermitteln. Um die Fitness berechnen zu können, ermittelt die Funktion zu Beginn die summarischen Kennwerte. Diese Kennwerte sind die einzelnen Leiterströme sowie die einphasig anfallende Leistung pro Phase. Anhand dieser Kennwerte prüft die Funktion, ob die Grenzwerte eingehalten werden, und den Score, der die Güte der Kombination wiedergibt. Berechnet wird die Güte der Kombination für die Ausnutzung der verfügbaren Leiterströme und die gleichmäßige Belastung über alle Fahrzeuge.

Zur Ermittlung der Güte der Stromabweichung berechnet die Funktion die Abweichung zwischen den möglichen Ladeströmen  $I_{Grenz}$  und der jeweils vorliegenden Ladeströmen  $I_{Kombination}$ . Dieser Wert sollte möglichst gering sein. Wie bereits in Abschnitt 4.2 vorgestellt, berechnet die Funktion hieraus Fehlerquadrate. Durch das Berechnen der Fehlerquadrate wird die Abweichung zwischen den möglichen Leiterströmen und den Ladeströmen der Kombination deutlicher. Die Formel 6.2 zur Berechnung des Scores enthält außerdem Konstanten. Mit den Konstanten passt die Funktion den Wert des Scores so an, dass dieser mit dem zweiten Score  $SCORE_I$  in Korrelation gesetzt werden kann. Des Weiteren verfügt die Formel 6.2 zur Berechnung des Scores über die Variable  $k_I$ , die bei der Implementierung definiert wird. Ein hoher  $k_I$ -Wert steigert die Wichtigkeit des Scores.

$$SCORE_I = \left( \frac{I_{Kombination} - I_{Grenz}}{100} \right)^2 * k_I \quad (6.1)$$

```

1  Optimierer(nCPi, Stellstromkombination, nCPaktiv)
2  if nCPi < Anzahl_Parkplätze then
3    if Fahrzeug(nCPi) == carCharge then
4      nCPaktiv ++
5      for i = 0 to Stellströme[nCPi].länge
6        if Stellstromkombination.länge == nCPaktiv then
7          Stellstromkombination [nCPaktiv - 1] = mögliche_Stellströme[nCPi][i]
8        else
9          Stellstromkombination.hinzufügen(mögliche_Stellströme[nCPi][i])
10       end if
11       Optimierer(nCPi + 1, Stellstromkombination, nCPaktiv)
12       if nCPaktiv == Anzahl_ladender_Fahrzeuge then
13         FitnessPrüfen(Stellstromkombination)
14       end if
15     end for
16     return
17   else
18     Optimierer(nCPi + 1, Stellstromkombination, nCPaktiv)
19   end if
XX Optimierer(0, [ ], 0)

```

Abbildung 6.6.: Pseudocode der rekursiv arbeitenden Optimierungsfunktion des Lastmanagementsystems mit dem Parkplatz-Iterator  $nCPi$  und der Anzahl ladender Fahrzeuge  $nCPaktiv$ .

Der zweite Score  $SCORE_{sym}$  ermöglicht eine Validierung der gleichmäßigen Vergabe von Ladeleistung. Somit soll vermieden werden, dass manche Fahrzeuge unbegründet deutlich langsamer als andere laden. Hierfür berechnet die Funktion die Differenz zwischen dem Fahrzeugs mit dem geringsten Stellstrom  $I_{Stell,min}$  und dem Fahrzeug mit dem höchsten Stellstrom  $I_{Stell,max}$  der jeweiligen Kombination. Auch in diesem Fall berechnet die Funktion die Fehlerquadrate und multipliziert diese mit einer Konstanten zur Herstellung der Vergleichbarkeit beider Scores. In der Formel 6.2 kann ebenfalls über die Variable  $k_{sym}$  der Score kalibriert werden.

$$SCORE_{sym} = \left( I_{Stell,min} - I_{Stell,max} \right)^2 * k_{sym} \quad (6.2)$$

Nachdem das System den  $SCORE_I$  und  $SCORE_{sym}$  berechnet hat, prüft das System alle Parameter. Bei der Prüfung unterscheidet das System zwischen harten und weichen Grenzwerten. Zu den Harten Grenzwerten gehören die Phasenströme, die Phasensym-

metrie und die Leistung einphasiger Lasten pro Leiter. Falls die Anlagen die VDE 4100 nicht einhalten muss, können die Prüfung der Phasensymmetrie und der Leistung einphasiger Lasten pro Leiter deaktiviert werden. Andernfalls darf die Scheinleistungsdifferenz zwischen der am stärksten und der am schwächsten belasteten Phase nicht höher als 4,6 kVA liegen. Außerdem muss die Anlage, sofern diese der VDE 4100 unterliegt, die maximale Leistung einphasiger Lasten pro Leiter von 13,8 kVA einhalten. Hält das System alle harten Grenzen ein folgt die Prüfung auf die weichen Grenzen.

Zur Prüfung der weichen grenzen addiert das System die beiden Scores  $SCORE_I$  und  $SCORE_{sym}$  zusammen. Hieraus ergibt sich der Score  $SCORE_{I\&Sym}$ . Beim Beginn jeder Optimierung setzt das System einen Score  $SCORE_{Top} = 0$ . Erfüllt eine Kombination die harten Kriterien überschreibt diese den bisherigen Score  $SCORE_{Top}$  und das System hinterlegt die dazugehörige Kombination. Jede folgende Kombination die die harten Kriterien erfüllt überschreibt den aktuellen  $SCORE_{Top}$  nur falls  $SCORE_{Top} \geq SCORE_{I\&Sym}$ . Sind alle möglichen Kombinationen geprüft gibt das System die Kombination aus, die den geringsten Score besitzt und alle harten Kriterien erfüllt.

### 6.2.6. Datenlogger

Um die Funktionalität des Lastmanagementsystems erproben zu können müssen die resultierenden Strom und Leistungswerte aufgezeichnet werden. Zwar verfügt die Ladeeinrichtung über einen Datenlogger, dieser ist jedoch für das Prüfen der Anlagenfunktionalität ausgelegt und loggt die Daten nur eventbasiert. Zudem zeichnet die Logger nur Ströme auf und keine Leistungen. Damit dennoch vollständige Zeitreihen während des gesamten Ablaufes aufgenommen werden können, besitzt das Lastmanagementsystem einen eigenen Datenlogger. Das Lastmanagementsystem zeichnet hiermit die Messwerte auf, die über Modbus übertragen werden.

Die gemessenen Größen  $I_{L1,CP}$ ,  $I_{L2,CP}$ ,  $I_{L3,CP}$  und  $P_{sum,CP}$  trägt der Datenlogger in ein CSV-Dokument ein. Geschrieben werden die Werte in einem festen Abstand von 2 s. Zu den elektrischen Größen jedes Ladepunktes schreibt das System zusätzlich die aktuelle Zeit in einem Zeit-Datum-Format und als Unixzeit. Anhand der Unixzeit ist einfacher die Daten in einem Programm auszuwerten. Somit kann das CSV-Dokument direkt mit einem Python Script ausgewertet werden.

Der Datenlogger ist nur für die Praxistests der Anlage gedacht. Nach abschließen der Versuche wird dieser wieder deaktiviert.

### 6.2.7. Kommunikationsschnittstelle

Für die Kommunikation zwischen der SPS und dem Lastmanagementprogramm auf dem RevPi wird im Rahmen dieser Arbeit eine Kommunikationsschnittstelle definiert. Als Kommunikationsprotokoll kommt Modbus TCP zum Einsatz. Vorteil des Protokolls ist die einfache Implementierung und der Einsatz dieses Protokolls für die gesamte interne Kommunikation der Ladeeinrichtung. Das Lastmanagementsystem auf dem RevPi ist der Server, die SPS der Client. Somit kann Übertragungstaktung von der SPS definiert werden.

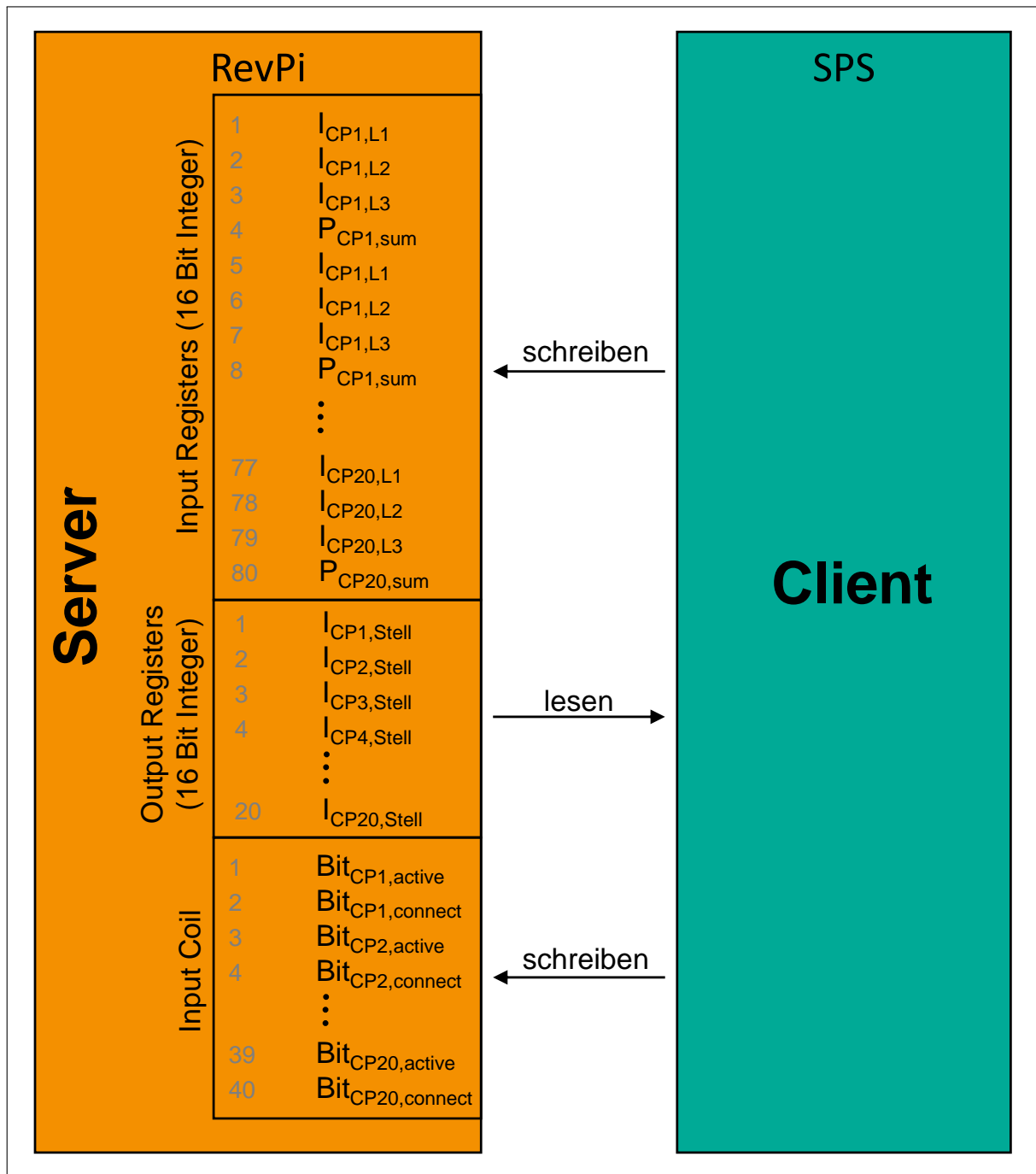


Abbildung 6.7.: Aufbau der Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Lastmanagementsystem auf dem RevPi und der SPS der Ladeeinrichtung mit dem Kommunikationsprotokoll Modbus TCP.

Für die Kommunikationsschnittstelle werden 'Input Register', 'Output Register' und 'Input Coils' verwendet. Die Echtzeitwerte  $P_{sum}$ ,  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  und  $I_{L3}$  schreibt der Client bei zwanzig Parkplätzen in die 'Input Register' 0 - 79. Vom Optimierer kalkulierte Stellströme fragt der Client von den 'Output Register' 0 - 19 ab. Zudem übermittelt der Client mithilfe der 'Input Coils' den Status aller Fahrzeuge. Der Fahrzeugstatus ist für jeden Parkplatz in zwei 'Input Coils' kodiert. Das sind  $Bit_{active}$  und  $Bit_{connect}$ .  $Bit_{connect}$  gibt an, ob an dem

Parkplatz ein Fahrzeug angeschlossen ist.  $Bit_{active}$  zeigt, ob das Fahrzeug am jeweiligen Parkplatz an eine Ladeeinheit angebunden ist und somit laden kann.

Das Schreiben und Lesen der Register erfolgt in festen Abständen von zwei Sekunden. Diese Zykluszeit ist ausreichend schnell, um das Eintreffen eines Fahrzeugs noch vor Beginn des Ladevorgangs auf Seite des Lastmanagementsystems, zu erkennen. Zudem ist eine Zykluszeit von zwei Sekunden ausreichend um die Echtzeitwerte der MID-Zähler mit hoher Aktualität zu übertragen. Ein kürzerer Zyklus wäre aufgrund der Dauer bis die SPS alle Zähler in Reihe ausgelesen hat, von fünf Sekunden, nicht sinnvoll. Die Entwicklung des Kommunikationskonzepts sowie die Umsetzung des Modbus Servers sind Teil dieser Arbeit, der Modbus Client hingegen nicht.

## **7. Kalibrierung und Erprobung mithilfe eines Software-Dummys**

Die Erprobung des Lastmanagementsystems im realen Betrieb ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Es müssen mindesten acht Elektrofahrzeuge gemietet und eine Ladeeinrichtung mit ausreichender Anschlussleistung bereitgestellt werden. Ein weiteres Problem bei der Erprobung in einem Praxisversuch ist die Abhängigkeit von den verwendeten Fahrzeugtypen. Es ist nur schwer möglich eine Bandbreite unterschiedlicher Elektrofahrzeuge zu erhalten um alle möglichen Fahrzeugcharakteristiken zu prüfen. Zudem sind die möglichen Lastzustände (Phasenbelastung, Symmetrie, Ladeströme) im Praktischen Versuch nur schwer umsetzbar. Aus diesem Grund wird das entwickelte Lastmanagementsystem während der Entwicklung ausschließlich mit einem Software-Dummy erprobt. Dieser Software-Dummy wird im Rahmen dieser Arbeit eigens in der Programmiersprache Python entwickelt.

Im Abschnitt 7.1 stellt die Arbeit die Funktionen und den Aufbau des Software-Dummys vor. Der zweite Teil des Kapitels, Abschnitt 7.2, zeigt am vollständig entwickelten Lastmanagementsystem die Ergebnisse verschiedener Erprobungen.

### **7.1. Aufbau des Software-Dummys**

Grundsätzliche Aufgabe des Software-Dummys ist das realitätsnahe nachbilden der Ladeeinrichtung 'ChargeBase' von ChargeHere. Zudem muss das System auch das Ladeverhalten verschiedener Fahrzeuge mit abbilden. Folglich soll der Dummy simulierte Leiterströme, Leistungen und den Fahrzeugzustand dem Lastmanagement zu Verfügung stellen. Außerdem muss der Dummy Stellströme vom Lastmanagementsystem einlesen und je nach nachgebildetem Fahrzeugtyp verarbeiten können. Der Dummy besteht aus einer Funktion zur Fahrzeugsimulation (7.1.1), einer Kommunikationsschnittstelle(7.1.2), einer Verarbeitungsfunktion für unterschiedliche Prüfpläne (7.1.3) und einer Funktion zum Loggen und Visualisieren der Simulationsergebnisse (7.1.4).

#### **7.1.1. Fahrzeugsimulation**

Die Simulation der Fahrzeuge kann je nach bedarf angepasst werden. Es wird unterschieden in die Fahrzeugsimulation für die Entwicklung des Lastmanagementsystems und die Fahrzeugsimulation für die Erprobung und Validierung des Systems. Während des Entwicklungsvorgangs ist es von Vorteil das Fahrzeugverhalten möglichst variieren zu lassen, um jeden möglichen Zustand erproben zu können. Hingegen ist es bei der



Systemvalidierung notwendig eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Aus diesem Grund werden für die Versuche mit dem Software-Dummy in Abschnitt 7.2 immer gleichbleibende Fahrzeuge simuliert.

Beim dynamischen Fahrzeugmodell erstellt der Dummy eigenständig verschiedene Fahrzeugtypen. Hierfür wählt dieser zufällig die gewünschte Anzahl an Fahrzeugen. Hierbei berücksichtigt der Dummy bei der Auswahl (1-Phasig, 2-Phasig oder 3-Phasig) die Häufigkeitsverteilungen jedes Typs aus Abschnitt 2.2. Welche Phasen beim Laden nicht Symmetrisch angebundener Fahrzeuge verwendet werden, bestimmt das System mithilfe einer Zufallsfunktion. Nach der Auswahl der Phasen erzeugt das System für jeden möglichen Stellstrom einen Leiterstrom und hieraus eine Leistung. Alle Leiterströme behaftet das System mit einer Varianz, um die realen Abweichungen vom Stellstrom nachzubilden.

Beim statischen Fahrzeugmodell verwendet der Dummy festgelegte Phasen für alle angegebenen Fahrzeuge. Auf Grundlage dieser Vorgaben berechnet das System die Ströme für jeden Leiter und die Summenleistung. Somit liegen bei jedem Versuch exakt die selben Daten vor.

### **7.1.2. Kommunikationsschnittstelle**

Das Dummy-System soll die Ladeeinrichtung möglichst vollständig nachbilden. Hierzu gehört auch die entwickelte Modbus-Schnittstelle. Aus diesem Grund beinhalten der Dummy einen eigenen Modbus Client der alle Anforderungen nach Abschnitt 6.2.7 entspricht. Wie auch in der Praxis läuft die vollständige Interaktion zwischen dem Dummy und dem Lastmanagementsystem über diese Modbus-Schnittstelle.

### **7.1.3. Prüfplan**

Um verschiedene Szenarien prüfen zu können, verfügt der Dummy über eine Eingabemöglichkeit für verschiedene Prüfpläne. Diese Enthalten die Zustände von Fahrzeugen, allerdings nicht deren Ladeverhalten. Das Ladeverhalten wird ausschließlich über die Fahrzeugsimulation erreicht. Der Prüfplan wird dem Dummy als zweidimensionale Liste vorgegeben. In dieser Liste sind für jeden Zeitschritt und jedes Fahrzeug Zustandsänderungen definiert. Es gibt vier verschiedene Zustandsänderungen, die einer Nummer zugewiesen sind:

- 0:** Voriger Zustand bleibt erhalten.
- 1:** Das Fahrzeug lädt.
- 2:** Der Ladevorgang wird pausiert.
- 3:** Der Ladevorgang ist abgeschlossen.

Um die Änderung von des Ladeverhaltens eines Fahrzeugs während des Ladevorgangs simulieren zu können gibt es zusätzlich die Möglichkeit dies mithilfe einer zweiten zweidimensionalen Liste umzusetzen. In dieser zweiten Liste befindet sich ebenfalls pro Zeiteinheit und Fahrzeug ein Wert, der allerdings zwischen null und eins liegen sollte. Der Dummy verrechnet dann für die jeweilige Zeiteinheit die rechnerisch vorliegenden Ströme

und Leistung mit diesem Wert. Anschließend gibt der Dummy diesen angepassten Wert als simulierten Messwert über Modbus an das Lastmanagementsystem weiter.

#### 7.1.4. Datenlogger und Visualisierung

Um die Ergebnisse einer Simulation mit dem Software-Dummy auswerten zu können werde alle Leistungs- und die phasenbezogenen Stromwerte jedes Fahrzeugs mit einer Auflösung von 500 ms aufgezeichnet. Diese schreibt das System in ein txt-Dokument um die Ergebnisse grafisch aufbereiten zu können. Zudem gibt das Programm direkt ein Grafik aus. In dieser Grafik sind über den gesamten Prüfzeitraum die Summe der Ströme jeder Phase, die Phasensymmetrie und die Gesamtleistung geregelt und ohne Regelung dargestellt.

## 7.2. Versuche mit dem Software-Dummy

Im Gegensatz zu den Erprobungen während des Entwicklungsvorgangs, mit möglichst vielen unterschiedlichen Lastzuständen, wird in diesem Abschnitt ein immer gleicher Ablauf verwendet. Somit ist es besser möglich die Ergebnisse zu bewerten. Dafür muss der Prüfzyklus alle möglichen Grenzwertproben ermöglichen. Erprobt werden sollen der Prüfzyklus unter Stressbedingungen sowie das Einhalten einer statischen Grenzleistung, unterschiedlicher Phasenströme, Vorgaben der TAB-Niederspannung, einer dynamischen Grenzleistung und das Systemverhalten bei inkonstantem Ladeverhalten.

Tabelle 7.1.: Leiterströme der Fahrzeuge die für die Erprobung des Lastmanagementsystems vom Software-Dummy simuliert werden.

Fahrzeug	$I_{L1}$ [A]	$I_{L2}$ [A]	$I_{L3}$ [A]	$S_{sum}$ [kVA]
PKW 1:	16	0	0	3,68
PKW 2:	16	16	16	11,04
PKW 3:	16	16	0	7,36
PKW 4:	0	16	0	3,68
PKW 5:	16	16	16	11,04
PKW 6:	0	16	16	7,36
PKW 7:	16	16	16	11,04
PKW 8:	16	0	0	3,68
Summe:	96	96	64	58,88

Das Standard-Testszenario beinhaltet acht Fahrzeuge, die in geringem zeitlichen Abstand nacheinander mit der Ladeeinrichtung verbunden werden. Unter den acht Fahrzeugen sind drei Fahrzeuge die 1-Phasig, zwei Fahrzeuge die 2-Phasig und drei Fahrzeuge die 3-Phasig laden. Alle 1-Phasigen und 2-Phasigen Fahrzeuge werden auf unterschiedliche Phasen angebunden. In Summe ergibt sich somit eine maximale Ladeleistung von 59 kVA. Die Summarischen Leiterströme liegen zwischen 96 A und 64 A. Hieraus ergibt sich eine maximale Phasenunsymmetrie von 32 A bzw. 6900 VA. Somit lassen sich alle möglichen Grenzwertverletzungen nachbilden.

### 7.2.1. Prüfzyklus unter Stressbedingungen

Im ersten Prüfvorgang wird ausschließlich die Funktionalität des Prüfzyklus erprobt und validiert. Das Lastmanagementsystem führt den Prüfzyklus immer nach dem Anschließen eines Fahrzeugs aus. Beim gleichzeitigen Anschließen mehrerer Fahrzeuge muss das Lastmanagement in der Lage sein den Prüfzyklus parallel auszuführen. Aus diesem Grund ist dieser Vorgang im Lastmanagement als Multithread ausgeführt. Hierbei besteht bei unfachgerechter Implementierung die Gefahr von gleichzeitigem zugreifen auf globale Variablen durch verschiedene Threads. Dies kann zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Neben der sogenannten 'Thread-Safety' wird in diesem Versuch auch das Einhalten der Prüfdauer und das zügige beginnen des Prüfvorgangs analysiert.

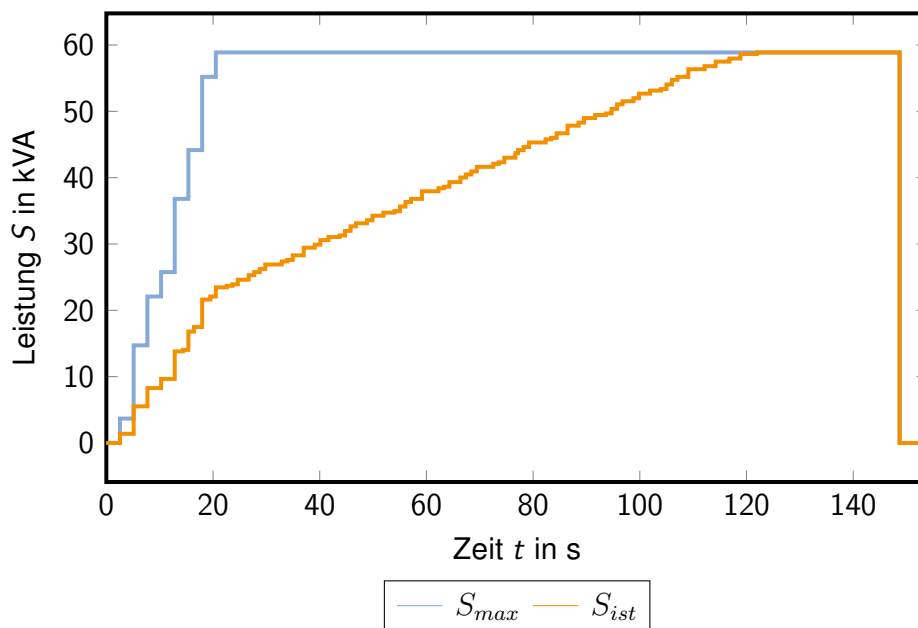


Abbildung 7.1.: Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy nach ohne festgelegten Grenzwert beim Eintreffen von acht Fahrzeugen innerhalb von 20 Sekunden. Dargestellt sind die maximale und geregelte Leistungen.

Abbildung 7.1 zeigt die Summen der möglichen Ladeleistung  $S_{max}$  und der wahren Ladeleistung  $S_{ist}$ . Die mögliche Ladeleistung ergibt sich, falls alle Fahrzeuge für den gesamten Betrachtungszeitraum den maximalen Stellstrom von 16 A vorgegeben bekommen, also kein Lastmanagement vorliegt. Hingegen ist die wahre Ladeleistung die resultierende Leistung unter Einsatz des Lastmanagementsystems. Erst nachdem  $S_{ist}$  den endgültigen Wert von 59 kVA erreicht hat, etwa nach 20 s, sind alle acht Fahrzeuge im Ladezustand. Anfangs liegt die wahre Ladeleistung deutlich unter der möglichen Ladeleistung. Allerdings steigt die wahre Ladeleistung kontinuierlich stufenförmig mit variablen Stufengrößen und erreicht nach etwa 120 s den Wert der möglichen Ladeleistung. Nach Erreichen der wahren Ladeleistung bleibt die wahre Ladeleistung bis zum Ende des Versuches konstant die max Leistung von 59 kVA.

Anhand der Diagramme in Abbildung 7.2 sind die Leistungsverläufe der einzelnen Fahrzeuge dargestellt. Die Ladeleistung der Fahrzeuge ändert sich dem Anschließen des Fahr-

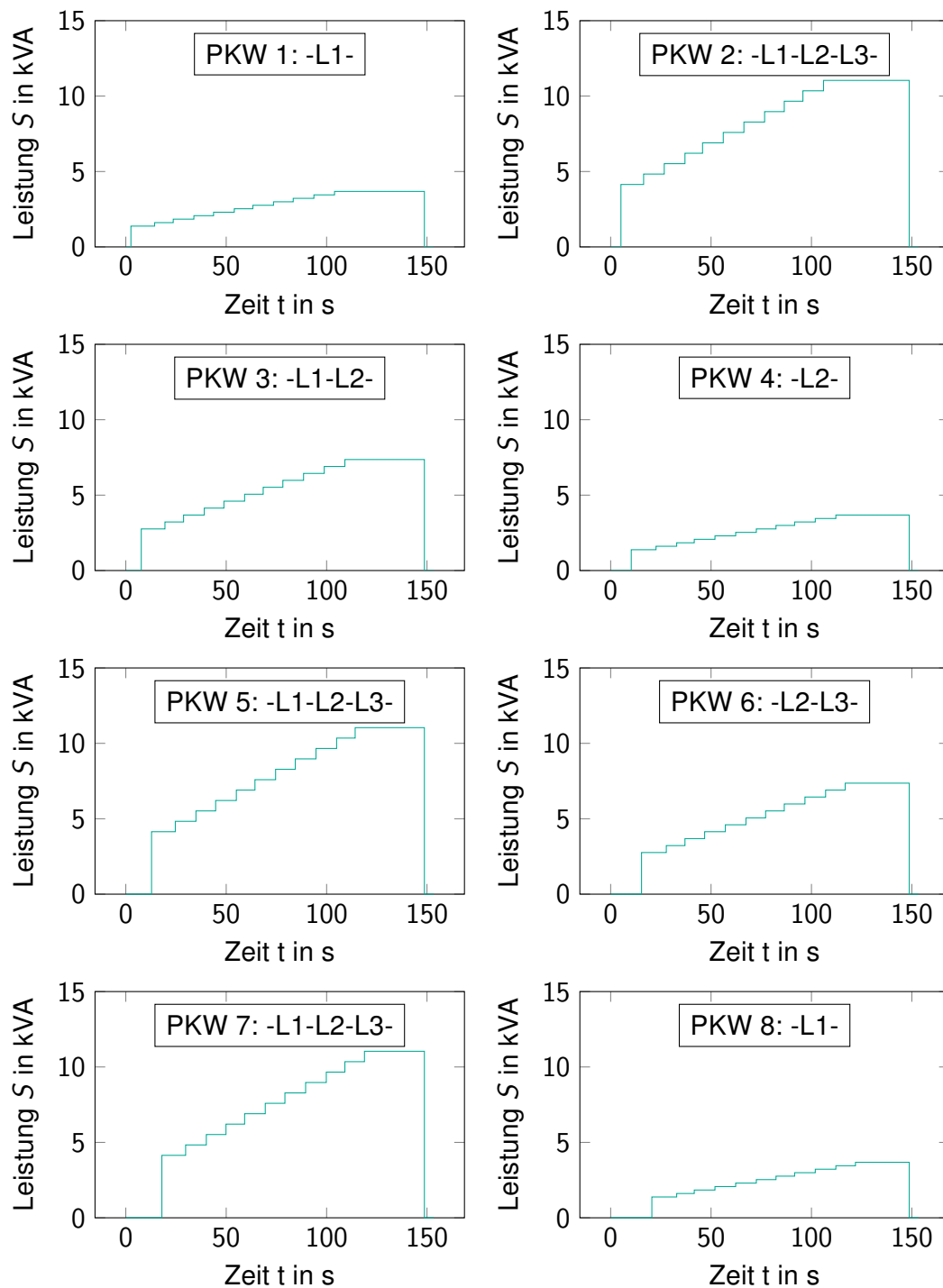


Abbildung 7.2.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy ohne festgelegten Grenzwert beim eintreffen von acht Fahrzeugen innerhalb von 20 Sekunden.

zeugs, je nach Anzahl der verwendeten Leiterphasen von 0 kVA auf 1,38 kVA, 2,76 kVA oder 4,14 kVA. Treppenförmig, in elf Stufen, steigt die Ladeleistung in einem festen

Zeitabstand bis zur maximalen Ladeleistung von 3,68 kVA bei 1-Phasigen, 7,36 kVA bei 2-Phasigen und 11,04 kVA bei 3-Phasigen Fahrzeugen.

Den Abbildungen 7.1 und 7.2 ist zu entnehmen das der Prüfzyklus auch bei einer überspitzten Belastung die alle Anforderungen erfüllt. Das gleichzeitige Prüfen von acht Fahrzeugen hat keinerlei Auswirkungen auf die Systemstabilität. Auch die Zeitschritte kann das System mit einer hohen Genauigkeit steuern.

### 7.2.2. Einhalten einer statischen Grenzleistung

Im zweiten Versuch wird das Einhalten einer statischen Grenzleistung von 46 kVA geprüft. Es werden wieder acht Fahrzeuge in einem Zeitraum von 20 s mit der Ladeeinrichtung verbunden. Hierbei soll es im gesamten Prüfzeitraum zu keiner andauernden Grenzwertüberschreitung kommen. Lediglich kurzzeitige Grenzwertüberschreitungen sind auf Grundlage der in Unterabschnitt 2.4.2 vorgenommenen Analyse hinnehmbar. Neben der Einhaltung von Grenzwerten ist auch eine diskriminierungsfreie Verteilung der verfügbaren Leistung auf alle angeschlossene Fahrzeuge ein Bewertungskriterium. Insbesondere das Abschalten einzelner Fahrzeuge sollte nicht dauerhaft eintreten.

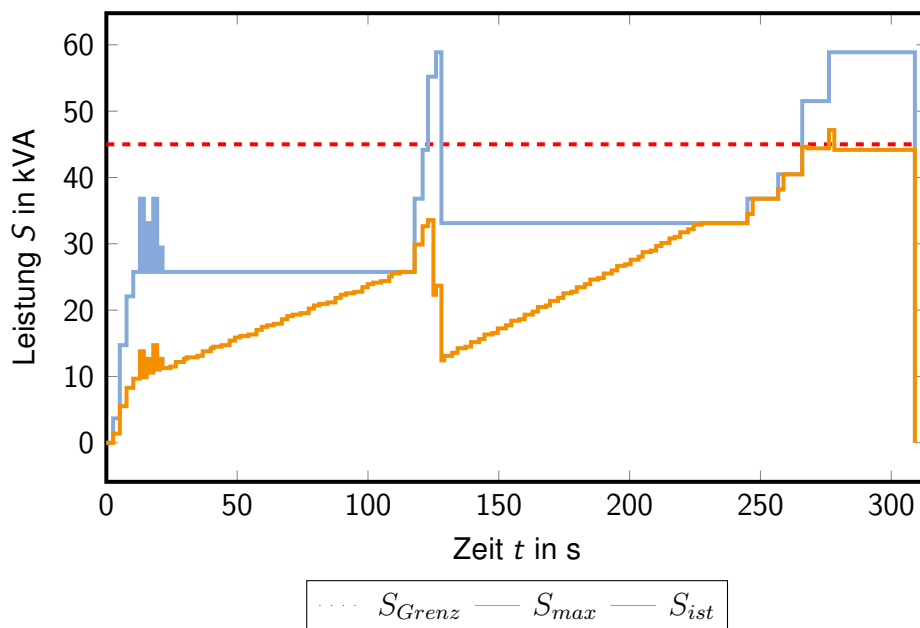


Abbildung 7.3.: Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Leistungsbegrenzung auf 50 % der Anlagen-nennleistung. Dargestellt sind die maximale und geregelte Leistung.

Die Abbildung 7.3 zeigt die Summen der möglichen Ladeleistung  $S_{max}$ , der wahren Ladeleistung  $S_{ist}$  und der statischen Grenzleistung  $S_{Grenz}$ . Im Gegensatz zur Ladeleistung in 7.1 steigt die mögliche Ladeleistung hier anfangs nur auf etwa 26 kVA, kurzzeitig auf etwa 37 kVA und bleibt somit deutlich unter der Grenzleistung von 46 kVA. Innerhalb der ersten 120 s steigt die wahre Ladeleistung stufenweise bis auf 26 kVA. Anschließend steigen die wahre und die mögliche Ladeleistung kurzzeitig und fällt darauf hin wieder ab. Hiervon ausgehend steigt die Leistung stufenweise auf etwa 35 kVA und liegt dann mit

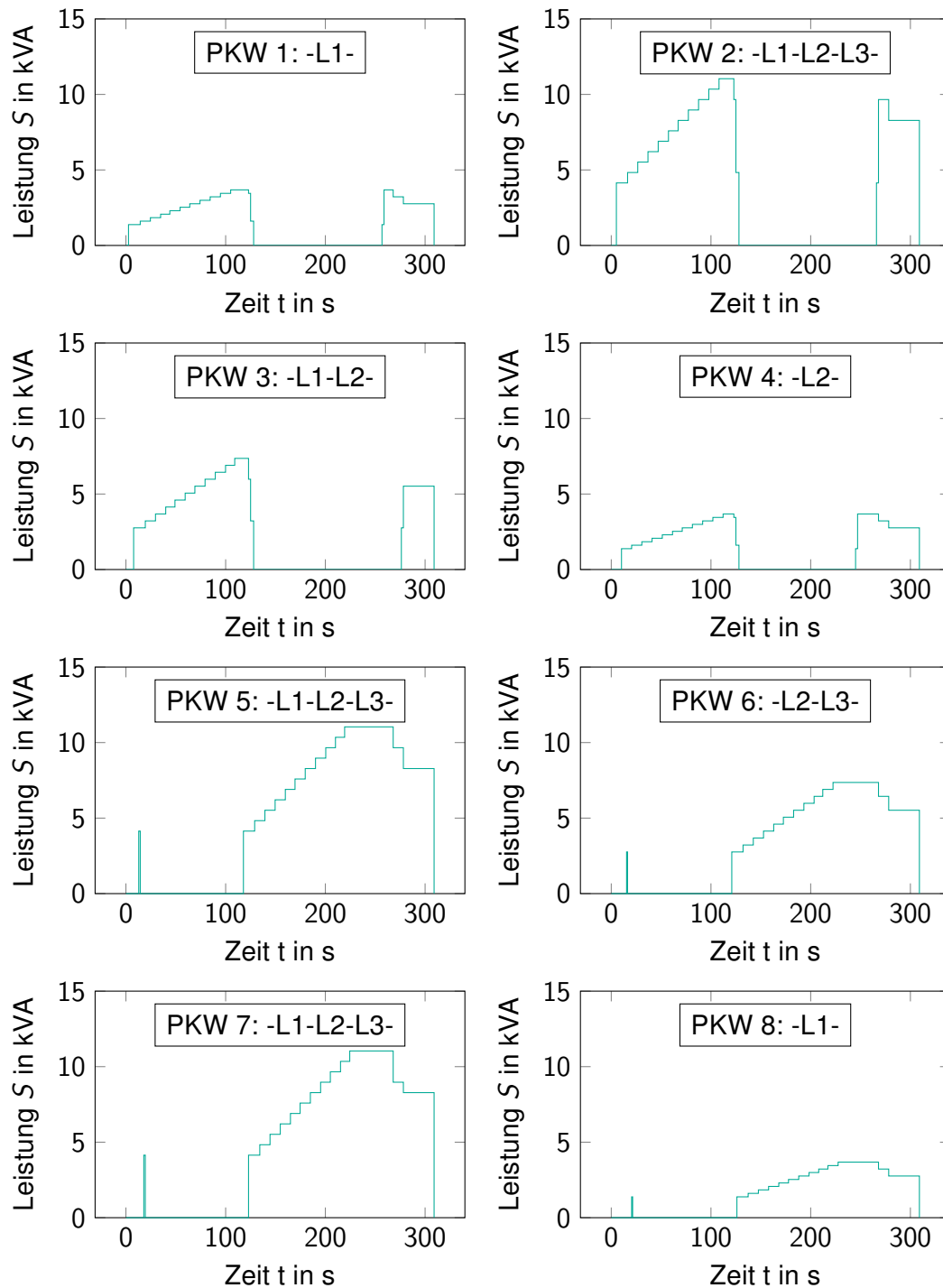


Abbildung 7.4.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer festgelegten Leistungsgrenze auf 50 % der Anlagennennleistung.

der möglichen Ladeleistung gleichauf, jedoch weiterhin deutlich unter der Grenzleistung. Ab Sekunde 240 steigt die wahre Leistung  $S_{ist}$  bis auf einen Wert von knapp unterhalb der Grenzleistung und die mögliche Ladeleistung bis auf die maximale Leistung von 59 kVA.

Etwa bei Sekunde 275 überschreitet die Wahre Ladeleistung kurzzeitig die Grenzleistung um etwa 2 kVA.

In den acht Diagrammen in Abbildung 7.4 sind die Ladeleistungen aller Fahrzeuge während des Prüfzeitraums dargestellt. Die Diagramme zeigen, dass die Fahrzeuge PKW 1, PKW 2, PKW 3 und PKW 4 direkt mit dem Prüfvorgang beginnen. Alle anderen Fahrzeuge laden zwar kurzzeitig, gehen aber direkt in eine Ladepause. Erst nach dem Abschließen des Prüfvorgangs bei Fahrzeug PKW 1 bis PKW 4 wechseln die Fahrzeuge PKW 5, PKW 6, PKW 7 und PKW 8 wieder in den Ladevorgang und beginnen den Prüfzyklus. Gleichzeitig wechseln die Fahrzeuge PKW 1 bis PKW 4 in die Ladepause. Erst nachdem alle Fahrzeuge den Prüfzyklus abgeschlossen haben, kehren die Fahrzeuge aus der Ladepause nach und nach in den Ladezustand zurück. Nach ca. 280 s befinden sich alle Fahrzeuge im Ladezustand und laden etwa mit dem selben Stellstrom.

Auf Grundlage der Abbildungen 7.3 und 7.4 wird das Einhalten der Ladeleistungen nachgewiesen. Die kurzzeitige Grenzwertüberschreitung ist durch das Zuschalten eines Fahrzeugs aus der Ladepause verursacht. Beim Zuschalten eines Fahrzeugs in der Ladepause beginnt die Leistungsoptimierung erst, sobald das Fahrzeug mit dem Laden beginnt. Bis die Optimierung durchgeführt ist, laden die bereits optimierten Fahrzeuge unverändert weiter, und das hinzukommende Fahrzeug lädt mit einem Stellstrom von 6 A. Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass sich die Dauer für den Prüfzyklus insgesamt verdoppelt. Ursache hierfür ist die vorgehaltene Leistung pro Fahrzeug während des Prüfzyklus. Für jedes Fahrzeug hält das Lastmanagementsystem für die Dauer des Prüfzyklus eine Leistung von 11 kVA vor. Bei 46 kVA verfügbarer Leistung können somit nur vier Fahrzeuge gleichzeitig geprüft werden. Erst nach Abschluss aller Prüfvorgänge holt das Lastmanagementsystem in festgelegten Abständen ein Fahrzeug nach dem anderen in den Ladezustand zurück. Im Stationären Zustand, ab Sekunde 275, erhalten alle Fahrzeuge gleichberechtigt die Möglichkeit zu laden.

### 7.2.3. Einhalten statischer Grenzströme

Bei diesem Versuch wird erprobt, ob das Lastmanagementsystem in der Lage ist, einen festgelegten Stellstrom einzuhalten. Prinzipiell kann dem Lastmanagement für alle Leiter der selbe, oder für jeden Leiter ein eigener Stellstrom vorgegeben werden. Für diesen Versuch wird dem Leiter  $L1$  eine Stellstromgrenze  $I_{L1,Grenz}$  von 64 A vorgegeben. Alle anderen Leiterströme bleiben unbegrenzt. Mithilfe des Versuchs soll das Einhalten des Leiterstroms, die diskriminierungsfreie Reduktion des Leiterstroms über alle Fahrzeuge und die Ausnutzung der Ladeleistung bei Fahrzeugen die nicht auf dem begrenzten Leiter liegen.

Abbildung 7.5 zeigt den Verlauf der Leiterströme über der Versuchszeit. Dargestellt sind die wahre Ladeleistung der drei Leiterphasen  $I_{L1,ist}$ ,  $I_{L2,ist}$  und  $I_{L3,ist}$ , die mögliche Ladeleistung des begrenzten Leiters  $I_{L1,max}$  sowie die Grenzleistung  $I_{L1,Grenz}$  des begrenzten Leiters. Den Prüfvorgang der Fahrzeuge führt das Lastmanagementsystem bei diesem Versuch, wie beim *Einhalten einer statischen Grenzleistung* (7.2.2) in zwei Schritten durch. Während des Prüfvorgangs liegen die Leiterströme  $I_{L1,ist}$  und  $I_{L2,ist}$  übereinander, Leiterstrom  $I_{L3,ist}$  liegt deutlich darunter. Die Grenzleistung wird erst nach Abschluss des Prüfvorgangs von Leiter  $L1$  erreicht aber eingehalten. Leiter  $L1$  hält diesen Grenzwert bis

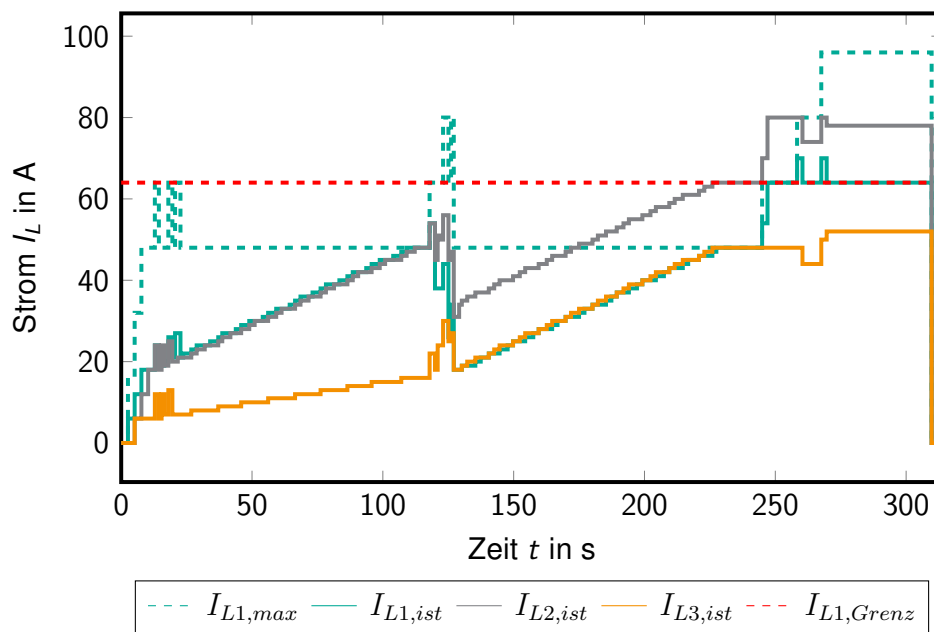


Abbildung 7.5.: Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Begrenzung des Leiterstroms  $I_{L1,grenz}$  auf 64 A. Dargestellt sind die optimierten Ladeströme der Leiter L1, L2 und L3 sowie der mögliche Ladestrom des Leiters L1  $I_{L1,max}$  und der Grenzstrom des Leiters L1  $I_{L1,Grenz}$ .

auf zwei kurzzeitige Überschreitungen, um jeweils 6 A, bis zum Abschluss des Versuchs ein. Hingegen überschreiten bzw. unterschreiten die Leiterströme  $I_{L2,ist}$  und  $I_{L3,ist}$  den Grenzstrom deutlich.

In der Grafik 7.6 sind die Leistungsverläufe aller acht Fahrzeuge dargestellt. Auch hier zeigt sich die Ähnlichkeit des Prüfvorgangs zum Versuch *Einhalten einer statischen Grenzleistung* (7.2.2). Zuerst prüft das System die Fahrzeuge PKW 1 bis PKW 4 und im Anschluss die Fahrzeuge PKW 5 bis PKW 8. Allerdings setzt das System bei Fahrzeug PKW 4 den Ladevorgang nach dem Prüfzyklus mit maximaler Ladeleistung fort. Nach Abschluss aller Prüfvorgänge reduziert das Lastmanagementsystem die Ladeleistungen der Fahrzeuge PKW 1, PKW 2, PKW 3 PKW 5, PKW 7 und PKW 8 auf einen etwa auf den selben Stellstrom. Hingegen laden die Fahrzeuge PKW 4 und PKW 6 nach Abschluss des Prüfvorgangs mit maximaler Ladeleistung.

Anhand der Grafiken 7.5 und 7.6 kann das Einhalten des vorgegebenen Stromgrenzwerts nachgewiesen werden. Das kurzzeitige Überschreiten des Grenzwerts ist wie schon beim *Einhalten einer statischen Grenzleistung* (7.2.2) auf das zuschalten von Fahrzeugen aus der Ladepause zurückzuführen und stellt keinen problematischen Zustand dar. Insgesamt weist das Lastmanagementsystem das geforderte Verhalten hinsichtlich der Leistungsausnutzung auf. Ausschließlich die Ladeleistung von den Fahrzeugen, die über die begrenzte Phase liegen, werden begrenzt. So liegt die Ladeleistung von Leiterphase L2 über der Grenzleistung  $I_{L1,Grenz}$ , womit die Ausnutzung der verfügbaren Kapazität belegt ist. Außerdem reduziert das Lastmanagementsystem die Ladeleistung alle Fahrzeuge gleichberechtigt.



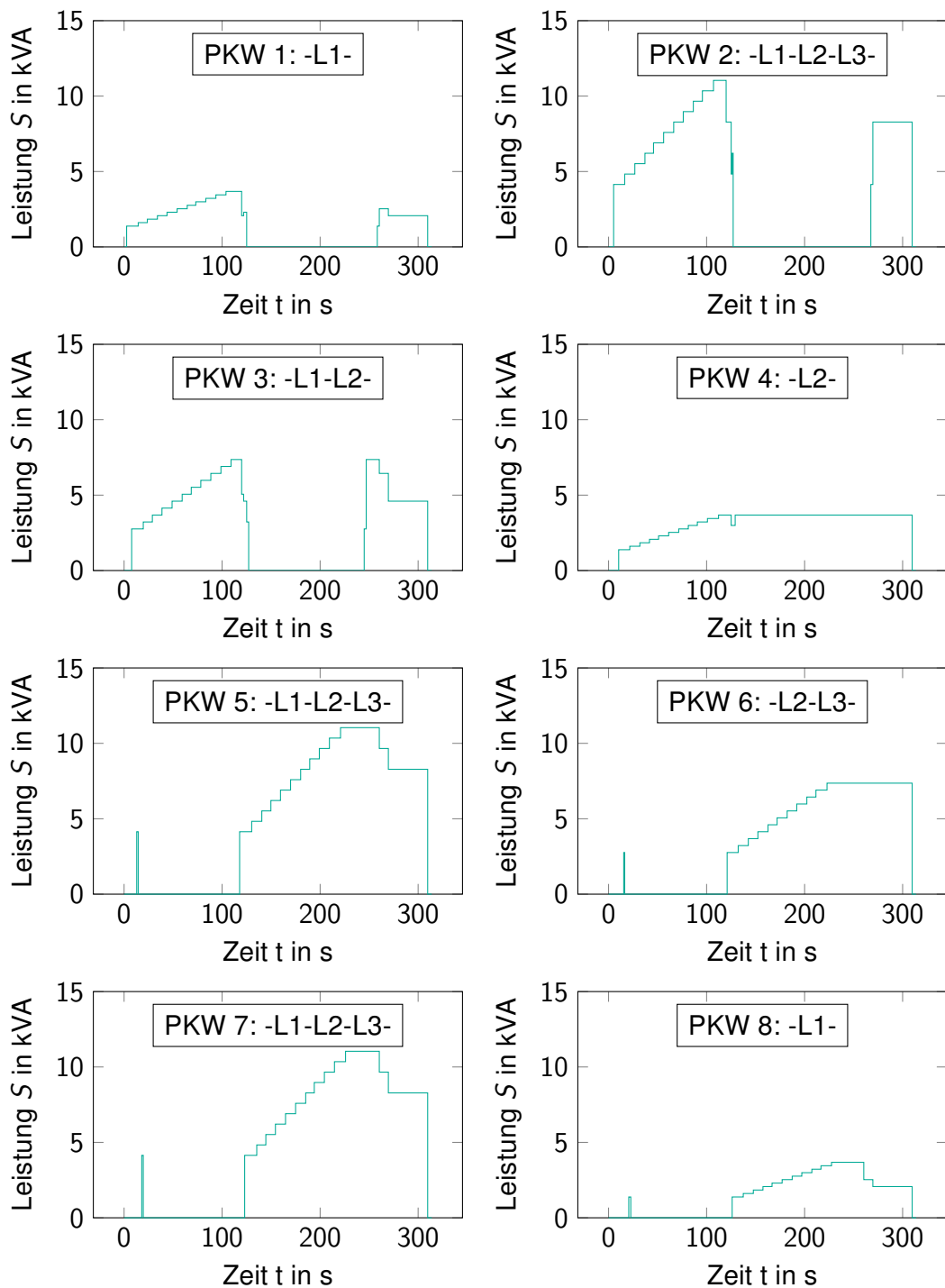


Abbildung 7.6.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angebundenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy für eine Begrenzung des Leiterstroms  $I_{L1,grenz}$  auf 64 A.

### 7.2.4. Einhalten von Vorgaben der VDE-AR-N 4100

Im Rahmen dieses Versuchs wird die Einhaltung der Vorgaben nach TAB-Niederspannung erprobt. Das Lastmanagementsystem soll die Phasenunsymmetrie auf unter 4,6 kVA und die einphasig angebundene Leistung pro Phase auf unter 13,8 kVA begrenzen. Einzuhalten sind diese Werte bezogen auf den gleitenden 1-Minuten Mittelwert. Somit sind kurzzeitige Überschreitungen der Phasenunsymmetrie unproblematisch. Das Begrenzen der einphasig angebundener Leistung auf unter 13,8 kVA pro Phase wird in diesem Versuch nicht betrachtet. Zwar ist diese Funktion in das Lastmanagementsystem implementiert das Auftreten einer solchen Leistung ist allerdings aufgrund der Charakteristik der Ladeeinrichtung bei einer einzelnen Anlage nahezu unmöglich.

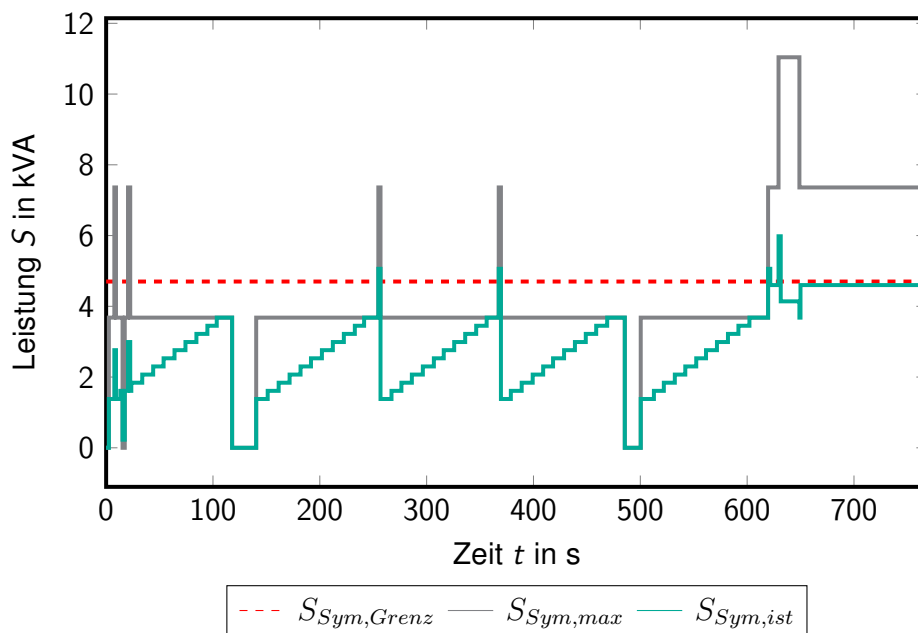


Abbildung 7.7.: Maximale und optimierte Summe der Phasenunsymmetrie der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy unter Einhaltung der Anforderungen der VDE-AR-N 4100.

Das Diagramm 7.7 zeigt den zeitlichen Verlauf der möglichen Phasenunsymmetrie  $S_{Sym,max}$ , der wahren Phasenunsymmetrie  $S_{Sym,ist}$  und der Grenzleistung der Phasenunsymmetrie  $S_{Sym,Grenz}$  von 4,6 kVA. Im Diagramm sind anhand der Phasenunsymmetrie  $S_{Sym,ist}$  fünf Prüfvorgänge zu sehen. Zwischen dem ersten und dem zweiten sowie dem vierten und dem fünften Prüfvorgang befindet sich eine etwa 20 s andauernde Phasenunsymmetrie von 0 kVA. Während das Lastmanagementsystem die Prüfzyklen ausführt liegt die Phasenunsymmetrie deutlich unter dem Grenzwert. Erst nach dem Abschluss aller Prüfvorgänge steigt die Phasenunsymmetrie und erreicht einen Wert knapp unterhalb des Grenzwerts. Über die gesamte Prüfdauer gibt es vier kurzzeitige Überschreitungen der maximal zulässigen Phasenunsymmetrie für jeweils etwa 5 s.

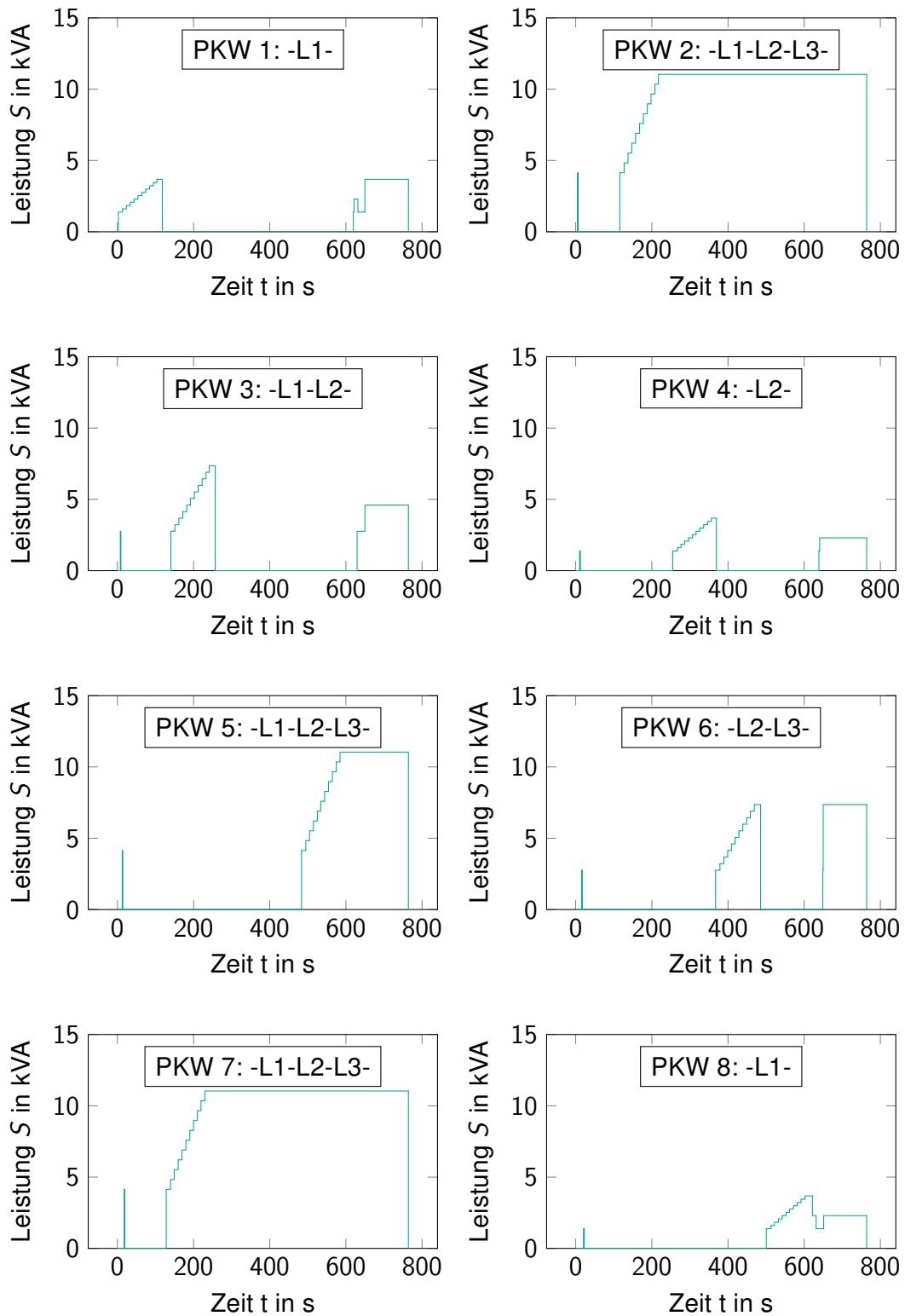


Abbildung 7.8.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angeordneten Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy unter Einhaltung der Symmetrievorgaben nach VDE-AR-N 4100.

Abbildung 7.8 zeigt die Leistungsverläufe aller acht geprüften Fahrzeuge während des Prüfvorgangs. Während bei den bisherigen Versuchen die Prüfvorgänge parallelisiert abgelaufen sind, zeigen die Verläufe acht zeitversetzte Prüfvorgänge. Lediglich kurz nach dem Beginn des Prüfvorgangs der Fahrzeuge PKW 2, PKW,5 und PKW 7 beginnen auch die Prüfvorgänge bei Fahrzeug PKW 3, PKW,8 und PKW 3. Die Fahrzeuge PKW 2, PKW,5 und PKW 7 laden außerdem nach Abschluss des Prüfvorgangs direkt mit voller Leistung weiter, während alle anderen Fahrzeuge nach dem Prüfvorgang in eine Ladepause wechseln. Erst nach Abschluss aller Prüfvorgänge beginnen die 1-Phasig und 2-Phasig ladenden Fahrzeuge wieder zu laden. Alle nicht 3-Phasigen Fahrzeuge die über  $L1$  oder  $L2$  geladen werden regelt das Lastmanagementsystem herunter. Das Fahrzeug PKW 6, welches über  $L2$  und  $L3$  geladen wird, lädt wie alle 3-Phasigen Fahrzeuge mit maximaler Leistung.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass die Vorgaben bezüglich der Phasensymmetrie vom Lastmanagementsystem eingehalten werden. Selbst die kurzzeitigen Überschreitungen der zulässigen Phasenunsymmetrie halten, bezogen auf den gleitenden Minutenmittelwert nach VDE-AR-N 4100, die Vorgaben ein. Durch das Einhalten der Phasenunsymmetrie kann verlängert sich die Dauer zum Prüfen aller Fahrzeuge deutlich. Zwar ist dies bereits durch das gleichzeitige Prüfen bei 3-Phasigen Fahrzeugen verbessert, jedoch bringt dies nur in manchen Fällen einen Vorteil. Ein weiteres Problem durch das Einhalten der Phasenunsymmetrie ist die steigende Anzahl von Ladevorgängen. Immer wenn ein Fahrzeug neu angeschlossen wird benötigt das Lastmanagementsystem die verfügbare Phasenunsymmetrie. Wird zu diesem Zeitpunkt unsymmetrisch geladen, beendet das Lastmanagementsystem den Ladevorgang der verursachenden Fahrzeuge zeitweise.

### 7.2.5. Einhalten einer dynamischen Grenzleistung

Das *Einhalten einer dynamischen Grenzleistung* soll das Systemverhalten bezüglich des dynamischen Lastmanagements aufzeigen. Grundsätzlich lassen sich beim dynamischen Lastmanagement sowohl einzelne Leiterströme als auch summarische Leistung begrenzen. Bei diesem Versuch wird nur die summarische Leistung begrenzt. Hierfür wird die eine Leistung mit 100 % der Anlagen-Nennleistung für 30 s um 50 % reduziert. Anschließend liegt wieder die Anlagenennleistung vor. Dabei wird ein schnelles Folgen des vorgegebenen Leistungswerts, sowie ein verlässliches Einhalten der Grenzleistung angestrebt.

In Abbildung 7.9 sind die resultierenden Leistungsverläufe dargestellt. Enthalten ist die dynamische Grenzleistung  $S_{Grenz}$ , die mögliche Ladeleistung  $S_{max}$  und die optimierte Ladeleistung  $S_{ist}$ . Die Grenzleistung liegt anfangs bei 88 kVA, sinkt dann nach 148 s auf 44 kVA und steigt bei Sekunde 178 wieder auf 88 kVA. Anhand der möglichen Ladeleistung ist der Zeitpunkt des Anschließens der Fahrzeuge sichtbar. Sobald alle Fahrzeuge angebunden sind liegt die Leistung  $S_{max}$  bei 59 kVA. Der Verlauf der optimierten Ladeleistung  $S_{ist}$  zeigt innerhalb der ersten 120 s den Prüfzyklus der Fahrzeuge. Von Sekunde 120 bis 148 Laden die Fahrzeuge mit maximaler Leistung. Kurz nach dem Reduzieren der Grenzleistung, mit 1-2 s Verzögerung reduziert das Lastmanagement auch die Ladeleistung und hält diese ein. Ebenso wird nach dem Zurückführen der Grenzleistung auf den

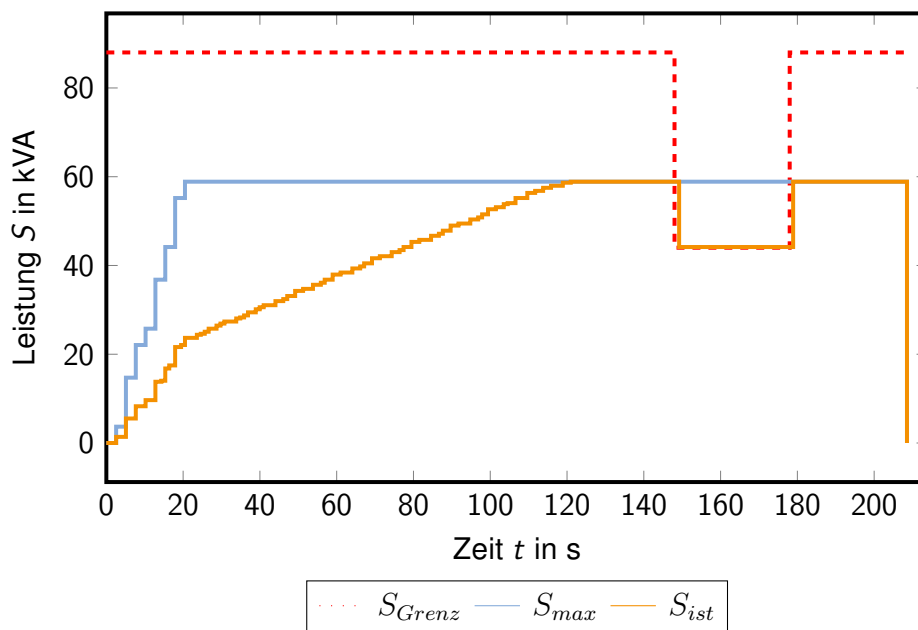


Abbildung 7.9.: Summe der möglichen  $S_{max}$ , optimierten  $S_{ist}$  und Grenzleistung  $S_{Grenz}$  für die Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy und einer dynamischen Lastgrenze die sich 100 % bzw. 50 % der Nennleistung.

Anfangswert mit etwa 1 s Verzögerung die optimierte Ladeleistung erhöht. Im Anschluss liegt die optimierte Ladeleistung wieder mit der möglichen Ladeleistung gleichauf.

Anhand Abbildung 7.10 sind die Verläufe der Ladeleistungen aller acht Fahrzeuge zu erkennen. Alle acht Fahrzeuge beginnen den Ladenvorgang mit dem Prüfzyklus beinahe gleichzeitig und schließen diesen nach etwa 120 s ab. Anschließend laden alle acht Fahrzeuge mit maximaler Ladeleistung, bis die Grenzleistung reduziert wird. Darauf folgend wird die Ladeleistung aller Fahrzeuge strombezogen um den gleichen Anteil reduziert. Nach etwa 30 s steigt die Ladeleistung aller Fahrzeuge wieder auf die ursprüngliche Maximalleistung.

Der Versuch zeigt ein sehr gutes Systemverhalten des Lastmanagements beim Einhalten einer dynamischen Lastgrenze. Das Lastmanagementsystem folgt dem Grenzwert mit nur geringer zeitlicher Differenz. Zudem erfolgt die Leistungsanpassung nicht in Stufen, sondern der angestrebte Wert wird ohne Zwischenschritte erreicht. Auch ist nach dem Erreichen des angestrebten Wertes kein Nachregeln mehr notwendig. Bis auf die geringe zeitliche Verzögerung zwischen dem dynamischen Grenzwert und der optimierten Ladeleistung liegt keine Grenzwertverletzung vor. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Vorgabe des dynamischen Grenzwerts nicht durch ein externes System, sondern intern erfolgt. Daher ist im realen Betrieb durch die Kommunikation zwischen dem übergeordneten Lastmanagement und der Ladeeinrichtung mit größeren zeitlichen Abweichungen zu rechnen.

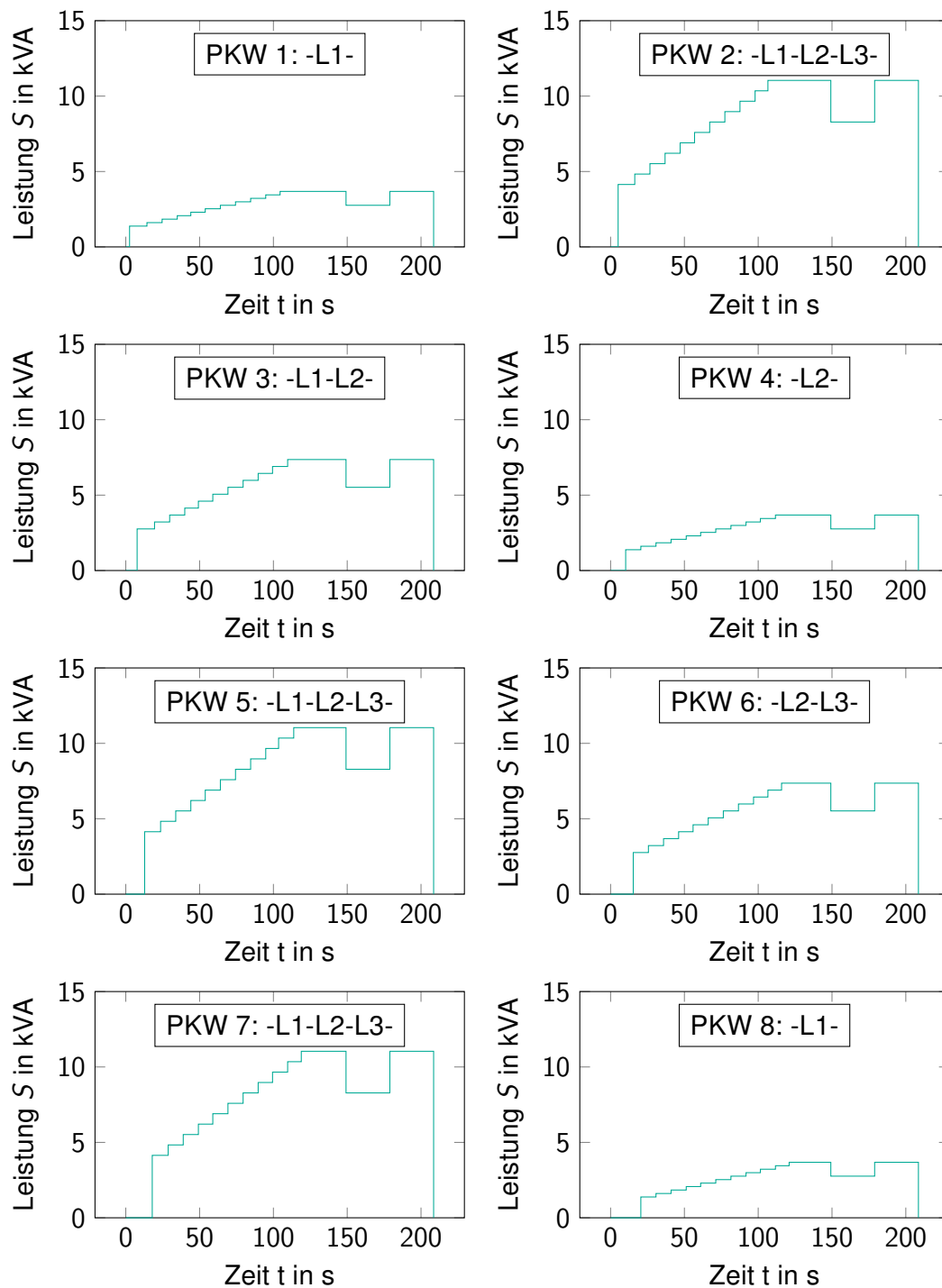


Abbildung 7.10.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen von acht angeschlossenen Fahrzeugen während der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy und einer dynamischen Lastgrenze die sich 100 % bzw. 50 % der Nennleistung.

### 7.2.6. Einhalten einer Leistungsgrenze bei inkonstantem Ladeverhalten

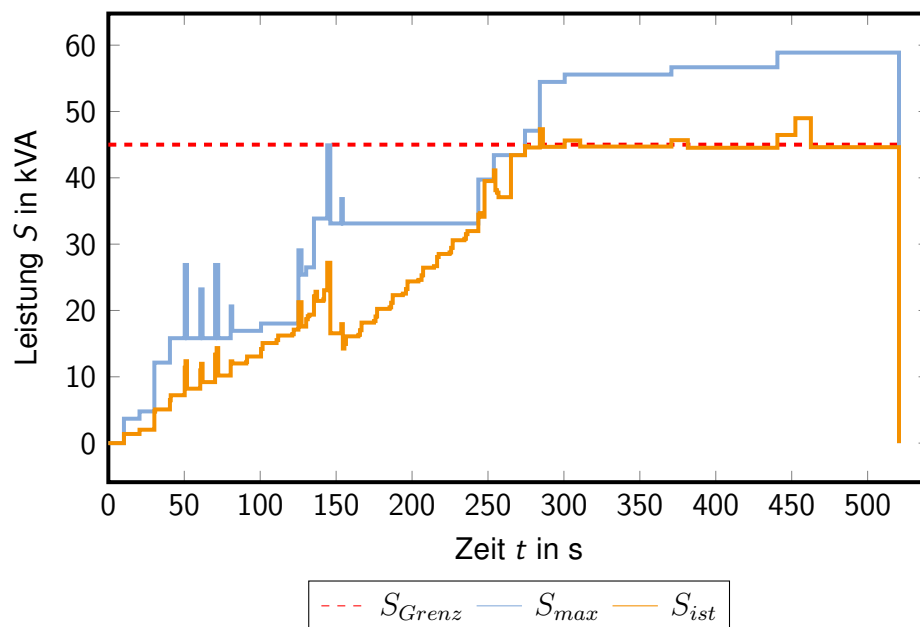


Abbildung 7.11.: Mögliche, optimierte und Grenzleistung bei der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer statischen Lastgrenze von 45 kW und einem Fahrzeug mit einem nicht-statischen Ladeverhalten.

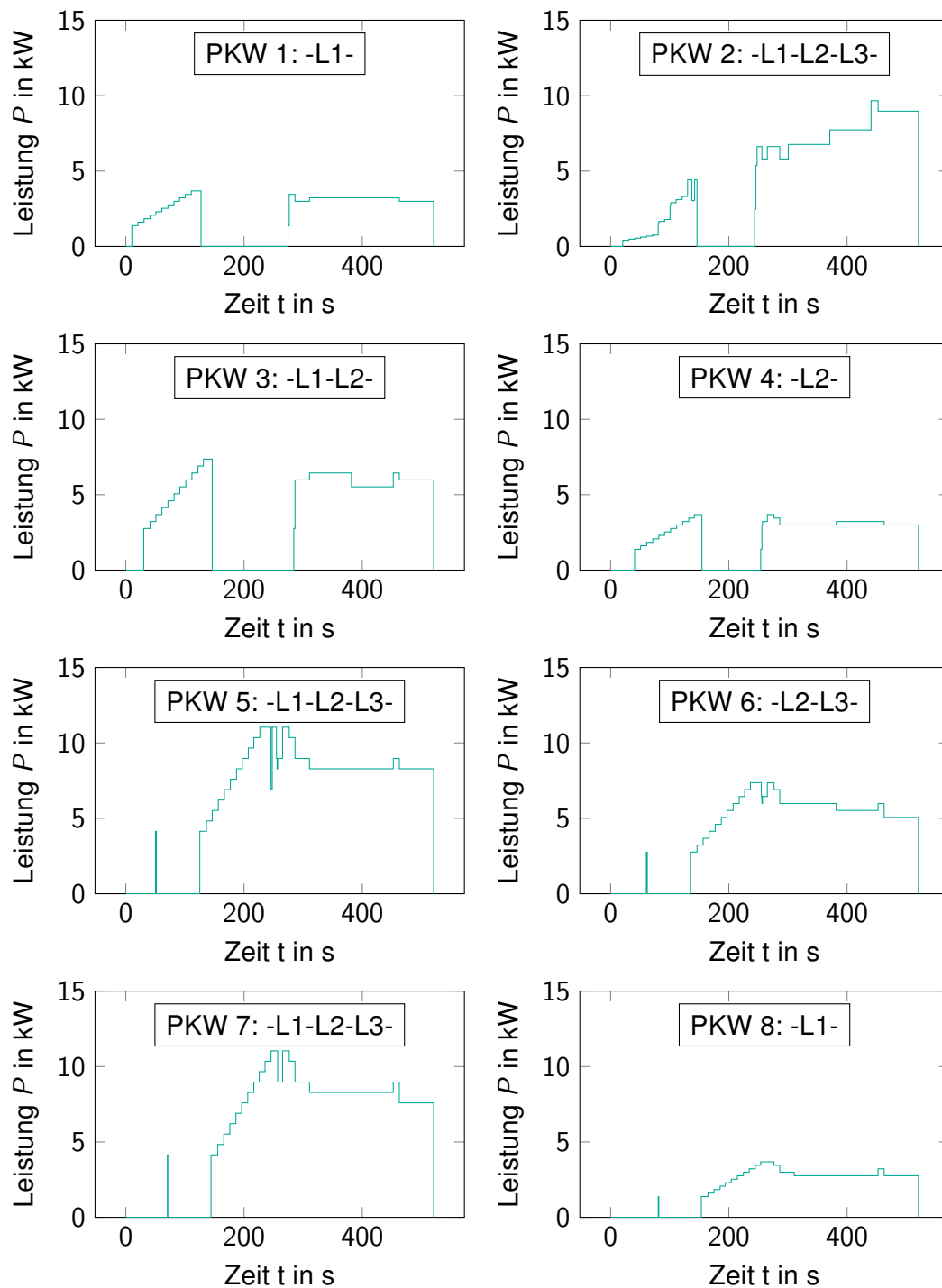


Abbildung 7.12.: Fahrzeugspezifische Leistungsverläufe und verwendete Leiterphasen der Fahrzeuge 1 bis 8 der Erprobung des Lastmanagementsystems mit einem Software-Dummy bei einer statischen Lastgrenze von 45 kW. Fahrzeug PKW 2 weist hierbei ein nicht-statisches Ladeverhalten zwischen 10 % und 100 % der Nennleistung auf.





## **8. Kalibrierung und Erprobung im Realbetrieb**

### **8.1. Gestellter Realbetrieb**

### **8.2. Statisches Lastmanagement im Niederspannungsnetz**

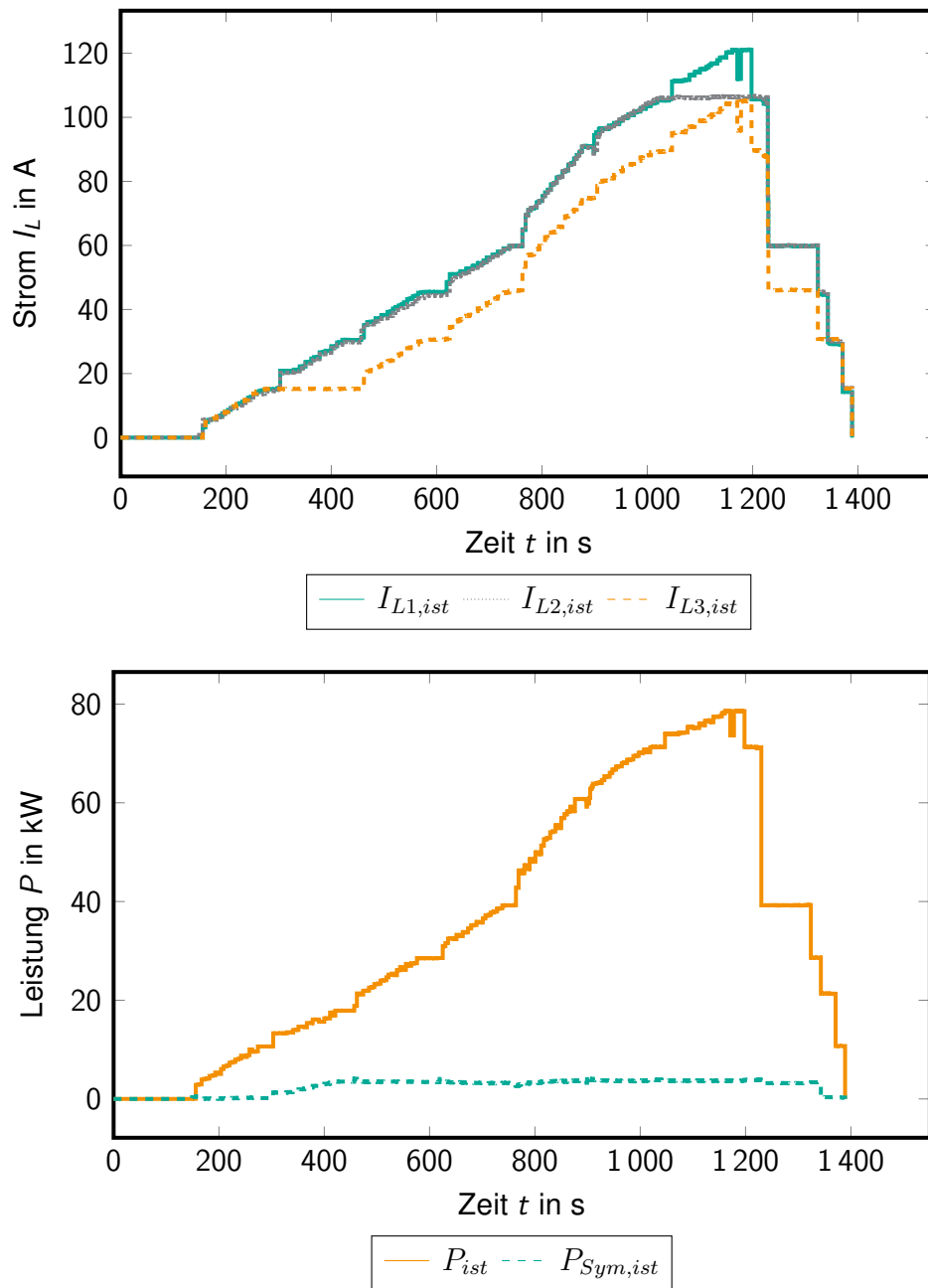


Abbildung 8.1.: Ergebnisse der Erprobung des Lastmanagementsystems an einer realen Anlage ohne vorgegebene Grenzwerte mit acht nacheinander eintreffenden Fahrzeugen. oben: Ströme der Leiter L1, L2 und L3. unten: Summe der Leistung und Phasenunsymmetrie.

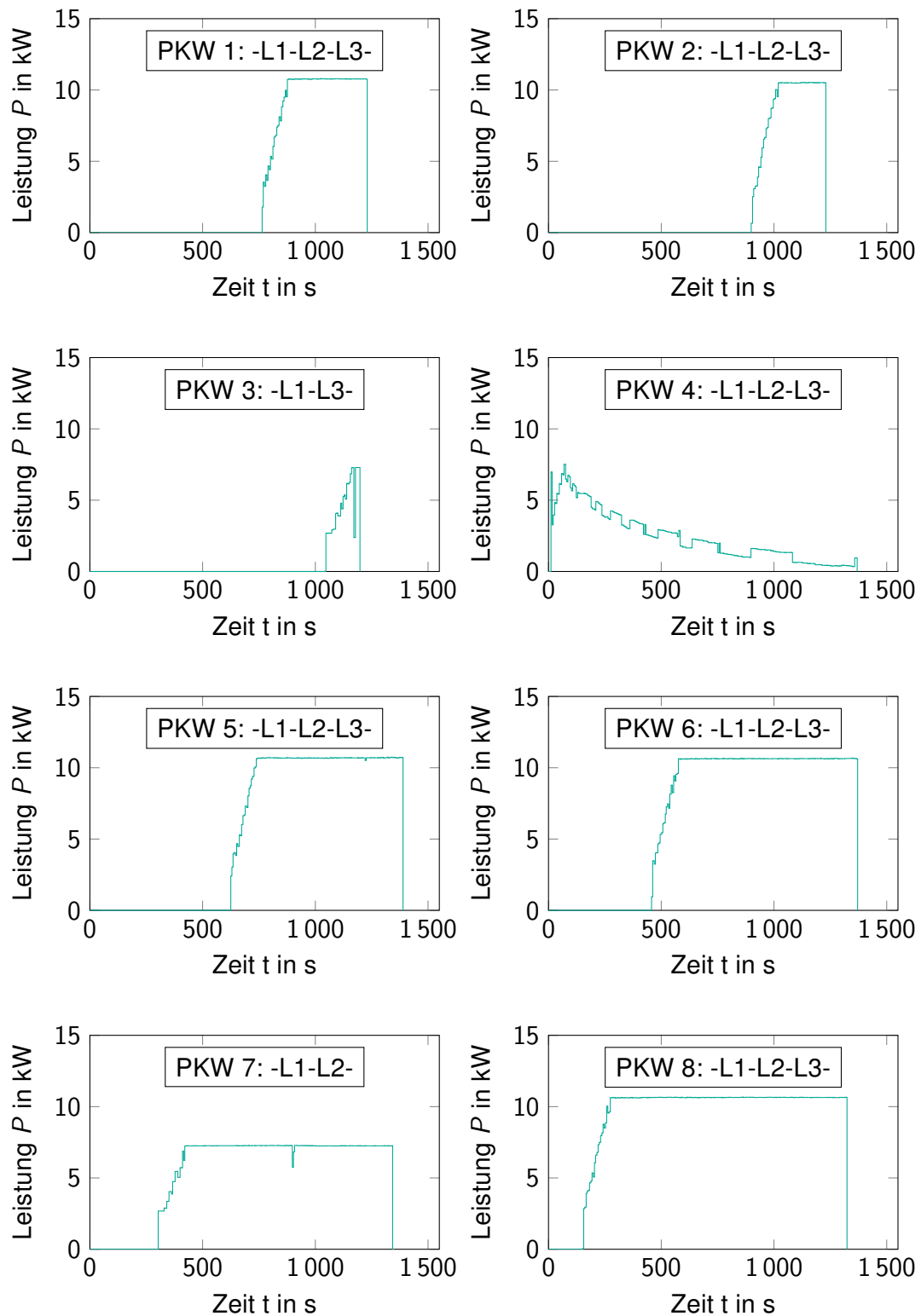


Abbildung 8.2.: Leistungsverläufe aller acht geprüften Fahrzeuge einer realen Anlage beim aufeinander folgenden Eintreffen der Fahrzeuge ohne vorgegebenen Grenzwert.



# 9. Zusammenfassung und Ausblick

## 9.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit soll ein Client-System entwickelt werden mithilfe dessen sich Netzzustandsdaten einer bestehenden Messinfrastruktur abfragen lassen. Des Weiteren soll das Steuern von einzelnen Energieanlagen erprobt werden. Alle abzufragenden und zu steuernden Anlagen verfügen über ein Modbus TCP-fähiges Kommunikationsmodul. Messeinrichtungen und Client-System sind über BPL und LTE miteinander verbunden.

Die für die Netze BW GmbH relevanten Übertragungsprotokolle SML, IEC 60870, IEC 61850 und Modbus werden auf deren Kompatibilität zur Übertragung von Netzzustandsdaten im Verteilnetz betrachtet. Für die bedarfsgerechte Entwicklung des Client-Programms in der Programmiersprache Python wird ein Konzept erstellt. Anhand dieses Konzepts wird in fünf Versionierungsschritten mithilfe agiler Entwicklungsgrundsätze ein einsatzfähiges Programm entwickelt. Um die einzelnen Versionierungsschritte bewerten zu können, werden Validierungsverfahren entwickelt.

Das finale Client-System ist in der Lage zu jeder vollen Minute die Registerwerte von 52 Modbus Servern abzufragen, in Messwerte umzuformen, die Scheinleistung und die Leiter-Leiter-Spannung zu berechnen sowie alle Werte einer Minute in einem CSV-Dokument abzulegen. Zudem lassen sich mit dem Client-System erste Schaltmaßnahmen im Labor umsetzen. Neben dem eigentlichen Client-System beinhaltet diese Arbeit auch die Entwicklung zweier Nebenprogramme. Eines dieser Nebenprogramme soll automatisch nach Anschließen eines USB-Laufwerks die aktuellsten CSV-Dokumente übertragen. Mit dem zweiten Nebenprogramm kann für einen festlegbaren Zeitraum die Verfügbarkeit des Client-Systems und der einzelnen Server geprüft werden.

Nach abgeschlossener Entwicklung wird das Programm unter definierten Kriterien erprobt. Zum Einen liegt der Fokus auf der Laufzeit, zum Anderen auf der Verfügbarkeit. Die Laufzeit wird sowohl im Labor als auch im Feld erprobt. Nur durch Laborversuche ist es möglich die Beeinflussung der LTE-Verbindung auf die Laufzeit zu vermeiden. So dauert das Abrufen der Messwerte im Labor etwa 100 ms, im Feld liegt dieser Wert mindestens um 100 ms darüber. Im Feld wird außerdem die Beeinflussung der Laufzeit durch den Timeout untersucht. Hierfür wird über einen größeren Zeitraum die Dauer bis zum Erhalt aller Serverdaten analysiert. Bei der Verfügbarkeit werden sowohl die Verfügbarkeit des Client-Systems als auch die Verfügbarkeit der Server analysiert. Über einen Zeitraum von mehreren Wochen liegt die Serververfügbarkeit bei über 99 %. Anhand dieser Informationen und Auslastung der Hardware wird auf die Modularität und Erweiterbarkeit des Client-Systems geschlossen.

Auf Grundlage der Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass das auf einem Raspberry Pi implementierte Client-System innerhalb von zehn Sekunden 50 bis 100 Server pro

Prozessorkern abfragen kann. Eine Verfügbarkeit von über 99 % sind in diesem Fall auch bei schlecht angebundenen Servern realistisch. Abfragezeiten unter einer Sekunde lassen sich nur mit wenigen, dauerhaft gut angebundenen Messeinrichtungen erzielen.

Das entwickelte Client-System wird mit dem Vorgängersystem verglichen. Betrachtet werden hierbei neben der Verfügbarkeit der Messwerte vor allem die Abfragedauer. Nach 42 Tagen Betrieb des Client-Systems konnten im Durchschnitt 99,4 % aller Messwerte erfolgreich abgerufen werden. Beim REMS liegt dieser Wert bei 96,5 %. Die Abfragedauer ist beim REMS mit teilweise über einer Minute deutlich höher als beim entwickelten Client-System mit maximal zehn Sekunden. Somit kann das entwickelte Client-System Servermesswerte mit höherer Gleichzeitigkeit und zuverlässiger Abfragen. Auf Grundlage der Auswertung werden Optimierungsansätze und alternative Lösungskonzepte für das Client-System und die Anbindung dezentraler Messeinrichtungen erarbeitet.

## **9.2. Ausblick**

Die Entwicklung eines Client-Systems zur Abfrage von Messdaten ist der Hauptbestandteil dieser Forschungsarbeit. Durch die Evaluation des Client-Systems ist es möglich die Schwachstellen zu identifizieren. Nicht alle Schwachstellen konnten im zeitlichen Rahmen der Arbeit behoben werden oder bedurften für den entsprechenden Einsatz keiner Optimierung. Für zukünftige Projekte mit ähnlicher Zielsetzung können die in Kapitel ?? vorgestellten Optimierungsansätze und alternativen Lösungskonzepte herangezogen werden.

Durch diese Arbeit kann ein grundlegender Einblick in die Datenübertragung über LTE gewonnen werden. Auch in den kommenden Jahren wird LTE, UMTS und an einzelnen Abschnitte BPL weitestgehend die einzige Möglichkeit zur Messdatenübermittlung bleiben. Aus diesem Grund sollte diese Thematik noch intensiver untersucht werden. So fehlen vor allem für die Latenzzeit Erfahrungswerte, obwohl diese enormen Einfluss auf die Dauer der Messdatenabfrage hat. Voraussichtlich erst mit der flächendeckenden Einführen der 5G-Technik wird der Einfluss der Latenzzeit wesentlich entschärft.

Bei der Messdatenübermittlung in der elektrischen Energieversorgung wird die ethernet-basierte die mehrleiterbasierte Datenübertragung vermutlich vollkommen ablösen. Doch ob ein verbindungsorientiertes Übertragungsprotokoll wie TCP im Bereich der Messdatenübertragung notwendig ist, bleibt in dieser Arbeit unbeantwortet. Trotz einiger Nachteile könnten verbindungslose Protokolle wie UDP bessere Übertragungseigenschaften bieten. Vor allem die Übertragungsgeschwindigkeit und Verfügbarkeit aber auch die Datensicherheit können hierfür nicht abgeschätzt werden.

Das entwickelte Programm kann zwar problemlos für andere Projekte weiterverwendet werden, die implementierte Messdatenarchivierung ist jedoch nicht ideal. Die Datenarchivierung in CSV-Dokumenten ist zwar schnell und in diesem Projekt gewollt, beansprucht jedoch sehr viel Speicherplatz. Datenbanken sind hierfür besser geeignet. Für den breiten Einsatz sollten einige Datenbanken auf deren Geschwindigkeit und Eignung für Mehrfachzugriffe analysiert werden.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde die Übertragbarkeit des entwickelten Client-Systems auf eine größere Anzahl von Messeinrichtungen untersucht. Grundlage dieser

Untersuchung sind Versuche im Labor und im Feld. Anhand dieser Daten kann die Erweiterbarkeit des Client-Systems auf eine größere Anzahl von Messeinrichtungen zwar abgeschätzt werden, wie belastbar dieses ist bleibt jedoch offen.

Auch die betriebssystemseitigen Einflüsse auf das System sind in diesem Kontext noch nicht ausreichend berücksichtigt. So kann die teilweise deutliche Überschreitung des Timeouts nicht mit absoluter Sicherheit begründet werden.





# Literaturverzeichnis

- [1] REMS Systembeschreibung.
- [2] Systembeschreibungen grid-control - ein Gesamtkonzept für das Verteilnetz der Energiewende.
- [3] Netze BW GmbH (Hrsg.): *grid-control Abschlussvortrag*
- [4] Bundesnetzagentur (Hrsg.): *Zahlen, Daten und Informationen zum EEG*. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html)
- [5] Pascal Wiest ; Daniel Groß ; Krzysztof Rudion: Probabilistische Verteilnetzplanung zur Analyse der Gleichzeitigkeit von Elektromobilität. (2018)
- [6] Landys+Gyr (Hrsg.): *Landis+Gyr S750 Smart Grid Modul*. <https://www.landisgyr.de/product/landisgyr-s750-smart-grid-modul/>. Version: 2019
- [7] Landys+Gyr: 09.02.38.a\_Modbus\_Protocol1.
- [8] Lienemann, Gerhard ; Larisch, Dirk: *TCP/IP - Grundlagen und Praxis*. 2., aktualisierte Aufl. Heise, 2014. – ISBN 978–3–944099–02–6. – Lienemann, Gerhard (VerfasserIn) Larisch, Dirk (VerfasserIn)
- [9] Wikipedia (Hrsg.): *OSI-Modell*. <https://de.wikipedia.org/wiki/OSI-Modell>. Version: 2019
- [10] Wikipedia (Hrsg.): *Smart Message Language*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Smart\\_Message\\_Language](https://de.wikipedia.org/wiki/Smart_Message_Language). Version: 24.01.2019
- [11] BSI (Hrsg.): *BSI TR-03109*. [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03109/TR03109.pdf;jsessionid=663DD9F6E02471BB5A3F5D675D9C29FD.1\\_cid351?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03109/TR03109.pdf;jsessionid=663DD9F6E02471BB5A3F5D675D9C29FD.1_cid351?__blob=publicationFile&v=3)
- [12] Wikipedia (Hrsg.): *IEC 60870*. [https://de.wikipedia.org/wiki/IEC\\_60870](https://de.wikipedia.org/wiki/IEC_60870). Version: 2019
- [13] IEC (Hrsg.): *DIN EN 60870-5-102*
- [14] IEC (Hrsg.): *DIN EN 60870-5-104*
- [15] Stefan Tenbohlen: *Diagnostik und Schutz elektrischer Netzkomponenten*
- [16] Wikipedia (Hrsg.): *IEC 61850*. [https://de.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61850](https://de.wikipedia.org/wiki/IEC_61850). Version: 2019
- [17] IEC (Hrsg.): *DIN EN 61850*

- [18] Dr. Tanja Koch ; Dr Jörg Hermsmeier ; etz - elektrotechnik und automation (Hrsg.): *Die IEC 61850 als Standard für die Digitalisierung des Energiesystems*. <https://www.etz.de/5725-0-Die+IEC+61850+als+Standard+fuer+die+Digitalisierung+des+Energiesystems.html>
- [19] VDE (Hrsg.) ; FNN (Veranst.): *Schalten und Steuern mit dem intelligenten Messsystem*. <https://www.vde.com/de/fnn/themen/imesssystem/lastenhefte/steuerbox>. Version:2018
- [20] github (Hrsg.): *Official repository for libIEC61850, the open-source library for the IEC 61850 protocols*. <https://github.com/mz-automation/libiec61850>
- [21] Fraunhofer ISE (Hrsg.): *OpenIEC61850 Overview*. <https://www.openmuc.org/iec-61850/>
- [22] Wikipedia (Hrsg.): *Modbus*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Modbus>. Version:2019
- [23] org, Modbus: MODBUS Application Protocol 1 1 b. (2012). <http://www.modbus.org>
- [24] Modbus.org: MODBUS Messaging Implementation Guide 1 0 b. <http://www.modbus.org>
- [25] Wikipedia (Hrsg.): *Liste der standardisierten Ports*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_standardisierten\\_Ports](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_standardisierten_Ports). Version:2019
- [26] Modbus.org: MODBUS/TCP Security. (2018)
- [27] Wikipedia (Hrsg.): *Transmission Control Protocol*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_Control\\_Protocol](https://de.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol). Version:2019
- [28] Baumgartner, Manfred ; Klonk, Martin ; Pichler, Helmut ; Seidl, Richard ; Tanczos, Siegfried: *Agile Testing*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Hanser Verlag, 2018. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446452985>. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446452985>. – ISBN 978–3446452923. – Baumgartner, Manfred (VerfasserIn) Klonk, Martin (VerfasserIn) Pichler, Helmut (VerfasserIn) Seidl, Richard (VerfasserIn) Tanczos, Siegfried (VerfasserIn)
- [29] *PyModbus - A Python Modbus Stack*. <https://pymodbus.readthedocs.io/en/latest/readme.html>. Version:2017
- [30] github (Hrsg.): *modbus-tk: Create Modbus app easily with Python*. <https://github.com/ljean/modbus-tk>
- [31] *MinimalModbus*. <https://minimalmodbus.readthedocs.io/en/master/readme.html>
- [32] Ernesti, Johannes ; Kaiser, Peter: *Python 3*. 5., aktualisierte Auflage 2017, 1., korrigierter Nachdruck. Rheinwerk Verlag, 2018 (Rheinwerk Computing). – ISBN 978–3–8362–5864–7. – Ernesti, Johannes (VerfasserIn) Kaiser, Peter (VerfasserIn)
- [33] Python Software Foundation (Hrsg.): *The multiprocessing.dummy module*. <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html#module-multiprocessing.dummy>
- [34] Tanenbaum, Andrew S. ; Bos, Herbert: *Moderne Betriebssysteme*. 4., aktualisierte Auflage. Pearson, 2016 (Always learning). – ISBN 978–3868942705. – Tanenbaum, Andrew S. (VerfasserIn) Bos, Herbert (VerfasserIn)

- [35] LTE-Anbieter.info (Hrsg.): *Analyse: So schnell ist LTE in der Praxis*. <https://www.lte-anbieter.info/presse/12/analyse-speed-lte.html>. Version: 08.08.2012
- [36] Computerwoche (Hrsg.): *Long Term Evolution (LTE)*. <https://www.computerwoche.de/a/lte-bringt-hohe-datenraten-und-kurze-latenzzeiten,2534971>. Version: 22.03.2012
- [37] Wikipedia (Hrsg.): *Port (Protokoll)*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Port\\_\(Protokoll\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Port_(Protokoll)). Version: 2019
- [38] Heinz Arnold ; smarterworld.de (Hrsg.): *PPC, Cisco und E.ON bauen Smart Grid*. <https://www.smarterworld.de/smart-energy/sonstige/artikel/30733/>. Version: 23.11.2010



# **A. Anhang**

## **A.1. Aufgabenbeschreibung der Masterarbeit**



EnBW AG - ChargeHere  
Herrn Bernhard Wittenberg  
Birkenwaldstr. 34  
70191 Stuttgart

12. März 2019

### **Masterthesis: Entwicklung eines intelligenten Lade- und Lastmanagementsystems für den Parkraum**

Im Rahmen des Innovationsprojektes ChargeHere der EnBW AG wird an der Umsetzung einer Ladeinfrastruktur basierend auf einem intelligenten Lademanagementsystem für den Parkraum gearbeitet. Kern der Ladelösung ist der sogenannte „Multiplexer“-Ansatz, welcher eine individuelle Versorgung von Ladepunkten bei erhöhter Gleichzeitigkeit und reduzierter Ladetechnik ermöglicht.

Zur Vermeidung von Systemengpässen soll das bestehende Lademanagement um ein intelligentes Lastmanagement erweitert werden. Folgende Ausprägungen sollen hierbei entwickelt werden:

- Statisches Lastmanagement (Statische Leistungsobergrenze)
- Dynamisches Lastmanagement (Dynamische Leistungsobergrenze durch ein Drittsystem)
- Priorisiertes Lastmanagement (Berücksichtigung von Nutzerprofilen wie z.B. Standprofilen von Fahrzeugen) (optional)

Zur Umsetzung des priorisierten Lastmanagements wurde in der Implementierung ein sogenanntes „Score Modell“ eingeführt. Hierbei kann durch das Verteilen und Entziehen von Punkten eine Priorisierung von Ladevorgängen vorgenommen werden.

Aufgaben:

- Entwicklung eines Regelkonzepts (Definition des Regelkreises samt aller Einflussgrößen & Festlegung der Architektur) zur Entwicklung eines statischen und dynamischen Lastmanagements zur Vermeidung von Engpässen und Phasenunsymmetrien
- Entwicklung eines Regelalgorithmus zur Umsetzung des Lastmanagements beispielsweise in Java (Raspberry Pi)
- Entwicklung einer Simulation zur Verifikation des Algorithmus
- Erprobung & Verifikation des Regelalgorithmus im Labor sowie an einer realen Ladeinfrastruktur
- Entwicklung eines Konzepts zur Umsetzung eines priorisierten Lastmanagements (optional)
- Weiterentwicklung des Regelalgorithmus um Priorisierungsfunktionen und Nutzerprofilen mittels des vorhanden „Score Modells“ (optional)