

Masterthesis

Implementierung eines Lademanagementsystems für Elektrofahrzeuge bei limitierter Leistung des Netzanschlusses

Name: *André Kores*
Anschrift: *Lahnstraße 9, 51105 Köln*
Matrikelnummer: *11094345*
Studiengang: *Erneuerbare Energien der Fakultät 09*

Erstprüfer: *Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt*
Zweitprüfer: *Dr. Andreas Horn*

Anfertigungszeitraum: 26.03.2018 - 20.08.2018
Fertigstellung/Abgabedatum: 17.08.2018

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Abschlussarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum, Unterschrift: _____

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	6
2. Abkürzungsverzeichnis	8
3. Einleitung	11
3.1. Motivation	13
3.2. Zielsetzung der Bearbeitung	13
4. Gegenwärtiger Stand der Technik	15
4.1. Definition von Elektrofahrzeugen	15
4.2. Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen	18
4.3. Systemansätze zum Laden von Elektrofahrzeugen	20
4.4. Ladestationen und Ladeinfrastruktur	21
4.5. Lademanagementsystem	24
5. Standardisierung der Ladelösungen für Elektrofahrzeuge	28
5.1. Ausfallsicherung des Lastmanagementsystems	28
5.2. Hardwareschnittstellen zum Laden von Elektrofahrzeugen	30
5.2.1. Steckerverbindungen nach IEC-62196	31
5.2.2. Modi zum Laden von Elektrofahrzeugen	34
5.3. Kommunikationsschnittstellen	35
5.3.1. Bestimmung der Stromtragfähigkeit	36
5.3.2. Kommunikation nach IEC-61851	37
5.3.3. Kommunikation nach ISO/IEC-15118	40
5.3.4. Open Charge Point Protocol	41
5.3.5. Erfassung der Daten der Elektrofahrzeuge	42
6. Erstellung eines Lastmanagementsystems	43
6.1. Beschreibung des Gebäudes	43
6.1.1. Aufbau des Gebäudes	44
6.2. Funktionsweise des Lastmanagementsystems	46
6.2.1. Bauteile des Lastmanagementsystems	47
6.2.2. Ladevorgang und Leistungsvergabe	54
6.3. Implementation in bestehendes System	59
6.3.1. Besonderheiten des Gebäudes	59
6.3.2. Schiefast des Niederspannungsnetzes	60
6.3.3. Testprogramm Autoerkennung	60
6.3.4. Bestimmung der Stromänderungsrate	64

7. Nachweis der Programmfunktion	67
7.1. Nachweis des Testprogramms der Autoerkennung	67
7.2. Lastkurve des Gebäudes ohne Regelung durch ein Lademanagementsystems	75
7.3. Lastkurve des Gebäudes mit dynamischer Regelung des Lastmanagementsystem	80
7.4. Lastkurve des Gebäudes bei dynamischer Regelung multipler Ladevorgänge	82
7.5. Zwischenfazit des Lastmanagementsystems	87
8. Fazit und Ausblick	88
8.1. Zusammenfassung	88
8.2. Grenzen und Verbesserungen des Systems	91
8.3. Ausblick	92
A. Anhang	102

Abstract

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Lastmanagementsystem in ein Bestands-Wohngebäude zu implementieren, sodass eine Ladung von mehreren Elektrofahrzeugen ermöglicht wird, ohne einen Ausbau des elektrischen Netzanschlusses des Gebäudes durchzuführen. Dafür wurde der Zustand des Netzes an mehreren signifikanten Stellen erfasst und eine Regelung der Ladestationen für die Elektrofahrzeuge durchgeführt. Eine Sicherstellung des Betriebs der kritischen Betriebsmittel ist eingehalten worden, wobei ein normales Nutzerverhalten der Gebäudebewohner gewährleistet ist.

Damit das Verhalten der Elektrofahrzeuge als flexible Lasten untersucht werden kann, ist ein Testprogramm angefertigt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine fast stufenlose Regelung der Ladeströme der Fahrzeuge einstellbar ist. Darüber hinaus kann der Ladevorgang der Elektrofahrzeuge unterbrochen werden, was den Ladevorgang zeitlich entkoppelt. Die Reaktionszeit der eingestellten Ladeströme der Fahrzeuge liegt dabei im einstelligen Sekundenbereich, wodurch auf schnelle Änderungen im Netz reagiert werden kann. Es kann großen Stromsprüngen im Gebäudenetz entgegengewirkt werden, sodass eine gleichmäßige Belastung stattfindet.

Die Ergebnisse der Messungen des Lastmanagementsystems zeigen, dass eine Ladung der Fahrzeuge in Abhängigkeit des Zustandes des Gebäudenetzes möglich ist. Der Reststrom für die Ladung der Elektrofahrzeuge wird mittels der Sicherungsgrenzen, der Verbräuche der Bewohner und der zu ladenden Fahrzeuge ermittelt und anhand des Phasenbezugs der Fahrzeuge verteilt.

This master thesis aims to the implementation of a load management system in an existing building to allow a charging of multiple electric vehicles, without an expansion of the electrical grid connection. Therefor a measurement at significant sites and a control system for load regulation of the corresponding supply equipment were made. The supply of the residents is guaranteed and the operation of the critical equipment ensured.

To analyse the behaviour of electric vehicles at various load scenarios, a test program has been compiled. In conclusion an almost stepless variation of the charging current and an interruption of charge is realised. The change of the charging current is set in a range of a few seconds.

Moreover, the load management system is able to set the charging current of the electric vehicles in dependence of the conditions of the electric grid. The residual current is distributed based on the limits of the fuses, the amount of charging electric vehicles, the load on the phases and the consumption of the residents.

1. Aufgabenstellung

Folgendes Arbeit behandelt die Leistungsverteilung der Ladestationen eines Mehrfamilien Bestands- haus mit 74 Wohneinheiten. Das Gebäude besitzt eine Tiefgarage mit insgesamt 39 Stellplätzen. An drei dieser Stellplätze sind Wallboxen (Ladestationen mit max. 22 kW) angebracht, mit dem ein Laden von Elektrofahrzeuge (EFZ) möglich ist. Einer dieser Stellplätze ist von einem Parksharing- Unternehmen und die anderen zwei gehören zu einem Carsharing-Betrieb. Im Verlauf des Projektes sollen alle Stellplätze mit einer Wallbox ausgestattet werden. Zum jetzigen Planungstand sollen rund 30 Prozent der Ausbauten realisiert werden, wobei ein Ausbau des Hausanschlusses nicht vorgese- hen ist. Deshalb soll ein Lastmanagementsystem (LMS) erarbeitet werden, welches die elektrische Leistung erfasst und durch Abregelung der Leistung der Ladestationen ein Auslösen der Sicherungen verhindert. Durch Einbeziehung der Daten der Stromzähler (Smartmeter) und der Messung des Stro- mes an signifikanten Stellen, werden Daten gewonnenen und durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ausgewertet. Diese setzt die Regelung des Lastmanagements um. Hauptaufgabe des LMS ist die Absicherung und Gewährleistung der zulässigen Betriebsmittel. Dabei muss sichergestellt werden, dass bei dem Projekt der Hausanschluss gegen Überlast abgesichert ist. Dies ist das Haupt- kriterium, welches zu jedem Zeitpunkt zu vermeiden ist. Neben dessen, ist zu gewährleisten, dass die Niederspannungshauptverteilung (NSHV) nicht überlastet wird und ein Auslösen der Sicherung auf- tritt. Weitergehend sollen auch die Sicherungen vor dem Bezugszähler und die Wohnungssicherungen nicht auslösen. Ebenso ist ein Kriterium, dass das Verbraucherverhalten der Gebäudebewohner nicht beeinträchtigt wird. Das bedeutet, dass die Bestandsversorgung Vorrang hat und die Ladung der EFZ sich unterordnen muss. Bei Ausfall des LMS muss garantiert werden, dass die Versorgung der Bewoh- ner gesichert ist und eine Überlast ausgeschlossen werden kann. Weitergehend ist das Ziel des LMS, dass bei einem Ausfall oder einer Diskrepanz, ein Abschalten und Wiederherstellen des Systems ge- geben ist. Nachfolgend sind zusätzliche Möglichkeiten zur Erweiterung des Lastmanagementsystems aufgeführt.

Benutzermanagement:

Für das Buchungs- und Zahlungssystem des Carsharing-Unternehmens ist eine Softwarelösung, zur Bewirtschaftung von Automobilfuhrparks einer Drittfirma implementiert, welche per Schnittstellen- kommunikation die Daten der Fahrzeuge bereitstellt. Bezogen auf das Projekt müssen die Buchungen der Kunden mittels einer Buchungs-App in das LMS eingebunden werden, wodurch ein prioritäres

Laden der EFZ bestimmt werden kann. Es soll gewährleistet werden, dass ein EFZ zu dem gebuchten Zeitpunkt geladen ist. Ebenso werden die Ankunftszeiten der Buchungen einbezogen. Neben der Garantie des Ladezustandes der Carsharing-Fahrzeuge, muss das Laden der EFZ der Bewohner berücksichtigt und sichergestellt werden.

Zeitmanagement:

Das Lastmanagement soll eine Lastverschiebung, durch eine zeitliche Entkopplung des Ladevorganges der Elektrofahrzeuge, ermöglichen. Dadurch soll eine beständigere Belastung des Netzes erreicht werden, da bei niedrigem Strombezug der Gebäudelasten die Elektrofahrzeuge laden können und bei einem hohen Strombezug ein Unterbrechen des Ladevorganges möglich sein soll. Die Ladeunterbrechung soll auf die Angaben des Benutzermanagements abgestimmt sein, damit keine Einschränkung der Fahrzeuginhaber entsteht. Weitergehend soll das Managementsystem den Anteil des erzeugten Stromes durch erneuerbare Energien im Netz mit einbeziehen. Dabei sollen die Elektromobile bei hoher erneuerbarer Stromerzeugung geladen werden. Außerdem ist das Ziel die Elektrofahrzeuge bei einem hohen Anteil regionaler erneuerbarer Stromerzeugung zu laden. Wenn ein Überschuss des erzeugten PV-Stroms auftritt, soll besonders zu „PEAK-Zeiten“ der Erzeugung eine Ladung der EFZ stattfinden.

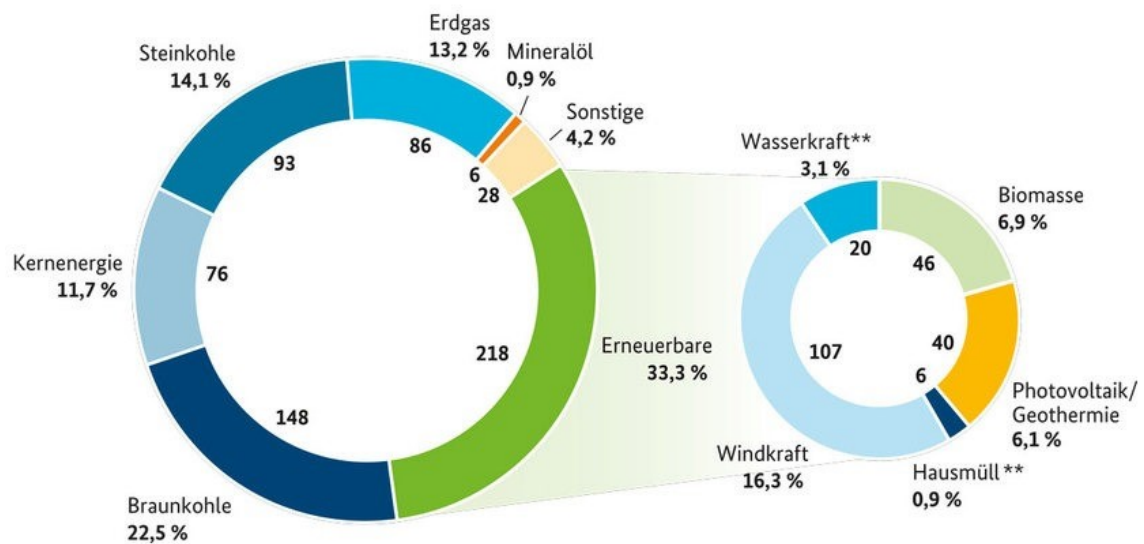
2. Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
API	Programmierschnittstelle
AS	Ablaufsprache
AWL	Anweisungsliste
BEV	Battery Electric Vehicle
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCS	Combined Charge System
CFC	Continous Function Chart
ChaDeMo	Charge de Move
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Contol Pilot
DSM	Demand Side Management
EFZ	Elektrofahrzeug
EmoG	Elektromobilitätsgesetz
EV	Electric Vehicle
EVCC	Electriv Vehicle Charge Control
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
FUP	Funktionsplan
GB	Chinesische Zertifizierungsstelle Guobiao Standard
GSM	Global System for Moblie Communication
IEC	International Electrotechnical Comission
KOP	Kontaktplan
LMS	Lastmanagementsystem
IP	Internetprotokoll
LAN	Local Area Network
LSV	Ladesäulenverordnung
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
OCA	Open Charge Alliance
OCPP	Open Charge Point Protocol
PHEV	Plug-in Hybrid Vehicle
PLC	Programmable Logic Controller
PP	Proximity Pilot

PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
REST	Representational State Transfer
RTU	Remote Terminal Unit
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SLP	Standardlastprofil
SSL	Secure Sockets Layer
ST	Strukturierter Text
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Transport Layer Security
UDP	User Datagram Protocol
URL	Uniform Resource Locator
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network

3. Einleitung

Der Aufschwung der erneuerbaren Energien hat eine Revolution der Energieerzeugen, -verbraucher und -verteilung hervorgerufen. Diese haben die Energiesektoren global und lokal vor neue Möglichkeiten und Herausforderungen gestellt, was zu einer neuen Denkweise der Erzeugung und des Verbrauchs von Energie geführt hat. Ein wichtiger Schritt in Deutschland ist das „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ (EEG), welches im Jahr 2000 festgelegt wurde [1]. In Kombination mit gesetzlichen Förderungen wurde der Ausbau von erneuerbaren Energieerzeugern zentral und dezentral für Investoren attraktiv. Der Anteil der erneuerbaren Energieerzeuger steigt seitdem jährlich an. In Abbildung 3.1 ist der Anteil an erneuerbarer Stromerzeuger aus dem Jahr 2017 dargestellt. Dieser beträgt rund 34 Prozent und hat den größten Anteil der gesamten Stromerzeugen Deutschlands.



Geothermie aufgrund der geringen Menge in Photovoltaik (PV)
 *vorläufig, **regenerativer Anteil

Abbildung 3.1.: Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 in TWh [1]

Damit ist das Ziel der „Erneuerbare-Energien-Richtlinie“ des europäischen Parlamentes von 2009 näher gerückt. Die EU-Mitgliedsstaaten haben sich dazu verpflichtet bis zum Jahre 2020

- den Anteil von erneuerbaren Energie auf 20 Prozent des Gesamtenergieverbrauches zu erhöhen,
- mindestens 20 Prozent der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 zu reduzieren und
- eine Energieeffizienz von 20 Prozent zu erreichen,

was allgemein als „20-20-20-Ziele“ zusammengefasst ist [1]. Diese Ziele sind für die nächsten Jahrzehnte erweitert worden, wodurch 2030 der Anteil der Treibhausgasemissionen um 40 Prozent reduziert, die Energieeffizienz um 40 Prozent verbessert und ein Anteil von 30 Prozent der erneuerbaren Energieerzeuger vorhanden sein. Dieser soll bis 2050 auf 80 Prozent steigen [2]. Ein weiterer Schritt ist der Atomausstieg Deutschlands bis 2022, welcher im Jahre 2011 festgelegt wurde [3]. Grund dafür ist die Reaktorkatastrophe in Fukushima. Dies bietet die Möglichkeit die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien zu kompensieren.

Zusätzlich zu der Verringerung der Treibhausgasemissionen der Energieerzeuger kann ein großer Teil verbraucherseitig reduziert werden. Dies ist vor allem im Mobilitätsbereich möglich, welcher einer der größten Produzenten von Treibhausgasen ist [4]. Eine Möglichkeit der Umsetzung ist der Antrieb der Fahrzeuge mittels Wasserstoffbrennstoffzellen, welcher derzeit jedoch einen geringen Anteil der Antriebe ausmacht [5]. Die Variante mit größerem Potential ist der Antrieb der Fahrzeuge mit Elektromotoren in Kombination mit erneuerbaren Energieerzeugern. Das ist der Grund für die Gründung der „Nationalen Plattform Elektromobilität“ (NPE) von der Bundesregierung im Jahre 2010. Diese hat die Aufgabe die Akzeptanz der Nutzer zu erhöhen und Konzepte zu entwickeln, wodurch die Elektromobilität zu einem selbsttragenden Markt wird. Diese zielen vor allem auf die Systemkomponenten ab, welche aus Fahrzeugen, Ladeinfrastruktur, Umwelt und Energie bestehen [6]. Dadurch soll Deutschland der Leitanbieter und -markt für Elektromobilität im Jahre 2020 sein. Die NPE besteht aus Vertretern der Politik, Industrie, Wissenschaftlern, Zivilgesellschaften und Gewerkschaften, welche sich in Arbeitsgruppen und einem Redaktionsteam aufteilen. Die sechs Arbeitsgruppen teilen sich in die

- Fahrzeugtechnologie,
- Batterietechnologie,
- Ladeinfrastruktur und Netzintegration,
- Normung, Standardisierung und Zertifizierung,
- Informations- und Kommunikationstechnologie und
- die Rahmenbedingungen

auf, welche die Einführung der Elektromobilität ermöglichen sollen. Zentral sollen die Themen der wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte auf ihre Potentiale untersucht und eine Handlungsempfehlung für die wirtschaftliche und politische Richtung gegeben werden.

3.1. Motivation

Für das Erreichen einer klimaneutralen Gesellschaft muss die Treibhausgasemission von Energieerzeugern und -verbrauchern reduziert werden. Dies kann im Verkehrsbereich nur durch eine Umstellung auf einen effizienteren Antrieb geschehen, welcher in Summe eine geringe CO₂-Bilanz hat. Aus diesem Grund ist die Einführung und Förderung der Elektromobilität von großer Wichtigkeit, damit diese Ziele erreicht werden können.

Das starke Wachstum der Elektromobilität wird zukünftig durch den Beschluss der Bundesregierung bekräftigt, da Fahrverbote für mit Dieselmotoren betriebene Automobile in innerstädtischen Bereichen verhängt werden dürfen [7]. Daher steigt die Nachfrage nach elektrisch betriebenen Fahrzeugen für private und gewerbliche Nutzung an.

Die elektrische Antriebstechnologie bewirkt jedoch eine hohe Netzbelastung im öffentlichen und privaten Bereich, welcher entgegengewirkt werden muss. Besonders im privaten Bereich ist ein Netzausbau nicht immer wirtschaftlich tragbar, weshalb eine Regelung des Ladens der Elektrofahrzeuge unabdingbar ist.

Aus diesem Grund wird in folgender Arbeit die Implementierung eines Lademanagementsystems bearbeitet. Dadurch soll das Laden mehrerer Elektrofahrzeuge möglich sein, dessen Dichte vor allem in stark besiedelten Bereichen eine Auslastung des Niederspannungsnetzes hervorrufen könnte.

Wird in dieser Arbeit von Elektrofahrzeugen oder Elektromobilen gesprochen, so ist die Rede von Personenkraftwagen mit rein elektrischem Antrieb.

3.2. Zielsetzung der Bearbeitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Pilotprojekt eines Lademanagementsystems durchgeführt, welches in ein Bestands-Wohngebäude eingebettet werden soll. Das Bauobjekt besteht aus mehreren Einheiten, welche eine Mischung aus Wohngemeinschaften, Einzelwohnungen und gewerblich genutzten Flächen sind. Die Bewohner teilen sich in verschiedene Altersstufen und Berufungen auf, was zu unterschiedlichen Verbraucherverhalten führt. Weitergehend ist eine Photovoltaikanlage zur zusätz-

lichen Eigenstromproduktion installiert. Daher sind variierende Lastprofile zu erwarten, welche das elektrische Gebäudenetz unterschiedlich stark belasten.

In dem behandelten Bestandsobjekt befindet sich eine Tiefgarage mit mehreren Stellplätzen. Diese sollen im Laufe des Projektes mit Ladestationen erweitert werden, damit ein privates Laden von Elektrofahrzeugen für die Bewohner möglich ist. Durch den Ausbau wird das Gebäudenetz an mehreren Stellen zusätzlich belastet, da über längere Zeit hohe Belastungen durch das Laden der Fahrzeuge entstehen. Dies kann zu Überlastungen der Sicherheitseinrichtungen an den Verteilerstationen oder den Hauptsicherungen führen, wodurch eine gesicherte Stromversorgung der Bewohner nicht mehr gewährleistet ist. Weitergehend ist eine hohe Belastung des elektrischen Hausanschlusses durch die häuslichen und mobilen Lasten zu vermuten. Dieser ist lediglich für die Versorgung des Bestandsgebäudes ausgelegt und eine Erweiterung des Leistungsbezuges durch den elektrischen Hausanschluss ist nicht vorgesehen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Lastmanagementsystems zur Implementierung von Elektrofahrzeugen in ein bestehendes Mehrfamilienhaus. Das Lastmanagementsystem soll die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge regeln, sodass diese flexible Lasten sind. Daher kann auch von einem Lademanagement gesprochen werden. Gleichzeitig werden die Verbräuche der anderen Netzteilnehmer erfasst, sodass auf Schwankungen im Netz reagiert werden kann. Dadurch kann das Lademanagementsystem bei hoher Netzbelastung dieses durch Regelung der EFZ entlasten oder bei geringer Auslastung die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge erhöhen. Dieses dynamische Erfassen der Lasten und Regelung der Ladestationen soll eine Entlastung der kritischen Systemkomponenten bewirken. Vor allem soll sich dies in der Glättung der Leistungsspitzen und der phasengleichen Belastung wieder spiegeln. Eine Glättung der Leistungsspitzen wird durch die flexible Regelung der Ladeleistung der Elektrofahrzeuge durchgeführt.

Umgesetzt wird das Lademanagementsystem durch mehrere Hardwarebauteile und ein Managementsystem, welches durch eine speicherprogrammierbare Steuerung ausgeführt wird. Die Hardwarebauteile werden für die Erfassung der Daten des Gebäudenetzes eingesetzt. Ein Auslesen wird per Direktmessung oder Schnittstellenmessung der Energiezähler durchgeführt. Die so gewonnenen Daten werden an die SPS weitergeleitet, welche diese auswertet und eine Regelung der Ladestationen durchführt.

4. Gegenwärtiger Stand der Technik

Die Technologie der modernen Elektromobile ist im Verhältnis zu den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor relativ neu. Neben dem Aufbau der Elektroautos gilt dies vor allem für den Ladevorgang und die Energiesysteme. Es müssen neue Ansätze und Normen für den Betrieb, Ladevorgang und die Sicherungssysteme erstellt werden. Diese wurden in den letzten Jahren neu entwickelt, wodurch eine Vielzahl von Variationen an Stecker- und Ladesystemen entstanden ist. Da eine Vereinheitlichung der Systeme angestrebt wird, findet eine ständige Erneuerung der Normen für die Elektromobilität statt.

In den folgenden Kapiteln wird der gegenwärtige Stand der Technik von Elektrofahrzeugen, deren Betrieb und den Ladevorgang beschrieben.

4.1. Definition von Elektrofahrzeugen

Im Rahmen dieser Arbeit sind Elektrofahrzeuge und Hybridelektrofahrzeuge interessant, da diese von außen aufgeladen werden können und so eine Last für das Gebäudenetz darstellen. Welche Fahrzeuge eine Last für das Gebäude darstellen können, wird in der Ladesäulenverordnung (LSV) beschrieben.

Die Definition eines Elektromobils laut Ladesäulenverordnung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) ist ein „... reines Batteriefahrzeug oder ein von außen aufladbares Hybridfahrzeug...“ [8, S.49]. Neben den rein elektrisch betriebenen Elektrofahrzeugen oder „battery electric vehicle“ (BEV) werden ebenso Plug-In Hybrid Fahrzeuge oder „plug-in hybrid electric vehicle“ (PHEV) zu den Elektrofahrzeugen gezählt. Reine Elektromobile werden laut LSV folgend definiert: „Ein reines Batterieelektrofahrzeug ist ein Kraftfahrzeug mit einem Antrieb, bei dem

1. Alle Energiewandler ausschließlich elektrische Maschinen und
2. Alle Energiespeicher ausschließlich elektrisch wieder aufladbare Energiespeicher sind.“

Da ein rein elektrischer Antrieb und ausschließlich elektrischer Energiespeicher gefordert werden, gelten Elektrofahrzeuge mit „Range Extender“, per Definition, nicht zu den rein elektrischen Fahrzeugen, da deren Energiespeicher nicht ausschließlich elektrische Energiespeicher sind. Die Definiti-

on der Hybridfahrzeuge ist: „Ein von außen aufladbares Hybridelektrofahrzeug ist ein Kraftfahrzeug mit einem Antrieb, der über mindestens zwei verschiedene Arten

1. Von Energiewandlern, davon mindestens ein Energiewandler als elektrische Antriebsmaschine, und
2. Energiespeicher verfügt, davon mindestens einer von einer außerhalb des Fahrzeugs befindlichen Energiequelle elektrisch wieder aufladbar ist.“

Für die Untersuchung von Elektrofahrzeugen, welche im Kapitel 7 durchgeführt wird, sind jedoch rein elektrisch betriebene Elektrofahrzeuge, welche konduktiv geladen werden, interessanter. Diese stellen, wegen der größeren Kapazität der elektrischen Speicher, eine größere Dauerlast für das Gebäudenetz dar. Außerdem liegt die Ladeleistung bei PHEV meist nur bei maximal 3,7 kW, was einen Ladestrom von 16 A bedeutet [8, S.145].

Die Ladeleistung von rein elektrischen Fahrzeugen variiert mit deren Ladesystem. In Abbildung 4.1 sind die AC-Ladeleistungen und in Abbildung 4.2 die DC-Ladeleistung einiger gängiger Elektrofahrzeug Modelle dargestellt. Es ist eindeutig, dass die Ladeleistung bei Gleichstrom um einiges höher, als die bei Wechselstrom ist. Außerdem ist auffällig, dass die Ladeleistung des „Combined Charge Systems“ (CCS) und des "Charge de Move"(ChaDeMo), welches bei dem aufgeführten Modell bei 40 kW beziehungsweise 50 kW liegt, geringer als die Gleichstrom-Ladeleistung der anderen Systeme sind. Der Grund dafür ist, dass für bei dieser Ausführung des Schnellladesystems kein Thermomanagement eingesetzt wird, welches die Batterietemperatur beim Lade- und Entladevorgang regelt [9].

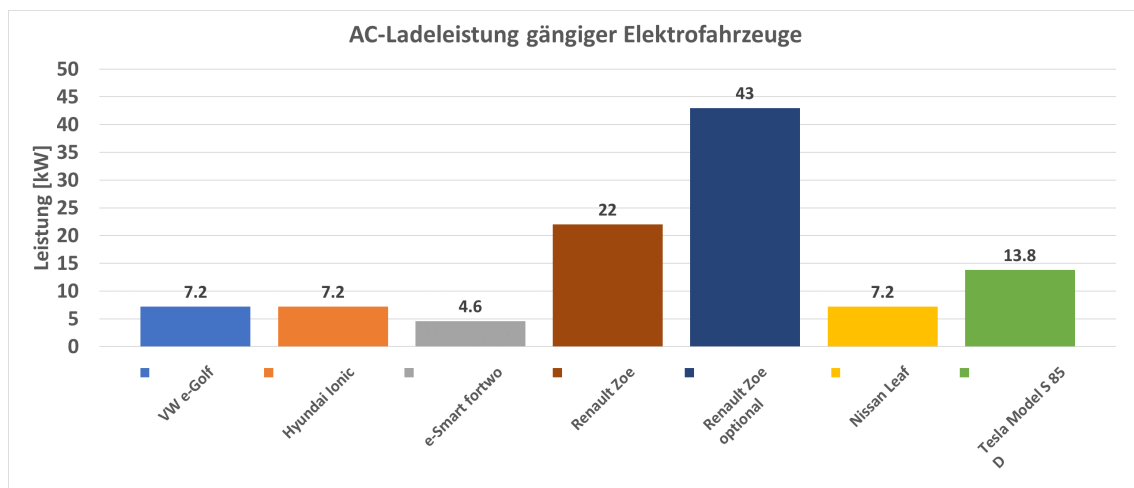


Abbildung 4.1.: AC-Ladeleistung ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]

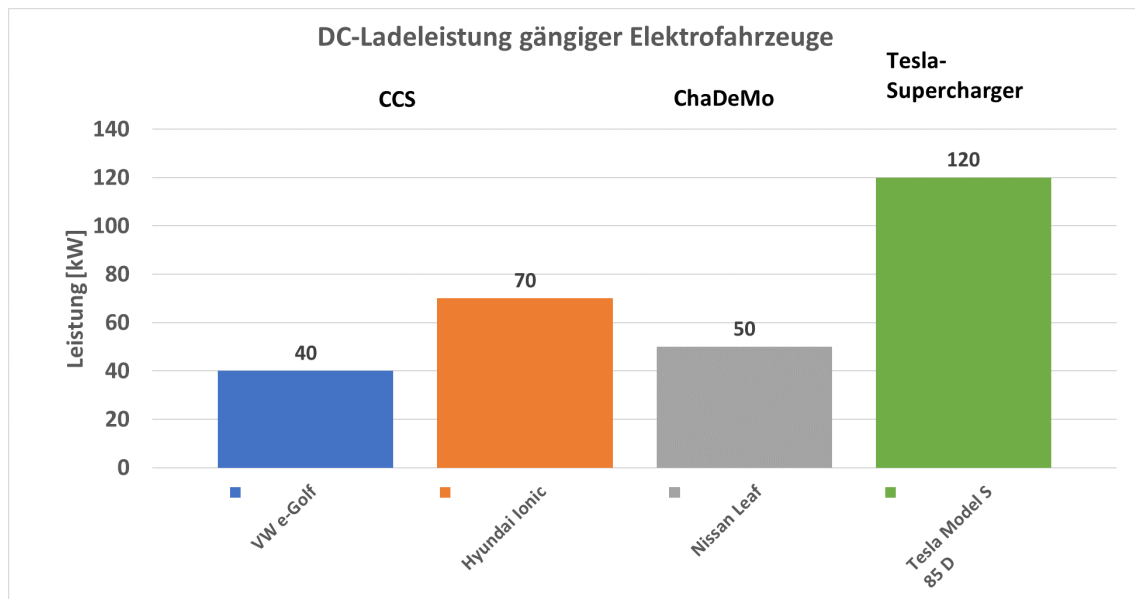


Abbildung 4.2.: DC-Ladeleistung ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 12, 15, 16]

Grund für die höhere DC-Ladeleistung der Automobile von Tesla ist nicht die Ladetechnologie, sondern die technisch-physikalische Grenze beim Laden eines Elektrofahrzeugs. Dabei ist die Kapazität der Batterie ein wesentlicher Faktor der Ladeleistung. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Schwellwert für die Ladung eines Elektroautos bei dem 10-fachen der Batteriekapazität liegt [8, S.146]. Das bedeutet einen höheren technisch-physikalischen Ladestrom bei Fahrzeugen mit größerer Batteriekapazität. Abbildung 4.3 zeigt die Batteriekapazität gängiger Elektrofahrzeuge. Der Mittelwert der Batteriekapazitäten liegt durchschnittlich bei 30 kWh, welche mit der neuen Generation von Elektrofahrzeugen deutlich gestiegen ist.

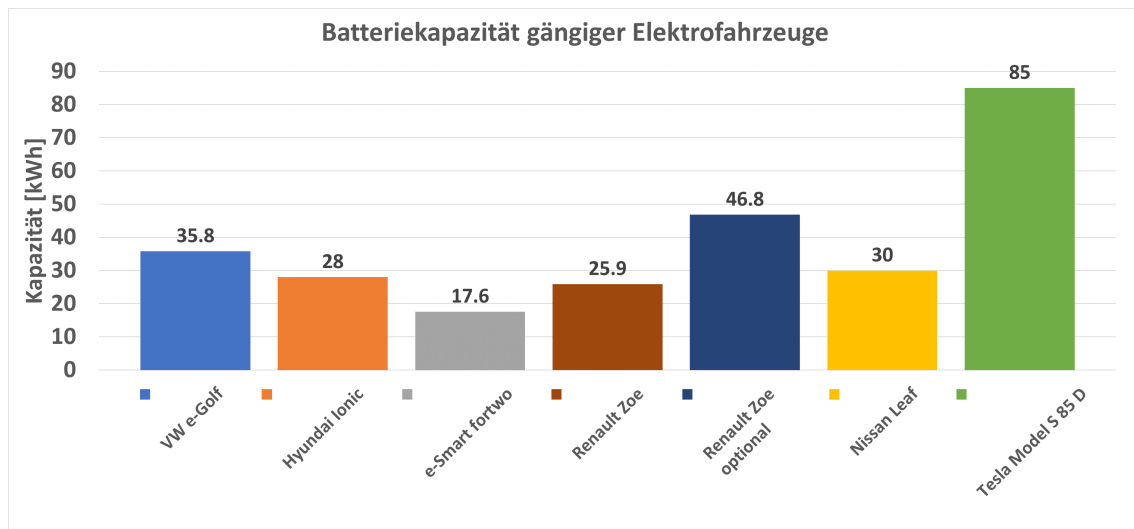


Abbildung 4.3.: Batteriekapazität ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]

Die Ladeleistung kann auch, unabhängig der technisch-physikalischen Grenze, vergrößert werden, indem ein Thermomanagement die Temperaturen der Batterie beim Ladevorgang regelt. Dies sorgt für eine gleichbleibende Temperatur beim Ladevorgang mit hohen Leistungen [8, S.138ff].

4.2. Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen

Die deutsche Automobilindustrie hat einen großen Marktanteil sowohl im Inland, als auch im Ausland [17]. Mit der alternativen Technologie der Elektrofahrzeuge wird jedoch das Marktbild neu gemischt. Vor allem chinesische und japanische Automobilhersteller haben ihre Produktion bereits früh auf die neue Technologie ausgelegt. Die deutsche Automobilindustrie hängt der Entwicklung und Produktion von Elektroautos hinterher, obwohl mittlerweile fast alle großen Autohersteller Deutschlands ein elektrisches Modell anbieten. Diese Verzögerung der Elektromobilität der deutschen Autohersteller spiegelt sich auch auf den Marktanteil der Elektroautos wieder. Das Ziel der Regierung bis 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland zuzulassen liegt noch weit entfernt [6]. Jedoch ist annähernd eine jährliche Verdoppelung der neuzugelassenen Elektroautos in Deutschland erfasst worden, weshalb das Ziel von 2020 erreicht werden kann [8, S.61]. In Abbildung 4.4 sind die Anzahl der Elektroautos in Deutschland bis 2018 aufgezeigt.

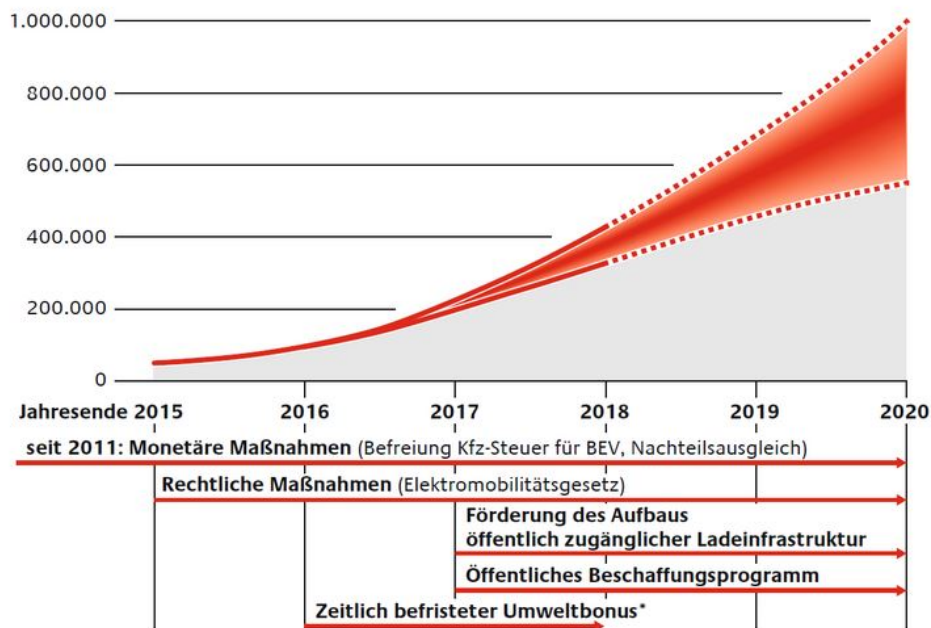


Abbildung 4.4.: Zahl der batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-in-Hybride sowie Range Extender in Deutschland [6]

Diese Prognose wird durch die aktuellen Verkaufszahlen und neu zugelassenen Elektrofahrzeuge bestätigt. Diese ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Es ist ein stetiges Wachstum der Neuzulassungen von reinen Elektroautos und „Plug-In“ Hybridfahrzeugen zu erkennen. Dies liegt einerseits an den Zuschussungen der Bundesregierung [18], andererseits am Fortschritt der Technologie und der damit verbundenen Kostendegression. Weitergehend steigt die maximale Reichweite der Fahrzeuge. Dadurch erhöht sich die Akzeptanz des Erwerbs eines Elektrofahrzeugs, da die ursprünglichen Einschränkungen nicht mehr schwerwiegend sind. Bei einem weiteren Fortschritt der Technologie ist die nächste Generation der Elektrofahrzeuge im Massenmarkt voraussichtlich konkurrenzfähig zu den konservativen Antriebskonzepten.

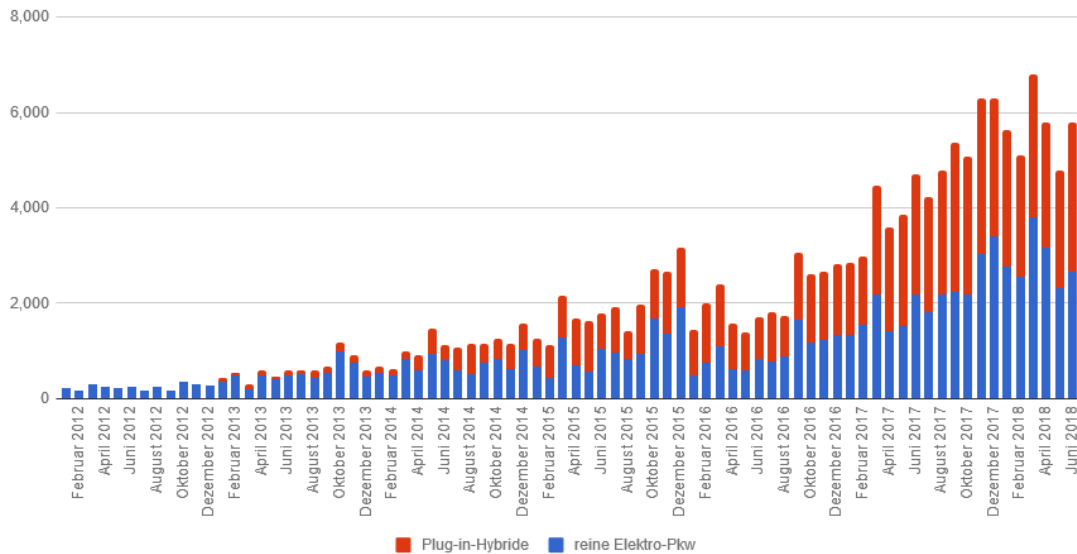


Abbildung 4.5.: Neuzulassungen von batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybride in Deutschland [19]

Wegen der ansteigenden Anzahl an Elektrofahrzeugen muss ebenso die Ladeinfrastruktur erweitert werden, damit die Nachfrage an Ladestationen gedeckt werden kann. Der dadurch bedingte Ausbau an Ladestationen wird das Stromnetz stark belasten, da die Elektrofahrzeuge mit einer hohen Ladeleistung über längere Zeit laden. Diese starke Belastung kann einerseits durch einen Netzausbau ausgeglichen werden, welcher jedoch aufwendig und kostenintensiv ist. Andererseits kann die Belastung durch ein Managementsystem geregelt werden, welches die Ladeleistung der Fahrzeuge an die Netzbelastung anpasst. Dadurch ist ein Ausbau der Ladeinfrastruktur möglich, ohne einen zusätzlichen Ausbau des Stromnetzes.

4.3. Systemansätze zum Laden von Elektrofahrzeugen

Bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen ist der Vorgang der Wiederaufladung ein umstrittenes Thema. Es gibt verschiedene Ansätze, wie der Ladevorgang effektiv, wirtschaftlich, ökologisch und schnell durchgeführt werden kann. In Abbildung 4.6 sind verschiedene Systemansätze für das Laden von Elektrofahrzeugen dargestellt. Diese unterteilen sich in drei Hauptgruppen.

- Konduktiv
- Induktiv
- Batteriewechsel

Dabei ist die Technologie des konduktiven Ladens am weitesten verbreitet, da sie eine effektive und kostengünstige Variante ist. Das induktive Laden und der Batteriewechsel sind eher Randerscheinungen, da diese Varianten nicht denselben Entwicklungsstand wie das konduktive Laden aufweisen. Ein Ausbau der induktiven Ladung ist besonders im Bereich der öffentlichen Ladestationen erwünscht, da diese besser durch Umwelteinflüsse und Vandalismus geschützt sind. Außerdem bieten diese eine leichtere Handhabung, da der Ladevorgang durch ein abstellen des Fahrzeugs oder sogar während der Fahrt ausgeführt werden kann [8, S.89ff].

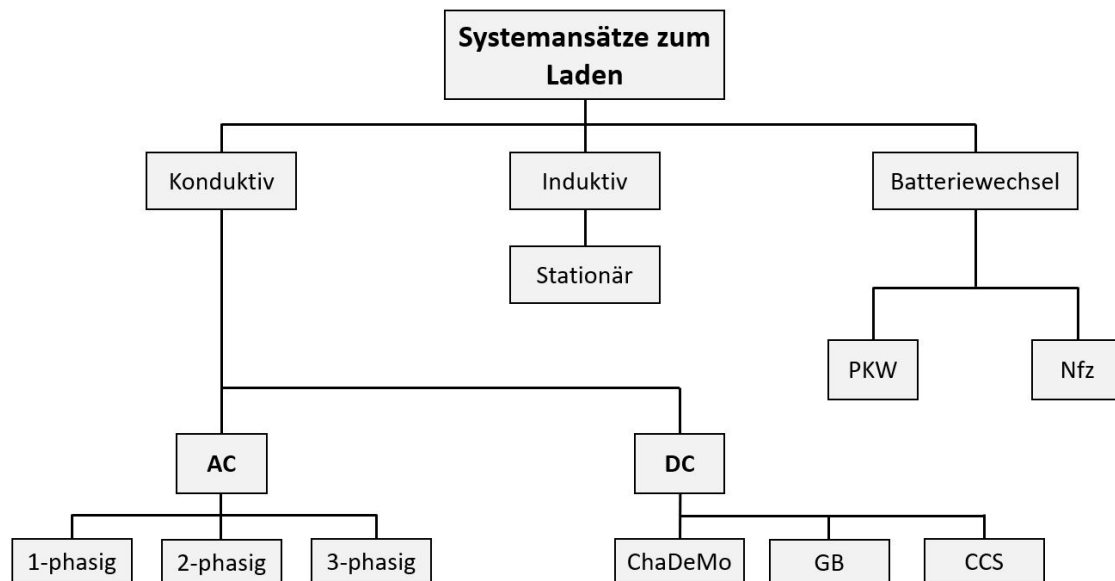


Abbildung 4.6.: Systemansätze zum Laden eines Elektrofahrzeugs [8, S.91]

4.4. Ladestationen und Ladeinfrastruktur

Die wichtigsten Elemente neben den Elektrofahrzeugen, sind die Ladestationen und die Ladeinfrastruktur. Sie stellen die Verbindung von Elektrofahrzeugen zum Systemnetz her und bilden somit die energetische und kommunikative Schnittstelle. Dessen Ausbau und Weiterentwicklung ist ein wesentlicher Bestandteil der Umstellung von Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf Elektromobile. Ein Ladevorgang zum heutigen Stand dauert im Verhältnis zu einem Tankvorgang eines konventionell angetriebenen Fahrzeuges um ein Vielfaches länger [8], weshalb eine angepasste Ladeinfrastruktur aufgebaut werden muss. Aus diesem Grund wurde von der europäischen Kommission in der Richtlinie 2014/94/EU festgelegt, mindestens doppelt so viele Ladestationen wie Elektrofahrzeuge bereit zu stellen, wovon mindestens 10 Prozent öffentlich zugänglich sein müssen [8, S.58]. Weitergehend werden in dem Elektromobilitätsgesetz (EmoG) [8, S.52] Ermächtigungsgrundlagen für Gemeinde

und Städte gegeben, um Elektrofahrzeugen bestimmte Privilegien einzuräumen. Diese erlauben unter anderem ein prioritäres Parken an Ladestationen beziehungsweise ein Verbot des Abstellens von Verbrennern.

Die Definition einer Ladestation wird in der Ladesäulenverordnung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie beschrieben [8, S.48]. Außerdem muss eine technische Mindestanforderung für einen sicheren Betrieb gewährleistet sein. Dies beinhaltet eine hinreichende Sicherheit und Robustheit für eine Handhabung von ungeschulten Personen. Außerdem ist sicherzustellen, dass ein Betrieb unter jeglichen Umständen möglich ist. Dabei wird besonders auf Einsatzfähigkeit der Steckerverbindung hingewiesen, welche einen sicheren Betrieb bei Verschmutzung, Feuchte oder anderen Umwelteinflüssen gewährleisten muss.

In der Ladesäulenverordnung wird auch der Unterschied zwischen Normallade- und Schnelladepunkten definiert. Ein Normalladepunkt darf höchstens 22 kW von einem Ladepunkt an ein Elektromobil übertragen. Sobald eine Ladung eines Elektrofahrzeugs an einem Ladepunkt mit einer Leistung von über 22 kW durchgeführt wird, ist dieser als Schnelladepunkt definiert.

Die Ausprägung der Ladestationen sind grundsätzlich in drei Arten unterscheiden [8, S.50], den

- privaten Bereich
- halb-öffentlichen Bereich
- öffentlichen Bereich

Das Laden im privaten Bereich ist überwiegend mit Heimpladestationen oder Wallboxen gebräuchlich. Die Installation wird primär bei Haushalten oder Unternehmen durchgeführt, wodurch die technischen Anforderungen niedrig sind. In der Regel werden Normalladepunkte in dreiphasiger Ausführung mit einer Mode 3-Ladeschnittstelle und dem Anschlussfall B oder C installiert [8, S.194], welche im Kapitel 5.2 genauer erklärt werden. Wegen des einfachen Aufbaus und der Topologie sind die Ladestationen im privaten Bereich am häufigsten vertreten [8, S.194].

Ladestationen des öffentlichen Bereiches sind an öffentlichen Grundstücken installiert, welche für jeden zugänglich sind. Diese werden meist von Drittanbietern betrieben, was zur Abrechnung eines Ladevorganges ein Abbuchungssystem beinhaltet. Die Authentifizierung zum Beginn der Ladung und Abwicklung des Abbuchungssystems kann über verschiedene Arten ausgeführt werden. Üblich sind Authentifizierung über

- RFID Kartenleser,
- Smartphone App über QR-Code oder
- Authentifizierung über Ladestecker nach ISO 15118 [8, S.176].

Die halb-öffentlichen Ladestationen sind für einen eingeschränkten Nutzerkreis verfügbar. Sie werden üblicherweise auf Parkplätzen von Geschäften und Unternehmen errichtet. Grundsätzlich zählen diese zu den öffentlichen Ladestationen und können auf gleiche Weise abgerechnet werden, jedoch dienen diese meist eher als zusätzliche Dienstleistung.

Installiert werden, sowohl bei den halb-öffentlichen Bereichen, als auch bei den öffentlichen Bereichen, überwiegend Ladesäulen mit einer höheren Ladeleistung. Üblicherweise wird eine Kombination von dreiphasigen Ladern und Gleichstromladern angeboten. Durch das Verkürzen der Standzeiten erhöht sich die Fahrzeugfrequenz an den Stationen. Die Anschlussart der Wechselstromschnittstellen ist, wie im privaten Bereich, meist Anschlussfall B oder C. Hingegen wird bei der Gleichstromladung das Ladekabel fest an der Ladesäule installiert [8], was dem Anschlussfall C entspricht.

Der wesentliche Unterschied der Wechsel- zur Gleichstromladung ist die maximale Ladeleistung der Systeme. Für die Ladestationen und Elektrofahrzeuge bedeuten die verschiedenen Ladeverfahren einen unterschiedlichen Aufbau der Komponenten. Dies bezieht sich vor allem auf die Topologie des Gleichstromwandlers des Ladesystems. Da die Batterie nur mit Gleichstrom geladen werden kann, muss eine Umwandlung des netzseitigen Drehstromes auf Gleichstrom mittels einer Gleichrichtereinheit erfolgen. Dieser kann entweder im Fahrzeug oder in der Ladestation verbaut sein. Wird ein Elektromobil mit Wechselstrom geladen, so befindet sich die Gleichrichtereinheit im Elektrofahrzeug. Das Umwandeln in Gleichstrom wird über den Ladekontroller des Fahrzeugs gesteuert. In Abbildung 4.7 ist die Topologie des Gleichrichters bei einer Wechselstromladung dargestellt. Die elektrische Energie wird von dem Niederspannungsnetz bezogen und mittels des Ladekontrollers und der Sicherungseinheiten der Ladestation, über die Ladekabelschnittstelle, dem Elektrofahrzeug bereitgestellt. Der Ladestrom wird von dem Ladekontroller des Elektrofahrzeuges bestimmt und durch den Gleichrichter der Batterie bereitgestellt.

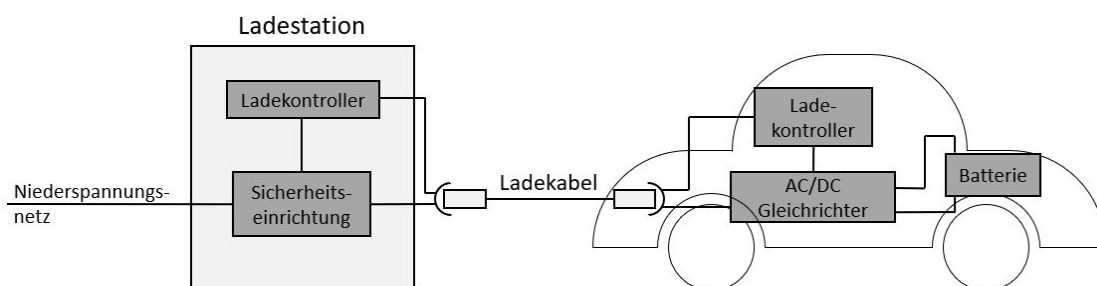


Abbildung 4.7.: Topologie der Komponenten beim Wechselstromladen [8, S.95]

Bei einem Ladevorgang mit Gleichstrom, befindet sich die Gleichrichtereinheit in der Ladestation (Abbildung 4.8). Die Umwandlung des Wechselstroms des Niederspannungsnetzes wird in der Lade-

station durchgeführt, was eine Gleichstromübertragung über das Ladeschnittstellenkabel ermöglicht. Dadurch wird das Laden mit höheren Spannungen und Strömen ermöglicht. Eine dreiphasige Ladung kann maximal einen Strom von 63 A mit einer Spannung von 500 V übertragen [8, S.94]. Bei der Gleichstromladung ist ein Strombezug von 200 A mit bis zu 1000 V möglich [8, S.96]. Aus diesem Grund wird das Gleichstrom-Ladeverfahren für Schnellladesysteme bevorzugt. Ein weiterer Vorteil ist, dass der verhältnismäßig schwere Gleichrichter nicht mehr im Auto untergebracht ist, wodurch Gewicht eingespart wird, welches sich in einer höheren Reichweite widerspiegelt [8, S.94f]. Nachteilig sind die Komplexität und Kosten des Gleichstromladens. Daher kommt eine Kombination der beiden Verfahren zum Einsatz, wobei die Wechselstromladung für Normalladeleistungen und die Gleichstromladung für Schnellladeleistungen eingesetzt wird [8, S.95].

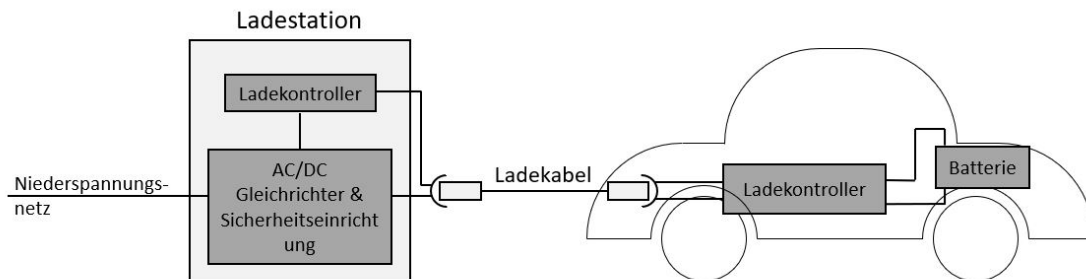


Abbildung 4.8.: Topologie der Komponenten beim Gleichstromladen [8, S.97]

4.5. Lademanagementsystem

Eines der wichtigsten Themen der Elektromobilität ist die Versorgung der Fahrzeuge mit Energie. Dabei gibt es mehrere Ansätze auf die geachtet werden müssen. Besonders im Fokus stehen dabei eine

- umweltschonende und nachhaltige Energieerzeugung,
- eine intelligente Energieverteilung und -bereitstellung und
- ein effizienter Nutzen der Energie [8, S.149].

Um diese Faktoren zu verbessern, werden stetig neue Ansätze für den Energiehandel, die Leistungsverteilungssysteme und Energieladesysteme entwickelt.

Für diese Arbeit sind besonders das intelligente Leistungsverteilsystem und die Bereitstellung wichtig. Daher wird folgend tiefer auf das Lademanagement von Elektrofahrzeugen eingegangen.

Das Lademanagement ist für die Elektromobilität von besonderer Bedeutung, da dies auf das bestehende Stromverteilnetz eingriff nimmt. Dieses wird vor allem in dicht besiedelten Gebieten durch die Elektromobilität stark belastet, was zu einer lokalen Limitierung des Strombezugs oder der Ladestationen führen kann. Durch diese Einschränkung kann eine Verfügbarkeit einer Ladestation nicht immer gewährleistet sein. Abhilfe kann mit einer Steuer- und Regelung der Ladestationen geschaff werden. Mit diesem Last- oder Lademanagement kann eine gleichmäßige Verteilung der verfügbaren Energie gewährleistet werden, sodass auch bei hoher Nachfrage des Stromes, ein geregeltes Laden von Elektrofahrzeugen möglich ist.

Im privaten Bereich können Lastmanagementsysteme in Kombination mit Elektromobilität und Eigenenergieerzeugung den Eigenverbrauchsanteil erhöhen und die Netzbelastung des lokalen Niederspannungsnetzes verringern. In Abbildung 4.9 sind die Energiebezüge in Kilowattstunden mehrerer Verbraucher über die Zeit und ihrem Leistungsbezug dargestellt. Der Strombezug der Verbraucher ist nicht durch ein Lastmanagement geregelt. Es ist zu erkennen, dass hohe Leistungsspitzen auftreten, die sowohl den Hausanschluss, als auch das Niederspannungsverteilnetz stark belasten.

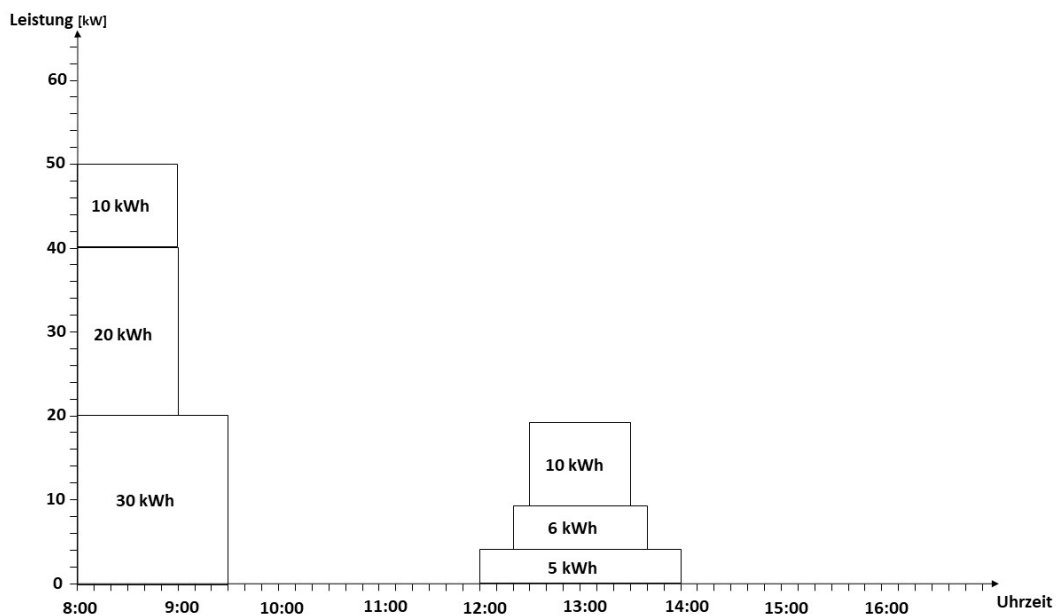


Abbildung 4.9.: Belastung eines Systems ohne Lastmanagement [8, S.150]

Wird der Strombezug durch ein Lastmanagement begrenzt, so kann eine Verschiebung des Energiebedarfs durchgeführt werden, welches den Hausanschluss und das Niederspannungsnetz weniger belastet. In Abbildung 4.10 ist zu sehen, dass der maximale Leistungsbezug auf 20 kW begrenzt ist und der Energiebezug zeitlich verschoben ist. Dadurch werden die Stromspitzen geglättet und eine gleichmäßigere Netzbelastung erreicht.

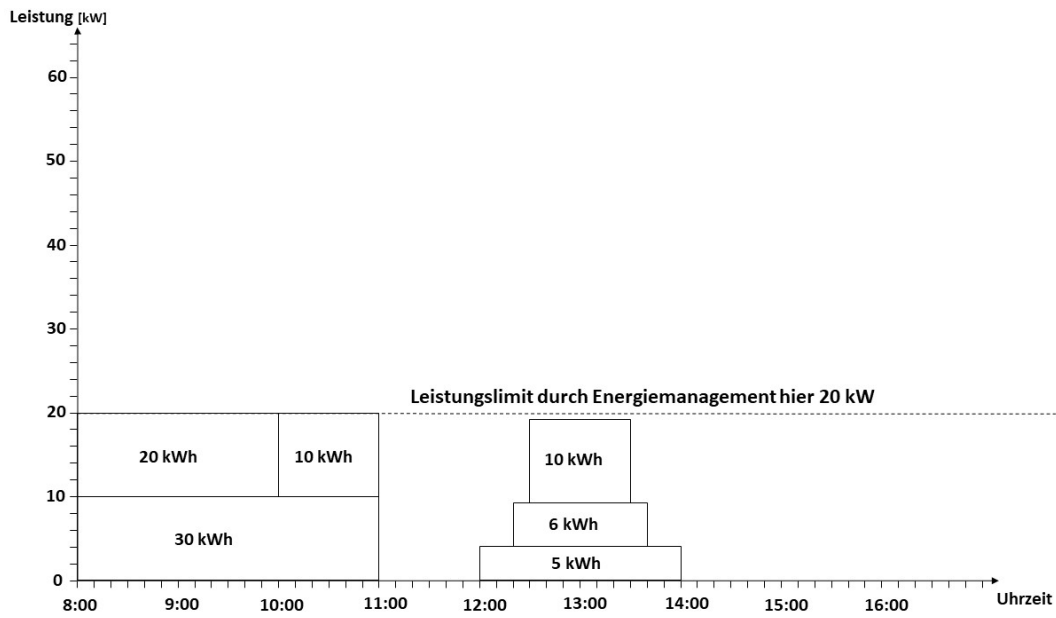


Abbildung 4.10.: Belastung eines Systems mit statischem Lastmanagement [8, S.152]

Dieses Prinzip wird überwiegend in den aktuellen Lastmanagementsystemen für mehrere Ladestationen angewandt [20]. Es wird eine statische, maximale Leistungsbezugsgrenze gesetzt und die Leistung gleichwertig auf die Elektrofahrzeuge verteilt. Diese Grenze wird jedoch manuell gesetzt und benötigt daher eine zugesicherte Mindestleistung.

Für eine intelligente Lösung eines Lastmanagements, muss das System dynamisch auf Erzeugung und Verbrauch reagieren. In Abbildung 4.11 ist dasselbe System um eine Photovoltaikanlage und ein dynamisches Lastmanagement erweitert. Es ist zu erkennen, dass die Leistungsgrenze im zeitlichen Verlauf an die Erzeugung der Photovoltaikanlage angepasst ist. Dadurch ist ein hoher Eigenverbrauchsanteil des Photovoltaikstroms durch die Verbraucher gegeben.

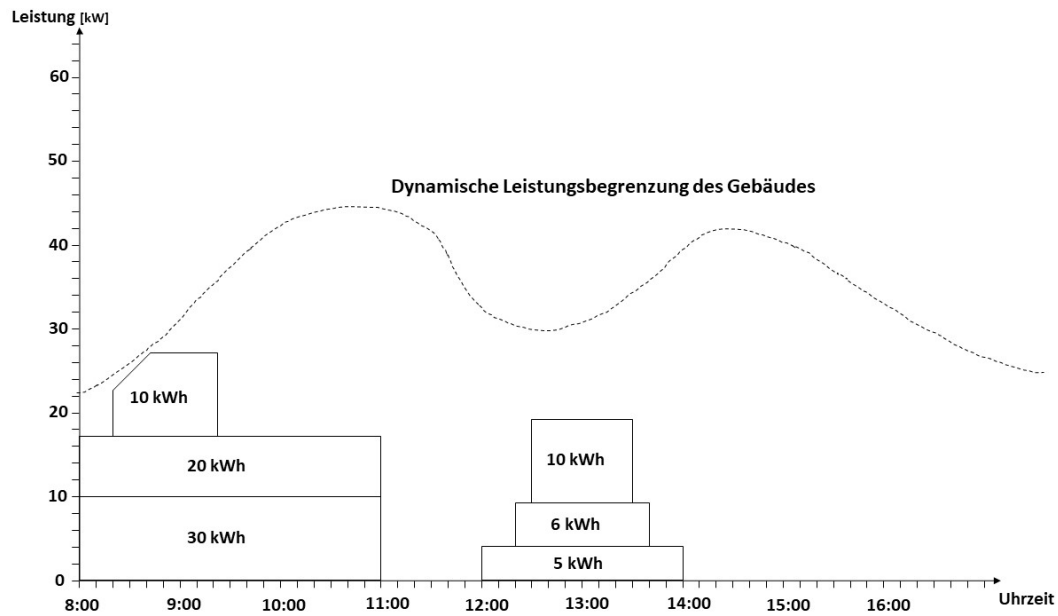


Abbildung 4.11.: Belastung eines Systems mit dynamischen Lastmanagement [8, S.152]

Bestehende Lastmanagementsysteme im privaten Bereich, werden eher mit einem zusätzlichen Batteriespeicher betrieben. Diese können jedoch mit dem Fortschreiten der Technologie der Elektromobilität durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden, da zukünftig eine Rückspeisung der Energie aus den Elektromobilen durchführbar sein wird. Dadurch werden neue Möglichkeiten der dezentralen Energiespeicherung im privaten und öffentlichen Bereich geschaffen, die den Autarkiegrad erhöhen und eine Stabilisierung des Netzes ermöglichen.

5. Standardisierung der Ladelösungen für Elektrofahrzeuge

Für das Laden von Elektromobilen gibt es gesonderte Anforderungen, welche einen kontrollierten und gesicherten Ladevorgang ermöglichen. Dabei können für verschiedene Anwendungsfälle, unterschiedliche Hardware- und Kommunikationsschnittstellen verwendet werden. Diese sind abhängig von der Leistung, der Ladeschnittstelle und der Anschlussart. Folgend werden die Komponenten, Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle dargestellt, welche in den zurzeit gültigen Normen festgelegt sind.

5.1. Ausfallsicherung des Lastmanagementsystems

Das Lastmanagementsystem besteht aus mehreren Bauteilen, welche unterschiedliche Aufgaben und Wichtigkeiten besitzen. Daher muss bei Ausfall von Bauteilen eine automatisierte oder manuelle Reaktion erfolgen, damit der Fehler behoben und das Lastmanagement den Betrieb fortsetzen kann. Die Art und Reaktionszeit der Behebung hängt dabei vom Bauteil des Systems ab. Der Ausfall einer wichtigen Komponente kann ein Abschalten des Lastmanagements zur Folge haben.

Da sich die Ladesysteme für Elektromobile noch in der Entwicklungsphase befinden, gibt es noch keine Normierung für das Vorgehen bei Ausfall einer Ladestation für den privaten Bereich. Daher werden die Ladestationen als normale Last und der Betrieb der Sicherheit nach der Normenreihe DIN VDE 0100¹ [21] und der DIN 18015² [22] angenommen. Dies gilt ebenso für die weiteren Betriebsmittel zur Erfassung und Weitergabe der Daten.

Ein Ausfall der speicherprogrammierbaren Steuerung ist ein gesonderter Fall, da diese die erfassten Daten verarbeitet und die Ladestationen steuert. Bei Auftreten eines Fehlerfalles kann die Kommunikation der Steuerung zu den Ladestationen abbrechen, was zu einem unregelmäßigen Strombezug der Elektrofahrzeuge führt. In diesem Fall ist die Sicherstellung des Einhaltens der zulässigen Dauer- und

¹Normreihe für das „Errichten von Niederspannungsanlagen“

²Normreihe für die Planungsgrundlage zum Errichten von elektrischen Anlagen in Wohngebäuden

kurzeitigen Maximalströme nicht mehr gewährleistet, was zu einem Auslösen der Sicherungen führen kann.

Ein eigenständiges, zeitverzögertes Abschalten oder Regeln der Ladeströme ist durch den Ladekontroller der Wallboxen nicht gegeben. Aus diesem Grund ist eine Sicherheitseinrichtung in das System einzugliedern, welche bei einem Fehlerfall der speicherprogrammierbaren Steuerung die Last der Elektrofahrzeuge reduziert. Dies wird mittels eines Zeitrelais umgesetzt, welche an den Ladekontroller angeschlossen ist.

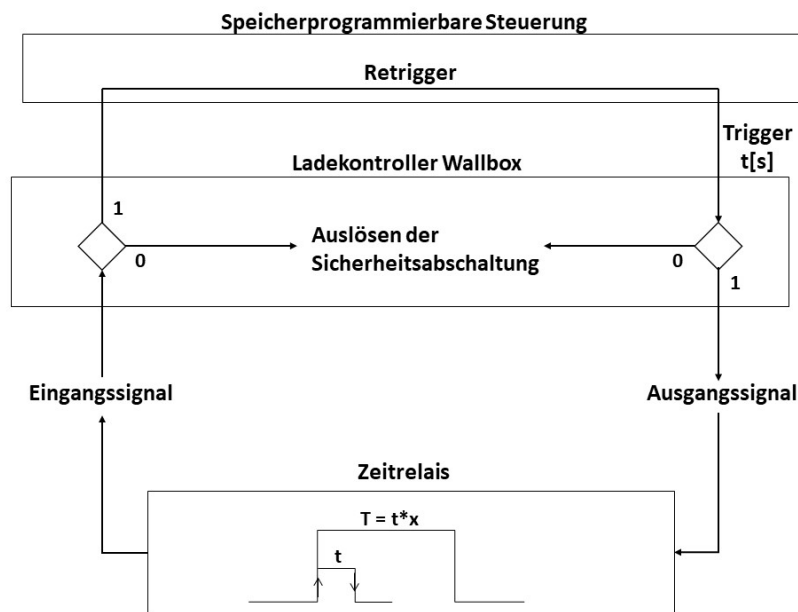


Abbildung 5.1.: Aufbau der Sicherheitsabschaltung des Lademanagements[23]

Abbildung 5.1 zeigt schematisch die Logik und Verschaltung des Ladekontrollers und des Zeitrelais. Der Ladekontroller gibt ein analoges Signal (logische 1) über einen Output an den Eingang des Zeitrelais, welches von der speicherprogrammierbaren Steuerung eingeleitet wird. Das Zeitintervall (T) des Relais wird gestartet und das Signal wird an einen Eingang des Ladekontrollers zurückgegeben. Die SPS erfasst das analoge Eingangssignal (logische 1) des Ladekontrollers und sendet nach einem Zeitintervall (t) ein neues Signal über den Ausgang des Controllers an das Relais, wodurch das Zeitintervall des Relais zurückgesetzt wird. Das Zeitintervall des Relais ist um einen x -fachen Wert größer als das Triggersignal der SPS, wodurch ein einzelner Ausfall des Signals keine Folgen hat. Bei Auftreten eines Fehler- oder Ausfalls der SPS, wird kein analoges Signal (logische 0) über den Ausgang des Ladekontrollers an das Relais gesendet, wodurch das Zeitintervall des Relais nicht zurückgesetzt wird. Läuft das Zeitintervall des Relais ab, wird keine logische 1, sondern eine logi-

sche 0 an den Controller gegeben, was ein Beenden des Ladevorganges zur Folge hat. Dadurch kann ein ungeregeltes Laden der Ladestationen verhindert werden. Ein Zurücksetzen des Zeitrelais und der speicherprogrammierbaren Steuerung ist nur manuell möglich.

5.2. Hardwareschnittstellen zum Laden von Elektrofahrzeugen

Für das Laden von Elektrofahrzeugen gibt es gegenwärtig zwei Möglichkeiten. Zum einen kann eine konduktive (kabelgebundene) Ladung, zum anderen eine induktive (kabellose) Ladung durchgeführt werden [24]. Am häufigsten verbreitet sind momentan konduktive Ladelösungen [25], da diese derzeit kostengünstiger sind und eine simple Lösung für die Einführung von Elektromobilen ist.

Für das konduktive Laden wird ein Ladekabel benötigt, welches die Ladestation, „Electrical Vehicle Supply Equipment“ (EVSE), mit dem Elektrofahrzeug, auch „Electric Vehicle“ (EV) genannt, verbindet. Dafür wird ein sogenanntes Ladestecksystem benötigt. Ein Ladestecksystem für Elektrofahrzeuge beinhaltet vier Hardwareschnittstellen. Dabei handelt es sich um [8, S.118]:

- fahrzeugseitige Buchse (Vehicle inlet)
- fahrzeugseitiger Stecker (Connector)
- ladestationsseitiger Stecker (Plug)
- ladestationsseitige Buchse (Socket outlet)

An diese Komponenten werden je nach Anwendungsfall verschiedene Anforderungen gestellt. Zum einen kann mit Wechselstrom, zum anderen mit Gleichstrom geladen werden.

Die Anschlussart des Fahrzeugs beim konduktiven Laden ist in drei Fälle unterteilt. Diese sind in der Abbildung 5.2 dargestellt. Der Anschlussfall „A“ stellt ein fest mit dem Fahrzeug verbundenes Ladekabel dar. In diesem Fall ist keine Varietät oder Erweiterung des Ladekabels möglich. Die Ladeleistung liegt überwiegend bei 3,7 kW, was einem Ladestrom von maximal 16 A entspricht [8, S.119]. Wegen der geringen Ladeleistung und fehlenden Flexibilität ist der Anschlussfall „A“ eher unüblich. Liegt der Anschlussfall „B“ vor, so ist das Ladekabel, sowohl an der Ladestation, als auch an dem Elektrofahrzeug steckbar. In diesem Fall besitzt das Ladekabel meist der Elektromobilbesitzer. Das hat den Vorteil einer hohen Flexibilität, da für verschiedene Steckertypen von Fahrzeugen, das richtige Kabel mit passendem Querschnitt mitgeführt werden kann. Der Anschlussfall „B“ ist am weitesten verbreitet für Wechselstromladung für private, halb-öffentliche und öffentliche Ladestationen. Bei dem Anschlussfall „C“ handelt es sich um ein fest mit der Ladestation verbundenes Kabel. Bei diesem Anwendungsfall handelt es sich überwiegend um Gleichstromladesystem für Ladesäulen im öffentlichen und halb-öffentlichen Bereich. Weniger verbreitet ist dieser Anschlussfall für private

Ladestationen in Wohnhäusern. Die Ladeleistung der Anschlussfälle „B“ und „C“ werden im weiteren Verlauf des Kapitels für die verschiedenen Steckertypen erläutert.

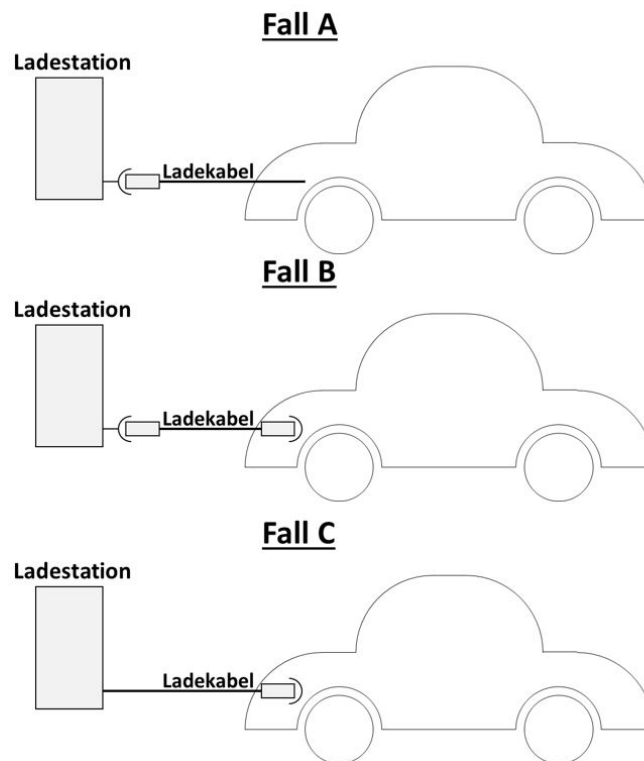


Abbildung 5.2.: Anschlussfälle des konduktiven Steckersystems nach IEC 61851-1 [8, S.119]

5.2.1. Steckerverbindungen nach IEC-62196

Die IEC-62196 mit dem Titel „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplung und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen“, ist eine internationale Norm für das Laden für Elektrofahrzeuge. Diese beinhaltet die Steckertypen und Lademodi, welche von der International Electrotechnical Commission (IEC) festgelegt sind. Der erste Teil der Norm behandelt die vier Lademodi für das AC- und DC-Laden, welche in der Norm IEC-61851-1 (Kapitel 5.3.2) näher beschrieben werden. Dabei ist die Kommunikation über die Kontaktstifte, die Nennspannung und -strom und der Berührungsschutz der Schnittstellen definiert. In Teil zwei wird die Dimensionskompatibilität der verschiedene AC-Steckerverbindungen, in Teil drei für die DC-Steckerverbindung erläutert. Der vierte Teil beinhaltet die Steckerverbindung für Leichtelektrofahrzeuge [26].

Für die beschlossenen Bedingungen der IEC-62196 haben sich zum heutigen Zeitpunkt drei Ladesteckersysteme durchgesetzt. Diese sind in Abbildung 5.3 in verschiedenen Kombinationen aufge-

führt. Zum einen existiert der „Typ 1“ oder auch „SAE J1772“ Stecker, welcher eine einphasige Wechselstromladung ermöglicht. Er erlaubt das Laden mit 240 V mit bis zu 80 A, was einer Ladeleistung von 19,2 kW entspricht. Der „Typ 1“ Stecker wird hauptsächlich in den USA und Japan verwendet, da deren Niederspannungsnetze einen einphasigen Hausanschluss mit 100-120/240 V vorweisen. In Europa gilt der „Typ 2“ Stecker, auch „Mennekes Stecker“, als Standard. Bei diesem Steckersystem ist eine ein- bis dreiphasige Lademöglichkeit gegeben. Die Ladeleistung kann bei einphasigem Strombezug bis zu 7,32 kW, beziehungsweise 230 V und 32 A, bei dreiphasiger Ausführung bis zu 43,47 kW, bei 230 V und 63 A, entsprechen [26].









	Typ 1 / USA, Japan	Typ 2 / Europa	GB / China
Wechselstrom (AC)	 SAE J1772 / IEC 62196-2	 IEC 62196-2	 GB Part 2
Gleichstrom (DC)	 IEC 62196-3	 IEC 62196-3	 GB Part 3 / IEC 62196-3
„Combined AC/DC Charging System“	 SAE J1772 / IEC 62196-3	 IEC 62196-3	

Abbildung 5.3.: Überblick der normierten Steckersysteme für die AC-, DC- und kombinierte Ladung [27]

Die Steckerschnittstelle, welche für den chinesischen Markt entwickelt wurde, ist das GB/T-System. Dabei sind für AC- und DC-Ladung unterschiedliche Ladestecker konzipiert worden. Der AC Lade-stecker ist für das konventionelle Laden und kann nach aktuellen Angaben der chinesischen Zertifizierungsstelle (GB) einen Ladestrom von 63 A mit Drehstrom übertragen. Dies entspricht der Leistungsübertragung des Typ 2-Steckers. Eine DC-Leistungsübertragung ist mit 1.000 V und einem Ladestrom von 200 A möglich, was einer theoretischen Ladeleistung von 200 kW entspricht [28] [29].

Unter der IEC 62196-3 ist das Gleichstromladen genormt. Dies ist eine Erweiterung der Steckersysteme „Typ 1“ und „Typ 2“ um zwei zusätzliche Ladepins und wird deshalb auch Combined Charging

System (CCS) genannt. Dabei wird weiterhin eine Kombination mit „Typ 1“ oder „Typ 2“ unterschieden, welche auch „Combo1“ (Typ 1 Kombination) und „Combo2“ (Typ 2 Kombination) genannt werden [26].

Der „Typ 2“ Stecker wird ebenso von der Firma Tesla für deren DC-Schnellladesystem verwendet. Der sogenannte „Tesla Supercharger“ erreicht eine maximale Ladeleistung von 145 kW bei etwa 480 V und 300 A [30].

In Japan ist das sogenannte CHAdeMO-Ladesystem der Standard für Gleichspannungsladungen. Dieser erreicht eine Leistung von bis zu 150 kW bei bis zu 500 V und 350 A. Das CHAdeMO-Ladesystem wird von japanischen Autoherstellern favorisiert. Die Abkürzung steht für "Charge de Move"[31].

Die Pinbelegung des „Typ 2“ AC-Steckers ist in Abbildung 13 dargestellt. Insgesamt sind 7 Pins verbaut, wobei 3 Pins für die Kommunikation von EVSE und EV zuständig sind. „PP“ steht für „Proximity Pilot“ (auch „Plug Present“) und überprüft, ob ein Ladekabel angeschlossen ist und welche Stromtragfähigkeit dieses besitzt. Der Pin „CP“ ist der „Control Pilot“, welcher für die Kommunikation der Ladung zuständig ist. In der Mitte des Ladesteckers befindet sich die „Protective Earth“(PE). Die ein- bis dreiphasige Ladung findet über die Pins L1, L2, L3 und N statt [26].

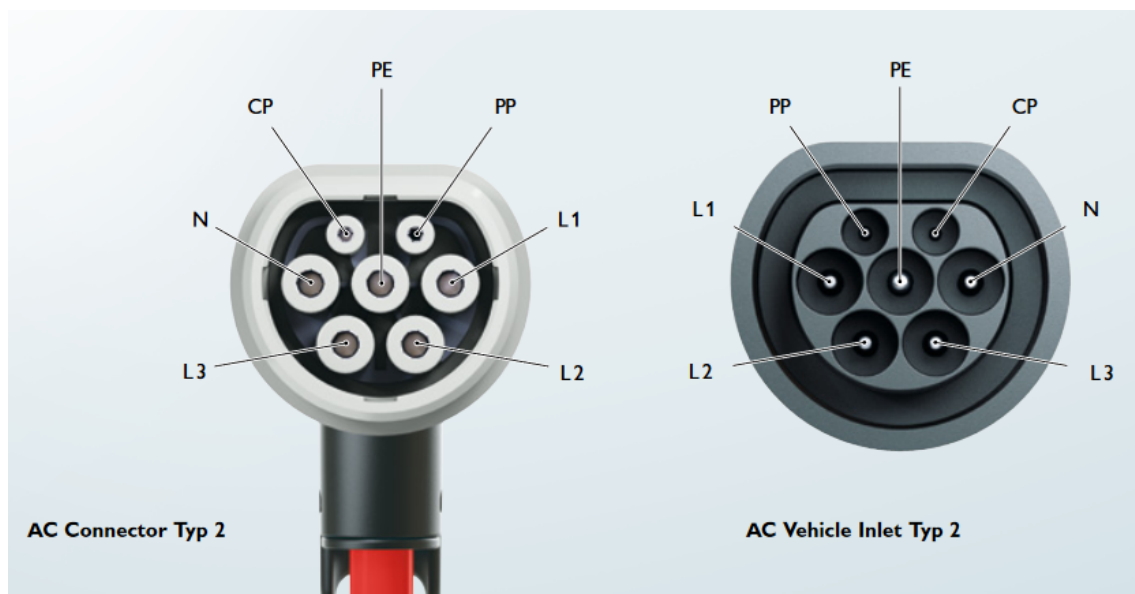


Abbildung 5.4.: Pinbelegung des Typ 2 Steckersystems [27]

Beim CCS werden neben der 7 Pins für das AC-Laden noch Pins für die DC-Ladung hinzugefügt. Die DC-Ladepins werden gesondert unter dem „Typ 2“ Stecker angeordnet (Abbildung 14). Die Kommu-

nikation zwischen EVSE und EV findet bei der DC-Schnellladung, ebenso wie dem „Typ 2“ Stecker, über CP, PP und PE statt.

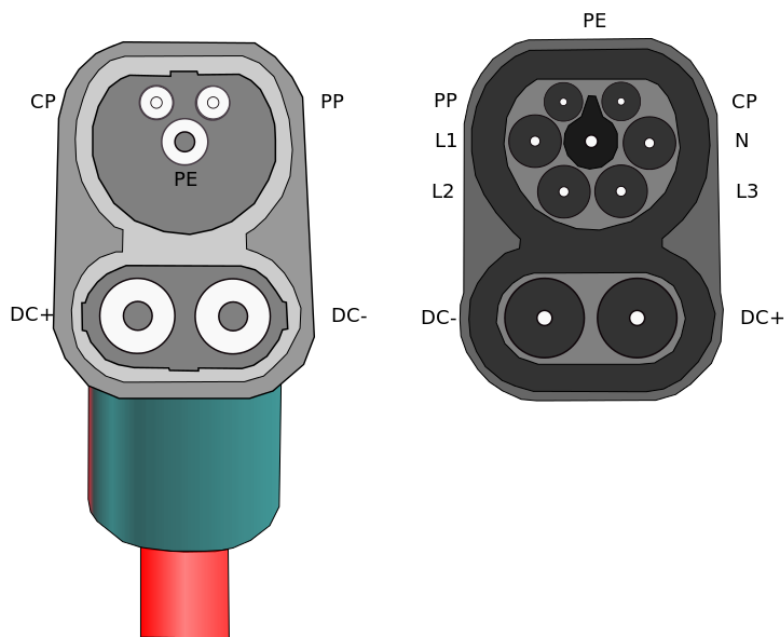


Abbildung 5.5.: Pinbelegung des Combo 2 Steckersystems [32]

5.2.2. Modi zum Laden von Elektrofahrzeugen

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben, gibt es vier verschiedene Lademodi für EV, welche in der IEC 61851 beschrieben werden [26]. Diese Lademodi unterscheiden sich im Wesentlichen anhand der einzuhaltenden Sicherheitsrichtlinien, der Ladeströme und der Kommunikation zwischen EVSE und EV.

- Mode 1:

Das EV wird mit einphasigem Wechselstrom oder Drehstrom geladen, wobei der maximale Strom bei 16[A] abgesichert ist. Dieser Lademodus ist für das Laden an einem Hausanschluss mittels SCHUKO (Schutzkontakt) oder CEE Steckdose ausgelegt. Dabei findet keine Kommunikation zwischen dem EV und der netzseitigen Ladung statt.

- Mode 2:

Das Laden des EV ist mit einphasigem Wechselstrom oder Drehstrom bis zu 32[A] möglich. Dabei wird, ebenso wie im Mode 1, eine SCHUKO oder CEE Steckdose verwendet. Die Sicherheit garantiert eine sogenannte „In-cable control box“ (ICCB) mit einem FI-Schutzschalter als Überstromschutz, Erkennung von Fehlerströmen und zur Ladestromsteuerung. Im Mode 2 findet eine analoge Kommunikation zwischen dem EV und dem Ladesystem statt.

- Mode 3:

Das EV wird über eine EVSE mit bis zu 63[A] Wechsel- bzw. Drehstrom geladen. Über eine Pulsweitenmodulation (PWM) kommuniziert die EVSE mit dem EV und bestimmt somit den Ladestrom. Für die Sicherheit des Systems sorgt ein FI-Schutzschalter und ein Ladeschutz (Relais) in der EVSE. Der Steckertyp kann je nach Standort und Auslegungsart variieren.

- Mode 4:

Bei Mode 4 befindet sich der Ladestromgleichrichter nicht im EV, sondern in der EVSE, was eine Gleichstromladung zur Folge hat. Dadurch können höhere Übertragungsleistungen erzielt werden, während der Aufbau der Sicherheitskomponenten gleichbleibt. Die Kommunikation zwischen EVSE und EV wird in der Norm ISO/IEC 15118 beschrieben, auf die im Kapitel 5.3.3 näher eingegangen wird.

Die Sicherheitsanforderungen erhöhen sich von Lademodus 1 bis 4, weshalb für eine AC-Ladung für halb-öffentliche und öffentliche Ladestationen, die Anforderungen von Lademodus 3 als dringend notwendig gelten. Lademodus 2 ist für privates Laden einsetzbar, sofern keine Ladung mit Lademodus 3 möglich ist. Der Einsatz des Lademodus 1 ist nur für Notladungen angedacht.

5.3. Kommunikationsschnittstellen

Kommunikationsprotokolle sind für die Verständigung zwischen EVSE und EV zuständig. Es werden wichtige Parameter für den Ladevorgang ausgetauscht, wobei sich momentan drei Protokolle unterscheiden lassen. Die unterschiedlichen Protokolle sorgen, ebenso wie die Variation der Ladestecker, für Schwierigkeiten beim Ladevorgang von EV, da nicht immer eine Kompatibilität gewährleistet ist.

Die unter der IEC-61851 genormte Kommunikation, ist die simpelste der drei Varianten und sollte von jedem EV und jeder EVSE verstanden werden können. Daher wird dieses Protokoll angewandt, falls die Teilnehmer des Ladesystems und das EV ein anderes Protokoll verwenden.

5.3.1. Bestimmung der Stromtragfähigkeit

Mittels des „Proximity Plugs“ wird die Stromtragfähigkeit des Ladekabels bestimmt. Dies ist notwendig falls kein fest-installiertes Ladekabel an die EVSE angeschlossen ist. Die Stromtragfähigkeit ist durch den Widerstand „ R_c “ des Ladekabels und des Steckers gekennzeichnet (Abbildung 5.6). Die EVSE ermittelt über das PP-Signal den Widerstandswert und bestimmt so die Stromtragfähigkeit, um eine Überlastung des Ladekabels auszuschließen [27].

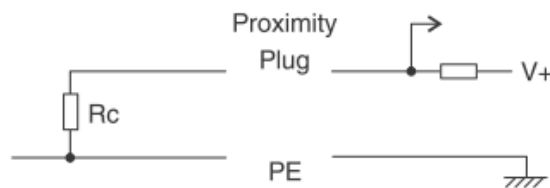


Abbildung 5.6.: Schema der Messung bei der "Proximity PlugAbfrage" [27]

Die Widerstandswerte sind nach der IEC-61851-1 genormt und in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Stromtragfähigkeit der Kabel ist definiert und an die Stromtragfähigkeit bestehender Netzsysteme angelehnt.

Widerstandswert R_c nach Norm	Widerstandswert gemessen	Resultierende Stromtragfähigkeit	Registerwert für Web-Oberfläche und Modbus
–	$< 75 \Omega$	Fehler	0xFFFF
100 Ω	75 Ω ... 150 Ω	63 (70) A	63
220 Ω	150 Ω ... 330 Ω	32 A	32
680 Ω	330 Ω ... 1000 Ω	20 A	20
1500 Ω	1000 Ω ... 2200 Ω	13 A	13
–	$> 2200 \Omega$	0 A	0

Abbildung 5.7.: Kodierung des zulässigen Stromes zum Widerstand nach IEC 61851-1 [27]

5.3.2. Kommunikation nach IEC-61851

Die Kommunikation des eigentlichen Ladevorgangs wird über den „Control Pilot-Pin“ durchgeführt. Die dabei genutzte analoge Kommunikation wird im Lademodus 2 bis 4 verwendet und besitzt 6 Verbindungszustände, welche über einen Spannungsbereich von 12 bis -12 Volt gegenüber der Erde reichen. Folgend sind die Zustände eines Elektrofahrzeugs aufgeführt, welches an einer Ladestation angeschlossen ist.

- Zustand A (12 V): Kein Elektrofahrzeug mit der Ladestation verbunden.
- Zustand B (9 V): Elektrofahrzeug ist angeschlossen, aber nicht bereit zum Laden.
- Zustand C (6 V): Elektrofahrzeug ist angeschlossen und bereit zum Laden. Eine Belüftung ist nicht erforderlich.
- Zustand D (3 V): Elektrofahrzeug ist angeschlossen und bereit zum Laden. Eine Belüftung ist erforderlich.
- Zustand E (0 V): Kurzschluss gegen Erde am Controller der Ladestation (Electric Vehicle Charge Control (EVCC)). Keine Spannungsversorgung.
- Zustand F(-12 V): Ladestation nicht verfügbar.

Neben der Bestimmung des Zustandes des EV wird der maximal erlaubte Ladestrom der EVSE mittels analoger Pulsweitenmodulation (PWM) übermittelt. Dieses Signal wird mit wechselnden Strom über den CP-Pin mit einem maximalen Spannungsbereich von 12 V bis -12 V und konstantem Tastverhältnis übertragen [33].

In Abbildung 5.8 ist die Kommunikation über das CP-Signal der EVSE und einem EV dargestellt. Dabei ist über die y-Achse die Spannung der verschiedenen Zustände und auf der x-Achse die Zeit des Ladevorgangs aufgetragen.

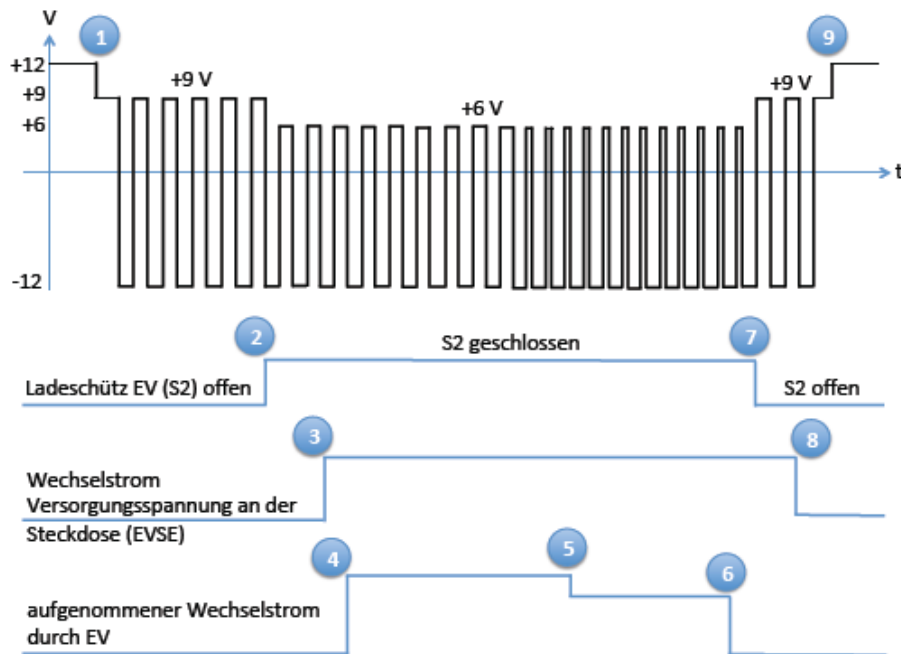


Abbildung 5.8.: Pulsweiten-Signal der Kommunikation eines Ladevorganges [33]

Bevor der Ladevorgang beginnt herrscht Zustand A, da kein EV an der EVSE angeschlossen ist. Die Spannung zwischen Control Pilot und Erde ist konstant +12 V. Wird nun ein EV an der EVSE angeschlossen (1) sinkt die Spannung auf +9 V. Die Spannungshöhe ergibt sich aus der Reihenschaltung des Widerstandes R_1 in der Ladesteuerung, des Widerstandes R_2 und der Diode D_1 im Fahrzeug bei einer anliegenden Spannung von +12 V (Abbildung 5.9). Der Zustand B lässt sich dabei in zwei Bereiche einteilen.

- Zustand B1 (DC 9 V): Die EVSE ist nicht bereit für den Ladevorgang.
- Zustand B2 (PWM 9 V): Die EVSE ist bereit für den Ladevorgang.

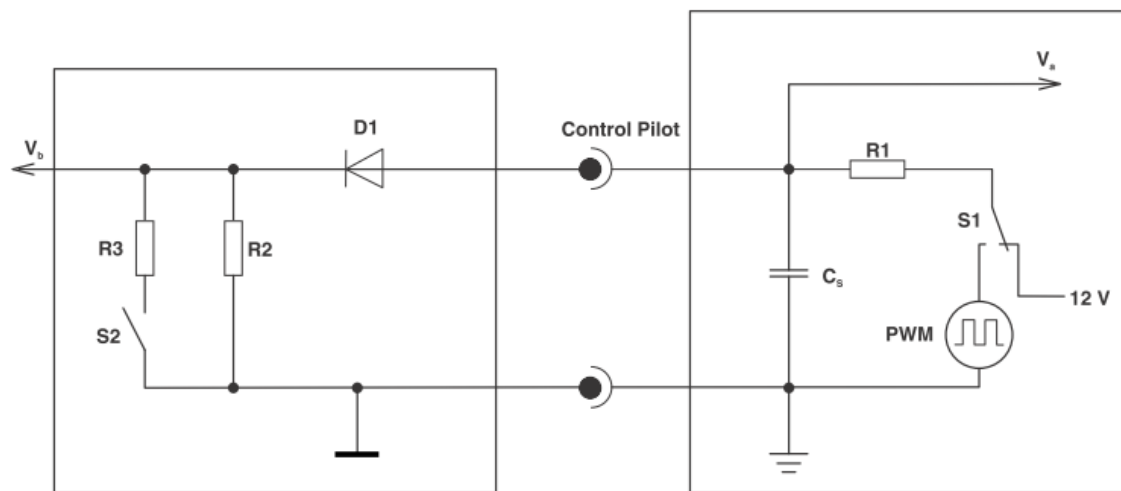


Abbildung 5.9.: Schaltplan einer Kopplung eines Elektromobils mit einer Ladestation nach IEC-61851 [27]

In dem Zustand B2 (S1 geschlossen) ist der Oszillator eingeschaltet, welcher mittels kodierter Pulsweite, den zulässigen Strom zum Laden des EV bestimmt. Die Spannung wechselt mit gleichbleibendem Tastgrad zwischen +9 V und -12 V. Erkennt der Laderegler des EV das PWM-Signal, wird die Nennleistung entsprechend angepasst und die Ladeschnittstelle fahrzeugseitig verriegelt. Anschließend wird das Ladeschütz S2 geschlossen und ein Widerstand R3 zu R2 parallelgeschaltet (2). Durch das Zuschalten des Widerstandes sinkt die Spannung auf +6 V bzw. +3 V. Wenn sich der Zustand C (+6 V) einstellt, wird keine Belüftung für den Ladevorgang benötigt. Bei Zustand D (+3 V) ist eine Ventilation gefordert. Ebenso verriegelt der netzzeitige Ladekontroller kurz nach Erreichen des Zustandes C oder D den Ladestecker und schließt den Stromkreis (3). Das EV wird mit Nennleistung geladen (4). Während des Ladevorganges kann die Ladeleistung ohne Unterbrechung variiert werden, was sich in dem Tastverhältnis widerspiegelt (5). Soll der Ladevorgang beendet werden, muss dies über einen Impuls des EV oder der EVSE kommen. Wird das Beenden des Ladevorgangs durch das EV eingeleitet (6), öffnet der fahrzeugseitige Ladekontroller S2 wieder (7) und das Spannungsniveau wird auf +9 V gehoben, was dem Zustand 2 entspricht. Erkennt der Ladekontroller der EVSE, dass der Zustand 2 wieder erreicht ist, wird S1 geöffnet, wodurch keine Spannung mehr an den Schnittstellen anliegt und die Verriegelung freigegeben wird. Sobald das Ladekabel entfernt ist, erreicht die EVSE wieder den Zustand A bei konstanten +12 V an CP [33].

Wird der Ladevorgang über die EVSE beendet, kann das Tastverhältnis angepasst werden, sodass der Ladekontroller des EV den Ladeschütz S2 schließt. Dadurch kann, sowohl vom EV, als auch vom EVSE der Ladevorgang beendet werden.

Das Tastverhältnis wird genau in der IEC-61851 festgelegt. Es muss ein Tastverhältnis von 5 Prozent verwendet werden, damit der CP eine digitale Kommunikation mit dem Controller des EV herstellen kann. Abbildung 5.10 stellt die Bereiche der zulässigen Tastverhältnisse dar.

Auswertung der Nenntastverhältnisse durch das Fahrzeug	Maximaler Strom, der vom Fahrzeug entnommen werden darf
Tastverhältnis < 3 %	Ladevorgang ist nicht erlaubt
$3 \% \leq \text{Tastverhältnis} \leq 7 \%$	Zeigt an, dass die digitale Kommunikation benutzt wird, um ein Gleichspannungsladegerät außerhalb des Fahrzeugs zu steuern oder um den verfügbaren Stromwert an ein Ladegerät innerhalb des Fahrzeugs zu übermitteln. Die digitale Kommunikation kann auch mit anderen Tastverhältnissen verwendet werden. Der Ladevorgang ist nur mit digitaler Kommunikation erlaubt. 5 % Tastverhältnis sollte benutzt werden, wenn die Pilot-Leitung für die digitale Kommunikation benutzt wird.
$7 \% < \text{Tastverhältnis} < 8 \%$	Ladevorgang ist nicht erlaubt
$8 \% \leq \text{Tastverhältnis} < 10 \%$	6 A
$10 \% \leq \text{Tastverhältnis} \leq 85 \%$	Verfügbarer Strom = (% Tastverhältnis) x 0,6 A
$85 \% < \text{Tastverhältnis} \leq 96 \%$	Verfügbarer Strom = (% Tastverhältnis - 64) x 2,5 A
$96 \% < \text{Tastverhältnis} \leq 97 \%$	80 A
Tastverhältnis > 97 %	Ladevorgang ist nicht erlaubt

Abbildung 5.10.: Tastverhältnis der Pulsweitenmodulation für die Ladestromvorgabe nach IEC-61851 [27]

Es ist zu erkennen, dass unter einem Tastverhältnis von 3 Prozent und zwischen 7 Prozent bis 8 Prozent kein Ladevorgang erlaubt ist. Das Mindest-Tastverhältnis und somit der einphasige Mindest-Ladestrom liegen bei 8 Prozent beziehungsweise 6 A. Das bedeutet, dass laut IEC-61851 keine Ladestromvorgabe unter 6 A durch den Ladekontroller möglich ist. Daraus ergibt sich bei einer einphasigen AC-Ladung mit 230 V eine Mindest-Ladeleistung von 1380 W. Der Ladestrom für einen Tastbereich zwischen 10 Prozent und 85 Prozent, ist das Tastverhältnis, multipliziert mit einer Stromstärke von 0,6 A. Für das Tastverhältnis von 85 Prozent bis 96 Prozent, wird von dem Tastverhältnis 64 subtrahiert und die Differenz mit einer Stromstärke von 2,5 V multipliziert. Die maximale einphasige Stromstärke darf nach der IEC-61851 80 A nicht überschreiten. Im europäischen Dreiphasennetz ist dies ebenso durch die IEC-61851 auf 63 A beschränkt [33]. Sobald ein Tastverhältnis von 97 Prozent überschritten wird, wird der Ladevorgang abgebrochen, da dieser Bereich nicht zulässig ist [27].

5.3.3. Kommunikation nach ISO/IEC-15118

Der Standard der ISO/IEC-15118 beschreibt die Kommunikation des Ladevorgangs eines EV mit einer EVSE. Dieser Standard gilt vor allem in Europa für das bidirektionale Laden eines EV. In den USA kommt der Standard der „Society of Automotive“ (SAE) und in Japan das Protokoll „CHAde-

MO“ zum Einsatz [34]. Die ISO/IEC-15118 beinhaltet insgesamt 8 Teile [35] mit dem Titel: „Road vehicles – Vehicle to grid communication interface“ [35], wobei der Ausdruck „Vehicle to grid“ für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation steht und keine Kommunikation zwischen einem Elektrofahrtauto und einem elektrischen Netz beinhaltet. Das Protokoll der ISO/IEC-15118 soll dahingehend eine benutzerfreundliche Handhabung zur Authentifizierung, Autorisierung, Abrechnung und flexible Lastkontrolle ermöglichen.

Das Schema der Kommunikation basiert auf dem Client-Server-Prinzip. Bei einem Ladevorgang wird von dem EV (Client) Anfragen gesendet, worauf die EVSE (Server) innerhalb eines definierten Timeouts antwortet [26]. Ist dies nicht der Fall, wird der Ladevorgang abgebrochen, kann jedoch durch den Client wieder eingeleitet werden. Zu Beginn des Ladevorgangs werden neben der Definition der Protokollversion unter anderem Parameter zur Authentifizierung, Autorisierung und Bezahlmethode, sowie laderelevante Parameter wie der benötigten Energiemenge, Ladestromlimits und vorgegebene Abfahrtszeit durch den Nutzer ausgetauscht. Diese Daten können standardmäßig über den sogenannten „Plug-and-Charge-Mechanismus“ übermittelt werden, was den Nutzerkomfort und die Akzeptanz deutlich steigert.

Die Kommunikationsmethode der IEC-61851 ist in der ISO/IEC-15118 fortgeführt und ergänzt die analoge Kommunikation durch ein digitales Protokoll. Begonnen wird die Kommunikation zwischen dem EV und der EVSE durch ein PWM-Signal mit einem Tastverhältnis von 5 Prozent über den CP-Pin [33]. Dieses Tastverhältnis wird gewählt, da der Ladestrom bei diesem zu gering für eine effiziente Energieübertragung wäre. Ebenso wird für die Kommunikation eine Powerline basierte Verbindung genutzt, welche durch 7 Schichten aufgebaut ist. Dabei dienen die untersten beiden Schichten zur Herstellung der Verbindung zwischen EV und EVSE. Über die übrigen Schichten findet die eigentliche Kommunikation statt. Sie beinhalten Daten wie Ladeleistungslimits, Abfahrtszeiten und Abrechnungsvorgang. Die Daten der Layer 3 bis 7 werden mittels des Internetprotokolls (IP) übertragen, welches in der Lage ist die Datenpakete durch „User Datagram Protocol“ (UDP), „Transmission Control Protocol“ (TCP) oder „Transport Layer Security“ (TLS) Kanal zu übermitteln [33].

5.3.4. Open Charge Point Protocol

Das „Open Charge Point Protocol“ (OCPP), beziehungsweise „Freier Ladepunkt Kommunikationsstandard“, ist ein Kommunikationsprotokoll für den Ladevorgang von Elektrofahrzeugen, welches von der E-Laad Stiftung in den Niederlanden entwickelt wurde und mittlerweile durch die „Open Charge Alliance“ (OCA) fortgeführt wird. Dieses Konsortium bestehend aus niederländischen Netzbetreibern, verfolgt das Ziel der Entwicklung einer einheitlichen Schnittstelle. Dabei sind viele Parameter für die Ladesteuerung aus der ISO/IEC-15118 übernommen worden, wodurch es kompatibel zu dem Protokoll der ISO/IEC 15118 ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die aktuelle Version „OCPP 2.0“ des

universellen Kommunikationsprotokolls frei zu erwerben ist. Daher ist die Verwendung des OCPP Protokolls besonders für Betreiber von Ladestation-Infrastrukturen attraktiv, da eine Kombination von Ladestationen verschiedener Betreiber möglich ist und keine Abhängigkeit von einzelnen Lieferanten mehr besteht [33].

Für das weitere Verständnis dieser Arbeit sind die Kommunikationsprotokolle der ISO/IEC-15118 und der OCPP nicht relevant, da das Kommunikationsprotokoll auf die ISO-61851 wegen der Systemkomponenten beschränkt ist. Dies ist sowohl durch Kommunikation zu dem Ladekontroller der bestehenden Wallboxen, als auch durch die aktuell stationierten Elektrofahrzeuge des Carsharing-Betriebes limitiert, da diese keinen integrierten, kommunikationsfähigen Board-Computer haben, welcher für die Kommunikation der ISO/IEC-15118 und OCPP benötigt werden [36].

5.3.5. Erfassung der Daten der Elektrofahrzeuge

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben ist ein Auslesen der Fahrzeugdaten durch eine Kommunikation mit den Board-Computern der derzeit vom Carsharing-Unternehmen bereitgestellten Elektrofahrzeuge nicht gegeben. Dadurch können keine Daten des Zustandes des Fahrzeugs ermittelt werden, welche für einige Ladeszenarien von Wichtigkeit sind. Dazu gehören vor allem der Ladezustand des Fahrzeuges und die An- und Abfahrzeiten der gebuchten Fahrzeuge. Mittels dieser Daten könnte ein optimierter Ladeplaner der Elektrofahrzeuge erstellt werden, welcher ebenso eine Prognose der PV-Anlage mit berücksichtigt.

Da die Erfassung des Ladezustandes, der Kilometerstand und die An- und Abfahrzeiten auch wichtig für das Carsharing-Unternehmen ist, wurde eine Schnittstellenkomponente eingeführt, damit ein Abbuchungssystem möglich ist. Dabei handelt es sich um einen Speicherchip am Schlüsselbund des Fahrzeuges, welcher, über eine Schnittstelle im Fahrzeug, die Zustandsdaten des Fahrzeugs per Bluetooth empfängt. Bei Buchung eines Fahrzeugs sind die Daten des Zustandes zum Zeitpunkt des Fahrtantrittes hinterlegt. Nach Beenden der Fahrt wird der Schlüssel an einen Tresor zurückgebracht, wobei die Daten auf den Speicherchip übertragen und an das Unternehmen des Schnittstellenbetreibers gesendet werden. Diese Daten können mittels einer Programmierschnittstelle (API) für die Fahrzeuge angefordert werden [37].

6. Erstellung eines Lastmanagementsystems

In diesem Kapitel wird die theoretische und praktische Umsetzung des Lastmanagementsystems erläutert. Dabei wird auf die auf die Hardwarekomponenten des Bestandsgebäudes und des Lademanagementsystems eingegangen, welche die Basis und Limitierung des Systems beschreiben. Weitergehend werden das Erfassen der Daten und deren Messverfahren beschrieben, die für das Managementsystem benötigt werden. Anschließend werden die Regelungsverfahren des Lademanagementsystems und der Implementierung in das Bestandsgebäude erklärt.

6.1. Beschreibung des Gebäudes

Das Objekt, welches in dieser Arbeit behandelt wird, ist ein Mehrfamilien-Bestandshaus mit insgesamt 74 Wohneinheiten. Die Wohneinheiten teilen sich auf mehrere Geschosse auf, wobei ein Keller und Tiefgaragenbereich in dem Objekt vorhanden sind. Zu jeder Wohneinheit befindet sich ein Bereich im Keller, in dem weitere Verbraucher angeschlossen werden können. Die Tiefgarage besitzt insgesamt 39 Stellplätze. An drei dieser Stellplätze befinden sich Wallboxen mit einer maximalen Leistung von 22 kW. Einer dieser Stellplätze ist von einem Parksharing-Unternehmen und die anderen zwei gehören zu einem Carsharing Betrieb.

Auf lange Sicht sollen alle Stellplätze der Tiefgarage mit einer Ladestation ausgerüstet werden. Dieser Ausbau wird in mehreren Phasen durchgeführt, dessen genaue Ausführung, zu diesem Stand des Projektes, noch nicht geplant ist. Fest steht, dass in der nächsten Phase des Projektes, ein Ausbau von rund 30 Prozent der Stellplätze mit Ladestationen realisiert wird. Dies erhöht die maximale Last der Verbraucher enorm. Bei einer vollständigen Aufrüstung der Stellplätze mit Ladestationen wird sich schätzungsweise der jährliche Strombezug verdoppeln¹² [38]. Dabei würde sich die maximale Leistung am Hausanschluss verfünffachen³. Dies entspricht nicht dem Auslegungsfall des Hausanschlusses, da in der Planung nur die Verbraucher der Wohneinheiten einbezogen wurden. Daher wäre

¹Durchschnittlicher Energieverbrauch pro Wohneinheit: 2.000 kWh/a

²Durchschnittliche Fahrleistung Elektrofahrzeug: 10.000 km/a; Durchschnittlicher Verbrauch Elektrofahrzeug: 20 kWh/100 km; jährlicher Energieverbrauch: 10.000 km/a * 20 kWh/100 km = 2.000 kWh/a

³Annahme eines Ausbaus mit Ladestationen mit einer Mindestleistung von 11 kW

in einem Szenario ohne Lastmanagementsystem eine Überlastung und Auslösen der Sicherungen am Hausanschluss und der Niederspannungshauptverteilung sehr wahrscheinlich.

6.1.1. Aufbau des Gebäudes

In Abbildung 6.1 ist ein Teil des Strombaumes des Gebäudes aufgezeigt. Dieser umfasst die Sicherungen des Hausanschlusses und der Hauptverteilung, bis hin zu den einzelnen Absicherungen der Wohnungsverteiler. Dabei sind die Abgänge chronologisch von oben nach unten und von links nach rechts aufgezeigt und nummeriert dargestellt. Die Darstellung des Verlaufs des Strombaumes ist schematisch dargestellt, weißt jedoch in Realität ein dreiphasiges Verteilersystem auf. Die Strangsicherungen sind als Kästchen dargestellt und geben den maximalen zulässigen Strom der Sicherungen an. An dem Hausanschluss und den Abzweigungen der Zähleranlage 1 und 3 der Niederspannungshauptverteilung werden Messungen mittels Stromwandler durchgeführt, damit die Daten an diesen signifikanten Stellen aktuell und mit einer hohen Auflösung vorliegen.

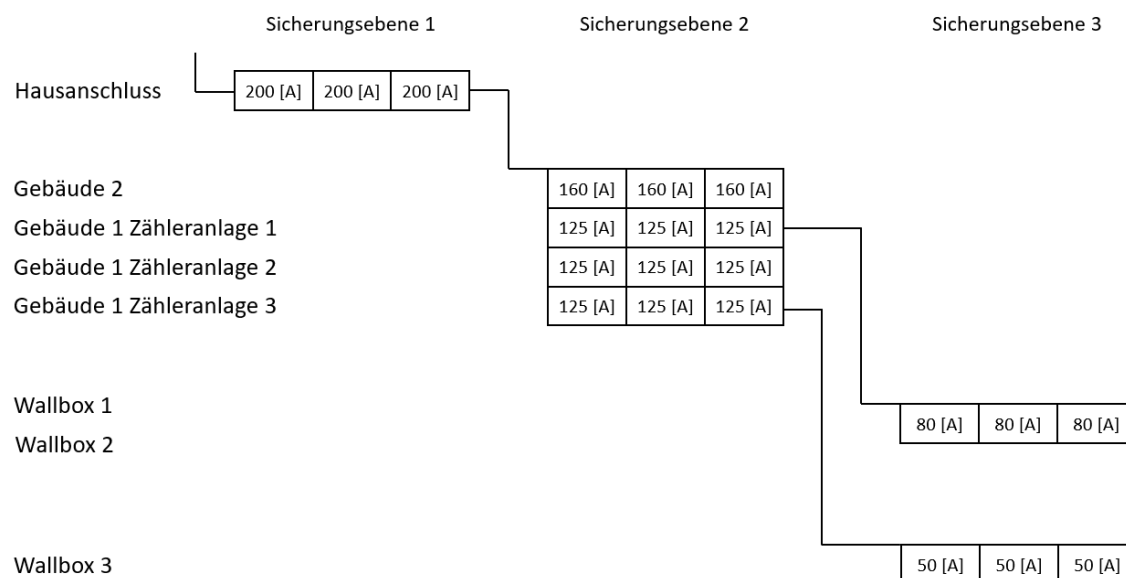


Abbildung 6.1.: Systematischer Aufbau des Strombaumes des Bestands-Gebäudes [38]

Zu Anfang ist der Hausanschlusskasten dargestellt, der mit dem öffentlichen Netz verbunden ist. Dieser ist mit 200 A pro Phase gesichert und bildet die kritischste Absicherung, da ein Auslösen dessen, neben einem hohen Aufwand der Wiederinstandsetzung, da dieser verplombt ist, auch ein Blackout des Gebäudes bedeutet. Daher gilt die höchste Priorität, ein Auslösen der Sicherungen des Hausanschlusskastens zu vermeiden.

Von dem Hausanschlusskasten gehen vier Abgänge zu der Niederspannungshauptverteilung (NSHV) ab. Diese lassen sich in zwei Bereiche einteilen, da das Gebäude aus zwei getrennten Gebäudebereichen besteht. Der Bereich in dem die Tiefgarage und die Ladestationen positioniert sind, teilt sich in drei Zähleranlagen auf, die jeweils mit 125 A pro Phase gesichert sind. Der vierte Abzweig versorgt den zweiten Wohnbereich und ist im Strombaum nicht weiter aufgeführt. Dieser ist mit 160 A für den ganzen Bereich abgesichert. Insgesamt wäre Strombezug von 535 A pro Phase möglich, ohne dass die Sicherungen der Niederspannungshauptverteilung auslösen würden [38]. In diesem Fall würden die Sicherungen am Hausanschlusskasten auslösen, was jedoch prioritär zu vermeiden ist. Dies würde ebenso bei einem maximalen Strombezug zweier Verteilstränge oder der Hälfte des maximalen Strombezuges aller Verteilstränge auftreten. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass dieses Fall praktisch nicht eintritt, da das Auftreten der Gleichzeitigkeit der Last auf mehreren Phasen sehr unwahrscheinlich ist. Beschrieben sind die Auslegung der Sicherungen und der Gleichzeitigkeitsfaktor in der Norm VDE-0100 [21].

Von der Niederspannungshauptverteilung gehen die drei Zähleranlagen ab. An jeder Zähleranlagen sind etwa 20 Wohnungszähler angeschlossen, welche mit einer Sicherung gegen Ströme über 35 A abgesichert sind [38]. Diese sind für die Sicherungen der einzelnen Wohnungen zuständig, wobei ein Auslösen der Sicherung nur Auswirkung auf diese Wohnung hat. Neben den Wohnungssicherungen, werden in dieser Sicherungsebene, auch die Ladestationen der Tiefgarage gegen Überströme abgesichert. Die Sicherung einer Wallbox ist gegen Überströme von 50 A und zweier gegen Überströme von 80 A abgesichert, wobei jeweils in den Wallboxen eine weitere 32 A Sicherung angebracht ist. Dies entspricht einer maximalen dreiphasigen Belastung von 22 kW, welche über die Ladestationen bezogen werden können [38]. Summiert bilden die Wohnungs- und Ladestationssicherungen der Zähleranlage 1 einen zulässigen Strom von 96 A, der Zähleranlage 2 von 182 A, von Zähleranlage 3 96 A und einen zulässigen Gesamtstrom von 374 A pro Phase. Zusammen mit der Absicherung des zweiten Wohnbereichs wird ein zulässiger Strom von 534 A erreicht [38]. Dies übersteigt den zulässigen Strom des Hausanschlusskastens. Erfahrungsmäßig zeigt jedoch der Gleichzeitigkeitsfaktor, dass ein gleichzeitiger maximaler Bezug des Stromes aller Hausteilnehmer gering ist.

Aus dem Strombaum ergeben sich die kritischen Stellen des Systems. Es handelt sich dabei vor allem um die Sicherungen des Hausanschlusskastens und die der Niederspannungshauptverteilung. Bei der NSHV sind gesondert die Zähleranlage 1 und 3 betroffen, da an diesen die Ladestationen anliegen. Das ist der Grund, weshalb an diesen Stellen Stromwandlermessungen durchgeführt werden, damit bei hoher Last eine Reaktion des Lastmanagements ohne Verzögerung geschehen kann. Die Strombelastung des zweiten Bereiches mit der 160 A wird durch die Messdaten der anderen Abzweigungen errechnet. Der Strombezug des zweiten Gebäudebereiches und der Zähleranlage 1 und 3 werden von dem Messwert des Hausanschlusses abgezogen und ergibt den Strombezug der Zähleranlage 2 der Niederspannungshauptverteilung. Für die Messung des Strombezuges der Wohnungen ist keine

Stromwandlermessung vorgesehen, da dies zum einen wirtschaftlich nicht tragbar ist, zum anderen eine Verkabelung der Hardware nicht umsetzbar ist.

Der Verbrauch der Wohneinheiten wird mittels der Smartmeter erfasst und den Leitungszweigen zugeordnet werden. Die Smartmeter befinden sich in einem Technikraum des Gebäudes, in dem auch die Hardware des Lastmanagementsystems installiert ist. Diese messen den Leistungsbezug jeder Wohnung in einem definierten Intervall. Aus diesen Daten wird der Strombezug errechnet werden und ausgewertet.

6.2. Funktionsweise des Lastmanagementsystems

Ein Lastmanagementsystem ist eine Steuerung von Verbrauchern in einem System. Dies wird einerseits zur Kostenoptimierung eingesetzt, wobei der Verbrauch bei hohen Stromkosten reduziert und bei geringen Strombezugskosten hochgeregelt wird. Dadurch kann ein energetisches System wirtschaftlicher betrieben werden und die Energiekosten signifikant reduziert. Andererseits ist eine Regelung der Energieströme sehr bedeutend, da einer Auslastung des Systems oder Überlastung kritischer Bauteile vorgebeugt werden kann. Die aktive Steuerung des Verbrauchs in einem System wird auch „Demand-Side-Management“ (DSM) genannt. Dabei wird gezielt eine Reduzierung, Erhöhung oder Verschiebung die Lastkurven beeinflusst [8, S.149ff] . Dies gilt nur für die Verbraucher des Systems, da die energetische Erzeugung als gegeben angesehen wird.

In dem Lastmanagement, welches in dieser Arbeit behandelt wird, werden dabei bestimmte Eingangsgrößen gemessen und eine Regelung der Lasten durchgeführt. Die Messungen befinden sich an mehreren signifikanten Stellen, um eine möglichst umfassende und präzise Aufnahme von Messwerten zu erhalten. Dies wird benötigt, wenn der Verbrauch des Systems geregelt werden muss, damit ein weiterer Betrieb gegeben ist. Dabei werden vor allem energetische Lasten in ihrer Leistung geregelt oder gesteuert, sodass die Erzeugung und der Verbrauch gleich sind.

Die Erzeugung besteht aus einem statischen und dynamischen Teil. Der statische Teil ist der elektrische Hausanschluss, welcher hauptsächlich die elektrische Versorgung garantiert. Die flexible Größe der Erzeugung ist die hauseigene Photovoltaikanlage, welche fluktuierend Strom erzeugt, was einerseits den Hausanschluss entlasten, andererseits jedoch eine Schiefast der Phasen hervorrufen kann.

Der Verbrauch des Objektes besteht aus mehreren Teilnehmern. Dieser wird in regelbare und nicht regelbare Verbraucher unterteilt. Die nicht regelbaren Verbraucher sind die energetischen Lasten der einzelnen Wohnungen und der gewerblichen Einrichtungen. Dessen Betrieb soll uneingeschränkt und prioritär sein. Hingegen sind die regelbaren Verbraucher vollständig flexibel, wobei ein Betrieb in

Vollast bis zu einem Ausschalten möglich ist. Diese Lasten sind die Wollboxen beziehungsweise die Elektroautos, welche mittels der Ladestationen geladen werden.

Abbildung 6.2 stellt systematisch den Aufbau des Lastmanagements dar. Die Leistungsdaten der nichtregelbaren Lasten werden gemessen und an die SPS übermittelt. Zusammen mit den Daten der Wallboxen, welche über Modbus TCP übertragen werden, wird das Lastprofil des Gebäudes erzeugt. Diese Daten werden durch das Lademanagement ausgewertet und eine Regelung der Ladeleistung der Wallboxen über Modbus durchgeführt.

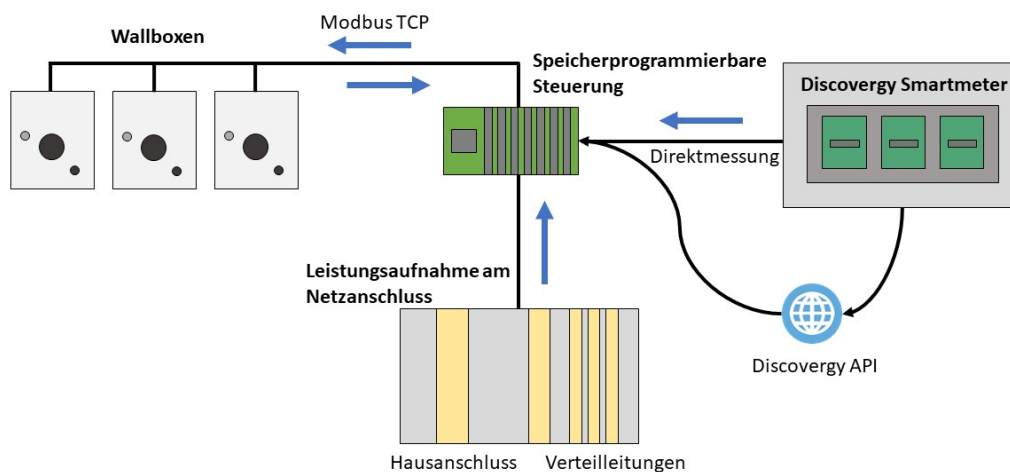


Abbildung 6.2.: Systematischer Aufbau des Lademanagementsystems [23]

6.2.1. Bauteile des Lastmanagementsystems

Die Komponenten des Lastmanagements bilden die Basis zur Messung und Regelung der Gebäude-lasten. Diese müssen an das bestehende Netz und die Topologie der Bauteile angepasst werden, sodass eine qualitative Mess- und Regelung des Managementsystems möglich ist. Folgen werden eingegliederten Bauteile des Lademanagementsystems erläutert.

Speicherprogrammierbare Steuerung

Eine speicherprogrammierbare Steuerung oder auch „Programmable Logic Controller“ (PLC) ist ein Bauteil, welches in der Automatisierungstechnik eingesetzt wird. Der Einsatz reicht von kleinen Automatisierungen, wie das zeitliche Schalten von Rollläden im Eigenheim, über den Einsatz auf See, bis zur Steuerung und Regelung von Industrieanlagen [39]. Dabei können die Anwenderprogramme über Digitale Ein- und Ausgänge, einer Schnittstelle über RS485 oder über Modbus RTU/UDP ihre Ein- und Ausgabeparameter erhalten [40]. Um diese Funktionen bereitzustellen, sind meist modulare Lösungen verbreitet, bei denen die SPS aus Steckmodulen zusammengesetzt wird. Das Betriebssystem kann je nach Hersteller variieren, jedoch kann stets per Update die Firmware aktuell gehalten werden.

Die Verbreitung der speicherprogrammierbaren Steuerungen ist sehr groß, da diese viele Vorteile bieten. Zum einen sind diese sehr Beständig und nicht für Verschleiß anfällig, was Sie auf langjährige Sicht zuverlässig macht. Hinzu kommt, dass Sie durch die modulare Lösung flexibel einsetzbar sind und für verschiedene Anwendungen angepasst werden können. Ebenso sind komplexe Programme möglich, die durch eine Anbindung ans Wide Area Network (WAN), per Fernwartung überwacht und eine schnelle Fehleranalyse oder Programmanpassung durchgeführt werden kann [41].

Programmierungssoftware e!cockpit

Die Software „e!cockpit“ der Firma Wago Kontakttechnik GmbH ist ein Programm zur Automatisierung von Maschinen und Anlagen [42]. Es basiert auf der Entwicklungsumgebung „CoDeSys“ (Controller Development System) der 3ten Version, welches speziell für Anwendungen der Automatisierung mit speicherprogrammierbaren Steuerungen entwickelt wurde. Die Programmierung erfolgt nach der Norm EN-61131, welche der Standard für speicherprogrammierbare Steuerungen ist [43]. Besonderheiten der Software „e!cockpit“ beziehungsweise „CoDeSys“ ist, dass diese mit einer sich wiederholenden „Runtime“ arbeiten [39]. Das bedeutet, dass Programme nach einer bestimmten Intervallzeit auf ihren Status überprüft oder gestartet werden. Die Intervallzeit wird je nach Arbeitszeit und Wichtigkeit abgefragt und liegt meist im Bereich von Millisekunden bis Sekunden [44], kann jedoch auch im Mikrosekundenbereich liegen. Wird ein Programm gestartet, arbeitet die SPS die Aufgaben, auch Tasks genannt, ab [44], bis die Intervallzeit abgelaufen ist. Ist noch kein Ergebnis oder eine Rückmeldung vorhanden, wird das Intervall erneut gestartet und nach Ablauf erneut der Status erfasst. Überschneiden sich zwei Programme bei deren Abfrage, wird zuerst das Programm mit der höheren Wichtigkeit, auch Priorität genannt, abgearbeitet. Auf diese Art müssen keine zusätzlichen Schleifen programmiert werden. Es ist auch möglich Ereignisgesteuerte oder Externe Abfragen auszuführen, dies ist jedoch eher untypisch, da dies ein manuelles Steuern eines Drittens erfordert, was bei der Automatisierung unerwünscht ist.

Die Automatisierung durch eine speicherprogrammierbare Steuerung wird durch mehrere Programme ausgeführt, welche abhängig oder unabhängig voneinander arbeiten. Diese sind sozusagen die Aufgaben, welche von den Tasks aufgerufen und von der SPS abgearbeitet werden. Dabei ist es vorteilhaft Programme möglichst simple zu halten und Aufgaben auf mehrere Programme zu verteilen, da dadurch die Intervallzeit klein gehalten werden kann und es der Übersicht hilft. Für komplexe Operationen können Programme durch andere Programme aufgerufen und gestartet werden, um so Parameter weiterzuverarbeiten. Für oft verwendete Aufgaben können Funktionen verwendet werden. Der Vorteil von Bausteinen ist, dass diese nicht an eine Intervallzeit gebunden sind und von mehreren Programmen gleichzeitig verwendet werden können. Es wird dabei in Funktionen und Funktionsbausteine unterschieden. Der Unterschied ist, dass Funktionen, nachdem ihr Ergebnis an das Programm übergeben wurde, ihre Variablen auf den Anfangszustand zurücksetzen. Die Variablen von Funktionsbausteinen hingegen behalten den Wert und können bei einem erneuten Aufruf weiterverwendet werden [39].

Die Programme der SPS werden nach der Norm EN-61131 erstellt. Diese enthält mehrere Programmiersprachen, die Vor- und Nachteile für verschiedene Anwendungsfälle haben.

Dabei handelt es sich zum einen um die **Anweisungsliste (AWL)**, dessen Anwendung hauptsächlich logische Verknüpfungen von Steuerungseingängen und -ausgängen ist. Die digitalen/analoge Eingänge werden in das Arbeitsregister der SPS geladen und mit anderen Eingängen, Konstanten oder Variablen weiterverarbeitet und an die Ausgänge weitergegeben. Der **Kontaktplan (KOP)** ist eine graphische Programmiersprache, welche für logische Anwendungen oder Verknüpfungssteuerungen geeignet ist. Dessen Erscheinen ähnelt einem Schaltplan. Die **Ablaufsprache (AS)** besteht aus Schrittketten, wobei pro Schritt eine bestimmte Aktion abläuft und ein Ausgang der Steuerung (Aktor) gesetzt wird. Zwischen den Schritten befinden sich sogenannte Transitionen, welche eine Bedingung darstellen. Wird diese Bedingung durch den vorherigen Schritt erfüllt, löst die Transition über einen Signalwechsel aus und aktiviert den nächsten Schritt der Kette. Der **Funktionsplan (FUP)** ist eine grafisch orientierte Programmiersprache, in der logische Symbole, Funktionen und Funktionsblöcke verwendet werden. Diese ist für die Verknüpfungssteuerung geeignet, da die Ein- und Ausgänge der Operanden optisch und logisch miteinander verbunden werden. Zuletzt kommt der **strukturierte Text (ST)**, dessen Aufbau der gängigen Hochsprachen ähnelt. Der strukturierte Text bietet die größte Flexibilität der Programmiersprachen der EN-61131 und es lassen sich komplexe Algorithmen und Funktionen darstellen. Ebenso wie bei den Funktionsplan lassen sich Funktionen und Funktionsblöcke darstellen, was von Vorteil ist, da von Herstellern oft standardisierte Bibliotheken bereitgestellt werden. Neben den Programmiersprachen der EN-61131 gibt es noch die **Continuous Function Chart (CFC)**, welcher ebenso eine graphisch basierte Programmiersprache ist. Sie ähnelt sehr dem Funktionsplan, unterscheidet sich jedoch in der Hinsicht, dass keine optische Verknüpfung stattfindet. Die Reihenfolge der Abarbeitung der einzelnen Funktionen wird durch eine Nummerie-

rung festgelegt. Der CFC dient zur Visualisierung und Übersicht von mehreren Programmen, da die einzelnen Funktionen oft in anderen Programmiersprachen geschrieben sind [41].

Erfassung der Daten über Smartmeter

Für die Erfassung des Stromverbrauchs in dem Objekt sind intelligente Stromzähler (Smartmeter) verbaut. Diese ersetzen die elektromagnetischen Ferraris Stromzähler und werden mittlerweile standardmäßig verbaut. Der Vorteil der Smartmeter gegenüber der Ferraris Stromzähler ist einerseits, dass keine mechanische, sondern eine digitale Messung stattfindet. Andererseits verfügen die digitalen Zähler über ein Kommunikations-Gateway, welches gemessene Daten an den Messstellenbetreiber sendet. Ein Effekt davon ist, dass ein manuelles Ablesen des Zählers wegfällt. Ebenso können die Daten den Kunden offen dargelegt werden, was zu einer erhöhten Transparenz führt, da Sie ihr Verbrauchsverhalten genau einsehen können. Das Wesentliche ist jedoch, die Kommunikationsfähigkeit mit anderen intelligenten Geräten, was ein „Smart Grid“ ermöglicht. So kann zum Beispiel der aktuelle Stromtarif erfasst und Geräte dementsprechend zu- oder abgeschaltet werden. Diese Steuerung von Lasten minimiert nicht nur die Stromkosten, sondern ist in Zukunft auch wichtig bei der Stabilisierung des Netzes bei fluktuierenden Energieerzeugern.

Die verbauten Smartmeter sind Standardlastprofil-Zähler (SLP) von dem Unternehmen Discovery GmbH. Sie messen den Energieverbrauch mit einer Tastrate von 2 Sekunden. Diese werden über das „Smartmeter Gateway“, oder auch „Meteroit“, zu der Firmeneigenen Datenbank übertragen, wo diese weiterverarbeitet werden. Der Meteroit sendet die Daten mit einer „Secure Sockets Layer“ (SSL) Verschlüsselung wahlweise über LAN, Powerline oder GSM. Gleichermaßen ist eine lokale Vernetzung über Modbus oder per RS-485 möglich [45].

Erfassen der Daten über die Discovery API

Die gemessenen Energiedaten der Smartmeter sind für den Kunden im Discovery-Portal einsehbar. Neben der „Live-Messung“ der aktuell bezogenen elektrischen Leistung, können auch historische Daten betrachtet werden. Dabei kann für jeden Smartmeter der elektrische Leistungsbezug pro Phase angezeigt werden.

Sollen die Leistungsdaten weiterverarbeitet werden, so ist eine Anforderung über eine „API“ möglich. Der Begriff „API“ steht für „Application Programming Interface“ (Programmierschnittstelle) und dient zur Anbindung von Softwaresystemen ohne diese direkt abzufragen. Damit können Inhalte sicher von Webseiten oder Programmen ausgetauscht oder an Dritte weitergegeben werden. Der Austausch der Daten findet meist in Form von standardisierten Datenformaten statt, damit eine reibungslose Weiterverarbeitung möglich ist [46].

Discovery bietet zwei Programmierschnittstellen die Smartmeter Daten anzufordern. Zum einen über die Anfragemethode „HTTP-Get“ [47]. Bei dieser Methode werden die Daten über eine URL (Uniform Resource Locator) angefordert.

Die Basis stellt dabei die Adresse „<https://api.discovery.com/public/v1>“ dar und wird bei jeder Anfrage benötigt [48]. Angehängen ist der eigentliche Befehl, welcher für verschiedene Datensätze variiert. Dabei können sowohl tägliche, wöchentliche, monatliche oder jährliche Datensätze, als auch aktuelle Leistungen oder Lastprofile abgefragt werden. Für jeden Befehl werden zusätzliche Eingabeparameter benötigt. Zum Beispiel wird bei der Abfrage der gemessenen Leistung einer bestimmten Woche, das Jahr und die Kalenderwoche benötigt. Weitergehend wird der Identifikator des Smartmeters benötigt, der eine eindeutige Kennung des Gerätes ist. Darüber hinaus ist der Benutzername und das Kennwort des Kunden in der URL anzuhängen. Dies ist ein datenschutzrechtliches Risiko für den Nutzer, da bei einem Abfangen der Anfrage an das Discovery Portal dessen Benutzernamen und Kennwort abzulesen und die Verbrauchsdaten leicht einzusehen sind.

Die zweite Anfragemethode stellt den Zugang zu den Daten via „Representational State Transfer“ (REST) API bereit [49]. Diese unterscheidet sich durch die Struktur der Anfrage. Die Parameter werden nicht in der URL angegeben, sondern in den „HTTP-Header“.

Dadurch sind die Anfragen sicherer, da bei einem Abfangen der Anfrage durch Dritte, nur die Basis-URL (<https://api.discovery.com/public/v1>) angezeigt wird und die Daten des Nutzers geschützt sind [49]. Weitergehend wird für die Authentifizierung das „OAuth 1.0“ Protokoll verwendet. Damit kann der Zugriff auf Daten des Benutzers, welche auf einem Server gespeichert sind, einem Client erlaubt⁴ werden, ohne dessen Anmeldedaten zu nutzen [50]. Das bedeutet, dass ein eingeschränkter Zugriff ohne Authentifizierung auf einem Server möglich ist. Die Autorisierung erfolgt mittels „Security Token“, welche über die API angefragt werden. Über eine „Client registration“ wird eine Anfrage des Clients an den Server gemacht, der ein „Request Token“ erhält, welches durch den Nutzer bestätigt werden muss. Ist dies erfolgreich, erhält der Client einen „Access Token“ mit dem er die Daten einsehen kann. Um die Sicherheit des Nutzers zu erhöhen, zerfällt der Access Token nach einer gewissen Zeit. Für weitere Datenübertragungen muss der Vorgang wiederholt werden oder dem Client wird ein „Refresh Token“ bereitgestellt, wodurch das Erneuern des Access Tokens möglich ist.

Die Anfragen der Daten sind in dem Softwareprototypen mittels der „HTTP-Get“ Methode erfolgt. Diese Methode weist zwar eine geringere Sicherheit auf, eine Anfrage von mehreren Smartmetern ist jedoch flexibler. Außerdem ist eine Anfrage über die REST API mit der speicherprogrammierbaren Steuerung zum Zeitpunkt der Erstellung des Programms noch nicht möglich.

⁴Dieser Vorgang wird als Autorisierung bezeichnet.

Direktmessung über eine RS-485 zu Ethernet Schnittstelle

Bei der Abfrage der Daten über die Discovery API, kann es zu Verzögerungen des Datentransfers kommen. Dies kann durch Verzögerungen im Upload, Download oder durch die Verarbeitung im Discovery Portal bedingt sein. Wenn die Verzögerungen eine hohe Abweichung der Zeit der erfassten Daten, zu der aktuellen Uhrzeit hat, ist eine zuverlässige Regelung des Lademanagementsystems nicht oder eingeschränkt möglich. Die Auswirkungen können eine hohe Auslastung der kritischen Bauteile sein, was im schlimmsten Fall zu einem Ausfall des Bauteils führen kann.

Daher wird, neben der Erfassung der Daten über das Discovery Portal, eine direkte Messung der Daten der Smartmeter ausgeführt. Dies geschieht über das firmeneigene Gateway von Discovery. Der sogenannte Meteorit wird an den Smartmeter angeschlossen und die Daten werden über eine „D0“ Schnittstelle im zwei Sekunden Takt übertragen. Die Tastrate der Übertragung entspricht der gleichen Tastrate der Erfassung der Werte des Smartmeters und hat somit die höchstmögliche Auflösung. Weitergehend können die Daten über diverse Schnittstellen von dem Meteoriten weitergeleitet werden. Die Übertragung der Daten zu dem Discovery Portal wird über Ethernet beziehungsweise LAN-Anschluss durchgeführt. Für die direkte Messung wird daher die RS-485 Schnittstelle verwendet.

In Abbildung 23 ist die Steckerverbindung des Meteoriten und die Verkabelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein vierpoliger RJ-10 Stecker verwendet wird, dessen Pins an drei Stellen belegt sind. Die Daten werden über den positiven Pin 2⁵ und den negativen Pin 3⁶, über das RS-232-Format übertragen. Dabei pendelt das Signal zwischen +5 V und -5 V zur Erde, welche am Pin 4⁷ angeschlossen ist. Die Schwankungen des Signals sind ein logischer Pegel und bilden ein binäres Signal mit „1“ und „0“ und werden als Byte übertragen [51]. Pin 1 wird bei der Übertragung nicht verwendet, weshalb eine Verbindung nicht notwendig ist.

Damit die Daten für die SPS auswertbar sind, muss eine Konvertierung der RS-232 Kommunikation auf das LAN-Format hergestellt werden. Diese werden dann auf über das vorhandene LAN-Netz zu SPS weitergeleitet und ausgewertet. Die Konvertierung wird mit dem RS-232 zu Ethernet Konverter der Firma „HiLink“ umgesetzt [52]. Dieser hat neben dem wirtschaftlichen Vorteil, ein kleine Geometrie und kann zusätzlich zu der Weiterleitung der Daten per Ethernet, diese auch über WLAN übertragen.

⁵Pin A

⁶Pin B

⁷Pin GND

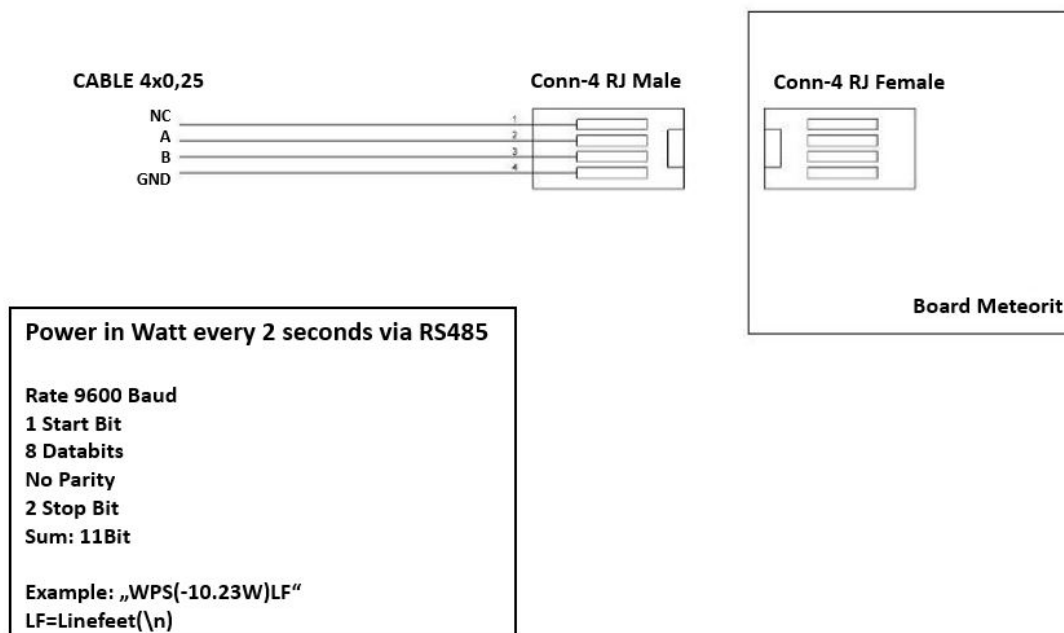


Abbildung 6.3.: Pinbelegung der Verbindung des Konverters der RS-485 Schnittstelle mit einem RJ10-Stecker [53]

Die drei Phasen der RS-232-Verbindung des Meteoriten werden mit einem Sub9-Stecker an den Konverter angeschlossen. Dabei muss auf die richtige Pinbelegung geachtet werden. Der Pin A des RJ-10-Steckers wird an die Erde (GND) und der Pin B an den „Receive Data“ Pin (RxD) des Sub9-Steckers angeschlossen. Damit wechselt der RxD-Eingang gegenüber der Erde mit einem +/- 5 V Pegel. Die konvertierten Daten werden über LAN übertragen und können mit einer „http-Get“ Anfrage über die IP-Adresse und den Port des Konverters abgefragt werden [53].

Nachteil der direkten Übertragung der Daten ist, dass die Leistung nicht phasenweise übermittelt wird, sondern die Summe der Leistung der Phasen. Dies ist besonders von Nachteil, wenn nicht eine, sondern mehrere Ladestation an einem Zähler angeschlossen sind, sodass ein genauer Leistungsbezug der Ladestationen und eine gezielte Regelung nicht möglich ist. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Leistung alle zwei Sekunden übertragen wird, die Einheit der Daten jedoch in „Watt per seconds“ (WPS) angegeben wird. Es wird demnach ein Mittelwert der Leistung übertragen.

Für eine sichere und genaue Erfassung der Leistung, werden daher die Daten sowohl über die Discovery API abgefragt, als auch über die direkte Messung. Dadurch können die genauen Daten der Discovery API mit denen der aktuellen und sicheren direkten Messung gegenübergestellt und überprüft werden.

Direktmessung mittels Stromwandlerspulen

Wie bereits im Kapitel 6.1.1 beschrieben, wird eine Direktmessung mit Stromwandlerspulen an signifikanten Stellen vorgenommen. Diese gelten als kritische Bauteile, bei denen ein Überschreiten der Lastgrenze zu verhindern gilt. Mittels der Stromwandler ist eine zuverlässige und schnelle Datenerfassung möglich, welche eine Abfrage ohne Verzögerung garantiert. Dabei können diverse Daten zum Zustand der Strom-, Spannungs- und Leistungswerte von der speicherprogrammierbaren Steuerung ermittelt werden.

6.2.2. Ladevorgang und Leistungsvergabe

Bei dem Lademanagementsystem handelt es sich um eine intelligente Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen, welche die Ladeprozesse der Fahrzeuge steuert, um einen sicheren Betrieb des Hausnetzes zu gewährleisten. Dies ermöglicht eine höhere Anzahl von Ladestationen im System, welche mit einer höheren Zahl von Elektrofahrzeugen einhergeht. Gleichzeitig fällt ein Ausbau des elektrischen Netzanschlusses weg, welches üblicherweise durch eine Erweiterung des Systems durch Verbraucher mit hohen Leistungen bedingt ist. Ermöglicht wird dies durch einen optimierten Ladeplan, welcher dynamisch durch Messungen an mehreren Stellen des Systems angepasst wird. Die Messungen beinhalten direkte Messungen des Stromes an signifikanten Stellen und den Einbezug der Daten der Smartmeter. Diese werden an die SPS weitergeleitet, ausgewertet und eine Steuerung der Ladestationen vorgenommen. Wegen der variablen Leistung der Ladestationen, sind die Elektrofahrzeuge auch als flexible Lasten anzusehen. Daher kann das System auch als „Smart-Grid“ betitelt werden.

Das Lademanagement der Elektrofahrzeuge sieht vor die Vergabe der Leistung auf die jeweilige Bedingung anzupassen, da die zu vergebene Leistungen für die Elektrofahrzeuge fluktuierend sind. Grund dafür ist einerseits die volatile Erzeugung von erneuerbaren Energien innerhalb des Haushaltsnetzes, was generell bei hoher Generierung eine höhere Leistungsvergabe für Elektroautos bedeutet. Andererseits beeinflussen die anderen Verbraucher die Leistungsvergabe, da die Begrenzungen durch die Sicherungen und elektrischen Trassen gegeben sind.

Für ein rechtzeitiges Agieren auf die dynamische Leistungsvergabe, muss eine ständige Messung der Verbraucher und kritische Stellen durchgeführt werden. Da die Messung des Stromes mit einem kleinen Zeitversatz gekoppelt ist, ist ein Puffer zum Reagieren des Lademanagementsystems mit eingerechnet. Der Puffer beträgt 50 Prozent des maximalen Stromes, welchen die Sicherung kurzzeitig leiten kann. Innerhalb der Zeit, in der die Sicherung den maximalen Strom weiterleitet, ist es dem Lademanagementsystem die Leistungsvergabe anzupassen und dadurch ein Ausfall der Sicherung zu vermeiden.

Drehstrom-Ladestationen angeschlossen werden. Der Dauerstrom bezieht dabei die Grenze der drei Phasen, da eine Ladung von Elektrofahrzeugen, je nach Ladestand und Strombezug, mehrere Stunden dauern kann. In der Abbildung sind beispielhaft mehrere Ladestationen eines Systems aufgeführt, welche nacheinander auf Ihren Zustand abgefragt und geregelt werden. Es steht anfangs der Ladestrom von 32 A auf allen drei Phasen zur Verfügung. Bei der Abfrage des Zustandes der ersten Ladestation wird ein angeschlossenes Elektrofahrzeug erkannt und der Zustand des Parameters „CarConnect“ wird auf „Ja“ geändert. Das Lademanagement stellt dem Fahrzeug nun den maximalen Strom pro Phase zur Verfügung. Der vorgegebene Ladestrom „ I_{Soll} “ wird dreiphasig mit 32 A bereitgestellt. Der Ladekontroller erhält durch das PWM-Signal, welches in Kapitel 5.3.2 beschrieben ist, die Höhe des maximalen Ladestroms und beginnt die Ladung mit der benötigten Stromstärke. In diesem Beispiel bezieht das Fahrzeug einphasig Strom an Phase 2 in einer Höhe von 16 A. Da die vorgegebene Stromstärke durch das Lademanagementsystem höher, als die bezogene Stromstärke ist, wird der Strom durch „ I_{Regel} “ von 32 A auf 16 A angepasst. Dadurch wird für die Dauer der Ladung, der Ladestrom der ersten Ladestation auf 16 A limitiert und erst bei erneutem Aufruf abgefragt und geregelt. Ebenso wird mit „ I_{Regel} “ der Ladestrom berechnet, welcher für die weiteren Ladestationen zur Verfügung steht. Dieser ist die Differenz aus dem anfänglichem Ladestrom und „ I_{Regel} “. Ist der Ladestrom der ersten Ladestation eingestellt, wird die zweite Ladestation auf Ihren Zustand überprüft. Da ein Elektrofahrzeug an der Ladestation erkannt wurde, wird der Parameter „CarConnect“ auf „Ja“ geschaltet und der Ladestrom „ I_{Soll} “ dreiphasig vorgegeben. Im Gegensatz zur ersten Ladung, wird nun ein dreiphasiger Ladestrom von 16 A vorgegeben. Dies beugt einer Überlastung der Sicherung der Verteilstation vor, da das zweite Fahrzeug mindestens 16 A auf der Phase 2 Strom beziehen könnte. Ist dies der Fall, so wird der Ladestrom limitiert und bei weiteren Abfragen angepasst.

Im Beispiel beträgt der Ladestrom des Fahrzeugs jedoch 10 A auf der ersten Phase, wodurch „ I_{Regel} “ für das Laden des Fahrzeugs angepasst wird. An Ladestation 3 wird kein angeschlossenes Fahrzeug erkannt, weshalb der weitere Vorgang abgebrochen wird und mit der Abfrage nächsten Ladestation fortgefahren wird.

Da ein Fahrzeug an Ladestation 4 angeschlossen ist, wird der Ladestrom „ I_{Soll} “ dreiphasig vorgegeben. Dieser beträgt weiterhin 16 A, da dies die maximale Auslastung einer Phase ist. Nach Vorgabe des Ladestromes wird erkannt, dass das Fahrzeug mehr Strom beziehen möchte als zulässig ist. Dies wird im ersten Schritt auf den zulässigen Ladestrom limitiert, da der maximale Dauerstrom der Sicherung erreicht ist. Bei der Analyse der Phase, auf welcher der Strom bezogen wird, wird festgestellt, dass der Strom über Phase 3 bezogen wird. Da bisher der zulässige Ladestrom durch Phase 2 begrenzt wird, auf Phase 3 jedoch kein Strom bezogen wird, wird im zweiten Schritt der Bezug von 20 A auf der Phase 3 zugelassen. Damit wird „ I_{Regel} “ auf 20 A für die Ladestation 4 geändert und ein neuer zulässiger Ladestrom wird festgelegt. Dieser wird aus der Differenz des Dauerstroms und des Ladestroms an Ladestation 4 gebildet und liegt bei 12 A.

Weitergehend wird an Ladestation 5 der Anschluss eines Elektrofahrzeugs festgestellt. Der zulässige Ladestrom „ I_{Soll} “ wird dreiphasig mit 12 A vorgegeben. Gleichermaßen zu Ladestation 4 übersteigt der angeforderte Ladestrom des Elektrofahrzeugs den zulässigen Ladestrom. Im ersten Schritt wird der zulässige Ladestrom eingestellt und analysiert an welcher Phase der Strom bezogen wird. In diesem Fall wird der Strom von Phase 3 bezogen, wodurch die Grenze des maximalen Dauerstroms an Phase 3 erreicht ist. Wegen der gleichmäßigen Leistungsverteilung wird nun eine einheitliche Verteilung des Ladestroms auf der Phase 3 angestrebt. Daher wird der Ladestrom „ I_{Regel} “ an der Ladestation 5 auf 16 A angehoben. Da in diesem Zustand der Strombezug auf Phase 3 mit 36 A, die Grenze des Dauerstroms um 4 A überschreitet, muss der Ladestrom an Ladestation 4 runtergeregelt werden. Dies geschieht indem „ I_{Regel} “ an Ladestation 4 auf 16 A gesenkt wird und sich der zulässige Dauerstrom an der Phase 3 eingestellt hat. Sind nach diesem Verfahren alle bestehenden Ladestationen abgefragt, so beginnt die Messung und Steuerung der Ladestationen erneut von Ladestation 1.

Sinkt der anfängliche zulässige Ladestrom von 32 A auf angenommene 20 A, was durch ein Zuschalten zusätzlicher oder Erhöhung der Last von einzelnen Verbraucher geschehen kann, wird die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge reduziert. In diesem Beispiel betrifft es die Phase 3 mit der Ladestation 4 und 5, dessen Ladestrom jeweils bei 16 A liegen. Da bei der Variante der Leistungsverteilung der Ladestrom gleichmäßig angepasst wird, sinkt der Ladestrom bei beiden Ladestationen auf 10 A. Bei einer erneuten Erhöhung des zulässigen Ladestroms, werden die Leistungen an Ladestation 4 und 5 wieder angehoben.

Die Vergabe des Ladestromes bei der zeitlichen Verteilung ist ähnlich zu der Variante der Leistungsverteilung. Es wird eine Abfrage der Ladestationen durchgeführt, bei welcher der Zustand der Ladestation abgefragt wird. Sind die Parameter gemessen und geregelt worden, wird der Zustand der nächsten Ladestation abgefragt, bis der Zustand aller Ladestationen erfasst ist und eine erneute Abfrage des Zustandes der Ladestation 1 durchgeführt wird.

Der Unterschied der zeitlichen Verteilung besteht jedoch darin, dass der zulässige Dauerstrom nicht auf die Ladestationen aktiv aufgeteilt wird. Das bedeutet, dass ein hoher Strombezug einer Ladestation nicht nachträglich runtergeregelt wird, sodass der Bezugsstrom von Elektrofahrzeugen zweier Ladestationen nicht zwingend auf einem Level ist. Es wird bei der zeitlichen Verteilung eher das Prinzip des „First-In, First-Get“ verfolgt. Das Elektrofahrzeug, welches als erstes an eine Ladestation angeschlossen wird, bekommt bis zu seiner vollständigen Ladung den, durch den Ladekontroller des Elektrofahrzeugs angeforderten, Ladestrom. Dies gilt, solange der zulässige Ladestrom nicht überschritten wird. Ansonsten wird die Leistung der Ladestation, wie bei der Leistungsverteilung, gesenkt. Wird ein zweites Fahrzeug an eine Ladestation angeschlossen, während das erste Fahrzeug noch am Laden ist, wird dieses mit dem „restlichen“ zur Verfügung stehenden Ladestrom geladen. Das Verfahren verläuft gleich zu dem der Leistungsverteilung, weshalb es trotzdem möglich ist, bei einer einphasigen Ladung von beiden Fahrzeugen auf verschiedenen Phasen, das zweite Elektrofahrzeug vollständig mit

dem angeforderten Ladestrom zu versorgen. Liegt jedoch eine Drehstrom-Ladung vor oder werden die Elektrofahrzeuge auf der selben Phase geladen, so ist die Ladung des zweiten Elektroautos gedrosselt. Es ist daher durchaus möglich, dass Elektrofahrzeuge, die nachträglich angeschlossen werden, zunächst nicht, bei einem Anschluss des Fahrzeugs an eine Ladestation, den Ladevorgang beginnen. Diese werden, nach Beendigung der Ladevorgangs von vorherigen Fahrzeugen, zugeschaltet, sodass deren Ladung startet.

Sinkt bei der Variante der zeitlichen Verteilung der zulässige Ladestrom, so wird zunächst die Ladeleistung des zuletzt angeschlossenen Fahrzeugs reduziert. Ist der zulässige Ladestrom so gering, dass der Ladestrom des ersten Fahrzeugs auch verringert werden muss, so werden zunächst die Ladevorgänge der später angeschlossenen Fahrzeuge unterbrochen. Die Ladung der Fahrzeuge wird bei einem erneuten Anstieg des zulässigen Ladestroms wieder aufgenommen und nach der ursprünglichen Verteilung priorisiert.

Die dritte Variante ist das prioritäre Laden der Fahrzeuge. Dabei ist der Ladestrom von Fahrzeugen höher, dessen Ladung dringlicher ist, als bei anderen Fahrzeugen in dem System. Ebenso ist es möglich die Ladung von Elektrofahrzeugen ganz zu unterbrechen, falls ein Fahrzeug mit hoher Priorität angeschlossen wird. Dies ähnelt der Variante der zeitlichen Verteilung, wobei die Priorisierung von Fahrzeugen nicht durch deren Ankunftszeit bestimmt wird, sondern durch die Nutzer der Fahrzeuge.

Der Nutzer bestimmt beim Anschluss des Fahrzeuges an die Ladestation, welche Priorität der Ladevorgang haben soll. Dies muss dem Lademanagementsystem übertragen werden, sodass eine Zuweisung der Wichtigkeit der Ladung der zugehörigen Ladestation durchgeführt werden kann. Eine Möglichkeit ist es, die Priorität per App weiterzugeben. Andererseits kann dies auch über physische Eingabe an den Ladestationen übertragen werden.

Die Priorität kann mehrstufig angeordnet werden, wodurch eine feste Ladereihenfolge entsteht. Allgemein ist jedoch die Aufteilung in hohe, mittlere und niedrige Priorität unterteilt. Dadurch wird angegeben, wie schnell der Ladevorgang durchgeführt werden muss. Bei der hohen Priorität wird angenommen, dass eine erneute Nutzung des Elektrofahrzeugs in kurzer Zeit wieder bevorsteht, sodass ein maximaler Ladestrom angestrebt wird. Ist dies der Fall, so kann eine Drosselung oder Unterbrechung des Ladevorgangs von weniger dringlichen Ladevorgängen vorgenommen werden. Die gedrosselten oder unterbrochenen Ladevorgänge werden nach Beenden des priorisierten Ladevorgangs wieder aufgenommen. Gleichermaßen wird bei der mittleren Priorität verfahren, nur mit dem Unterschied, dass diese nur einen Einfluss auf die niedrig prioritären Ladevorgänge haben. Diese werden jedoch nur in dem Fall gedrosselt oder unterbrochen, wenn der zulässige Ladestrom nicht ausreicht, um die angeforderte Ladeleistung der Elektrofahrzeuge zu decken. Die niedrige Priorität ist für eine nicht bestimmte Abfahrtszeit. Betroffen davon sind überwiegend Nachladungen, bei denen eine Drosselung oder Unterbrechung der Ladung keinen Effekt haben.

Weitergehend kann auch der Abfahrzeitpunkt angegeben werden, sodass eine genaue Höhe der Ladeleistung bestimmt werden kann. Dadurch kann das Lademanagementsystem optimal eingesetzt werden, da eine genaue Ladeleistungsvergabe und Priorität der Fahrzeuge bestimmt werden kann. Ebenso ist es möglich ein Beenden der Ladung kurz vor Abfahrt durchzuführen. Dadurch soll ein schonender Ladevorgang möglich sein, wodurch der Kapazitätsverlust des Fahrzeuges auf längere Sicht minimiert werden soll.

Es ist auch eine Kombination der Ladevarianten möglich. Dabei können die Vorteile der Leistungsverteilung mit denen des prioritären Ladens oder der zeitlichen Verteilung verbunden werden. Auch eine Kombination aus allen drei Varianten ist umsetzbar. Dies bringt den Vorteil eines soliden Lademanagementsystems durch die Leistungsverteilung, verbunden mit der Flexibilität einzelner Ladungen durch das prioritäre oder zeitliche Laden. Dadurch wird die Akzeptanz der Nutzer deutlich gesteigert, da der Ladevorgang an den Bedarf des Nutzers angepasst wird.

6.3. Implementation in bestehendes System

Bei der Implementation des Lademanagements muss auf bestimmte Kriterien geachtet werden. Diese variieren bei der Adaption des Managementsystems auf andere Netzsysteme, wodurch eine Anpassung an die Gegebenheiten durchgeführt werden muss. Folgend sind Kriterien aufgeführt, auf welche bei diesem Projekt geachtet werden müssen.

6.3.1. Besonderheiten des Gebäudes

Das entwickelte Lademanagementsystem, welches in dieser Arbeit erstellt wurde, ist ein Prototyp zur Regelung der Ladung von Elektromobilen in privaten Gebäudenetzen. Durch Messungen der Lasten wird der aktuelle Strombezug der Lasten, dem zulässigen Strombezug durch die Sicherheitseinrichtungen gegenübergestellt. Das Lastmanagement ist durch eine theoretische Arbeit erstellt und anhand eines Bestandsgebäudes optimiert worden.

Das Lademanagement ist auf ein dynamisches Verbraucherverhalten angepasst, wodurch eine Adaption auf andere Systeme möglich ist. Die Übertragung des Lademanagementsystems erfordert lediglich eine Anpassung der Position der Messtellen und deren Hierarchie.

Der Gebäudekomplex, welcher in dieser Arbeit behandelt wird, weist Besonderheiten auf, auf welche das Lastmanagementsystem reagieren muss. Diese können bei der Übertragung auf ein anderes Projekt ausfallen oder erweitert auftreten. Eine Besonderheit ist, dass das Gebäude in zwei Bereiche

aufgeteilt ist, wobei die regelbaren Lasten nur in einem Bereich des Gebäudes positioniert sind. Daher kann der andere Gebäudebereich als eine fluktuierende Last angesehen werden.

Die zweite Besonderheit ist die Photovoltaikanlage, welche an der Fassade angebracht ist. Durch die volatile Generation von Strom können die Hauptsicherungen des Netzes durch Eigenstromverbrauch entlastet werden, da weniger Strom vom Netz bezogen werden muss. Andererseits können, durch ungleiche Phaseinspeisung, die Phasen des Netzes unterschiedlich belastet werden. Dies hat Rückwirkung auf das Niederspannungsnetz und kann den Transformator des Niederspannungsnetzes zusätzlich belasten.

6.3.2. Schiefast des Niederspannungsnetzes

In der VDE-AR-N 4105, welche umgangssprachlich als „Niederspannungsrichtlinie“ bezeichnet wird, ist eine maximale Phasenschieflast von 4,6 kVA im dreiphasigen Niederspannungsnetz zugelassen [54]. Dies gilt gesondert für „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ [54], da diese eine Phasenschieflast durch einphasige Netzeinspeisung hervorrufen können. Tritt eine hohe Phasenschieflast auf, so muss dem durch Regelung der Leistung entgegengewirkt werden. Dies kann durch Limitierung der Lasten beziehungsweise Verbraucher oder mittels Regelleistung geschehen.

Eine dauerhaft hohe Schiefast kann zur Beschädigung der netzseitigen Betriebsmittel führen, was wirtschaftliche Folgen für den Netzbetreiber haben kann. Daher wird die Hervorrufung einer verbraucherseitigen Schiefast durch die VDE-AR-N 4105 unterbunden [55].

Für das Bestandsobjekt bedeutet dies einerseits die Einhaltung der Norm durch die Bestands Photovoltaikanlage, andererseits kann eine Schiefast durch den Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs hervorgerufen werden. Daher ist bei der Regelung der Fahrzeuge auf die Schiefastbedingung der Phasen zu achten [56].

6.3.3. Testprogramm Autoerkennung

Für die Erstellung eines dynamischen Lastmanagementsystems, müssen die Eigenschaften und Charakteristika der zu regelnden Lasten bekannt sein. Begründet ist dies durch das Verhalten der Verbraucher bei unterschiedlichen Bezugsströmen. Diese können bei verschiedener Belastung einen variablen Wirkungsgrad aufweisen, welches sich zum Beispiel im Blindleistungsbezug widerspiegelt. Das Verhalten der Lasten bei unterschiedlichen Bezugsströmen hat Rückwirkung auf die Netzbelastung und muss daher mitberücksichtigt werden.

In diesem Projekt beschränken sich die zu regelnden Lasten auf die angeschlossenen Elektrofahrzeuge. Deren Ladeverhalten ist noch nicht ausgiebig untersucht. Besonders gilt dies bei reduzierter Ladeleistung, da im Regelfall eine Ladung mit Höchstleistung des Elektrofahrzeugs durchgeführt wird. Ebenso werden nur geringe Angaben über deren Ladeverhalten von den Herstellern gegeben.

Zum jetzigen Projektstand ist eine gleichzeitige Ladung von drei Elektrofahrzeugen möglich, welche keine besonderen Einschränkungen durch das Lastmanagementsystem erfordern, um die Sicherheit des Hausnetzes zu gewährleisten. Im weiteren Verlauf des Projektes wird jedoch ein Ausbau der Tiefgaragenstellplätze mit Ladestationen umgesetzt. Durch die Ladestationen wird das Netz zusätzlich um maximal 22 kW pro Stellplatz dreiphasig belastet. Daher ist eine Beschränkung der Ladeleistung der Elektrofahrzeuge unablässig, weshalb eine Untersuchung der Ladecharakteristika der Elektrofahrzeuge durchgeführt werden muss.

Da die Ladeigenschaften im Verlauf eines Ladevorganges voraussichtlich für jedes Fahrzeug unterschiedlich sind, wird ein Prüfverfahren entwickelt, um diese zu ermitteln. Das Prüfverfahren besteht aus mehreren Abschnitten, in denen verschiedene Lademodi eingestellt werden. Diese testen das Verhalten bei hohen und niedrigen Ladeströmen. Es wird besonders auf die Ansprech- und Reaktionszeit der Fahrzeuge geachtet, nachdem eine Regelung durch das Lademanagementsystem ausgeführt wird. Außerdem wird die Stromstärkenänderung pro Zeit erfasst, welche im weiteren Verlauf als Stromänderungsrate bezeichnet wird. Diese hat große Auswirkungen auf die Varietät des Lademanagements, da bei einer kleinen Stromänderungsrate eine schnellere Regelung möglich ist. Darauf aufbauend, kann der Puffer der Bezugsströme zum Auslösestrom der Sicherungen kleiner dimensioniert werden. Außerdem werden Ladekurven bei längerer Ladezeit bestimmt, um eine Vorhersage der Ladung zu treffen. Neben dem Verhalten bei unterschiedlichen Ladeströmen wird eine Unterbrechung des Ladevorganges untersucht. Ein Abwurf der Last der Elektroautos kann durch eine schnelle Stromänderung oder eine hohe Last der anderen Verbraucher bedingt sein, sodass eine Ladung der Fahrzeuge nicht mehr tragbar ist.

Für die Implementierung des Verhaltens der Verbraucher wird eine Datenbank erstellt. Mittels dieser Daten soll bei Beginn eines Ladevorganges der Fahrzeugtyp erkannt werden, womit eine optimale Regelung des Fahrzeugs ermöglicht wird. Die Daten werden anhand eines Testprogrammes des Lademanagements erhoben, wodurch eine Kompatibilität garantiert ist. Außerdem ist eine Erweiterung der Datenbank simpel, da ein Test von neuen Modellen an jeder Ladestation möglich ist. Dafür wird das Testprogramm für die jeweilige Ladestation freigeschaltet, welches bei Anschluss eines Fahrzeugs automatisch beginnt. Das Ladeverhalten wird aufgezeichnet und zur Auswertung in einer „CSV“-Datei gespeichert. Bei Abschluss des Tests, wird die Datei automatisch per Mail übermittelt, wodurch eine schnelle Auswertung durchgeführt werden kann.

In Abbildung 6.5 ist ein Verlauf des Testprogramms beispielhaft dargestellt. Das Diagramm zeigt, über einen zeitlich aufgetragenen Verlauf auf der x-Achse, die Ladeströme des Elektrofahrzeugs (y-Achse). Dabei ist der vorgegebene Ladestrom des Testprogramms in grau und die eingestellten Ladeströme des Elektrofahrzeugs in rot eingezeichnet.

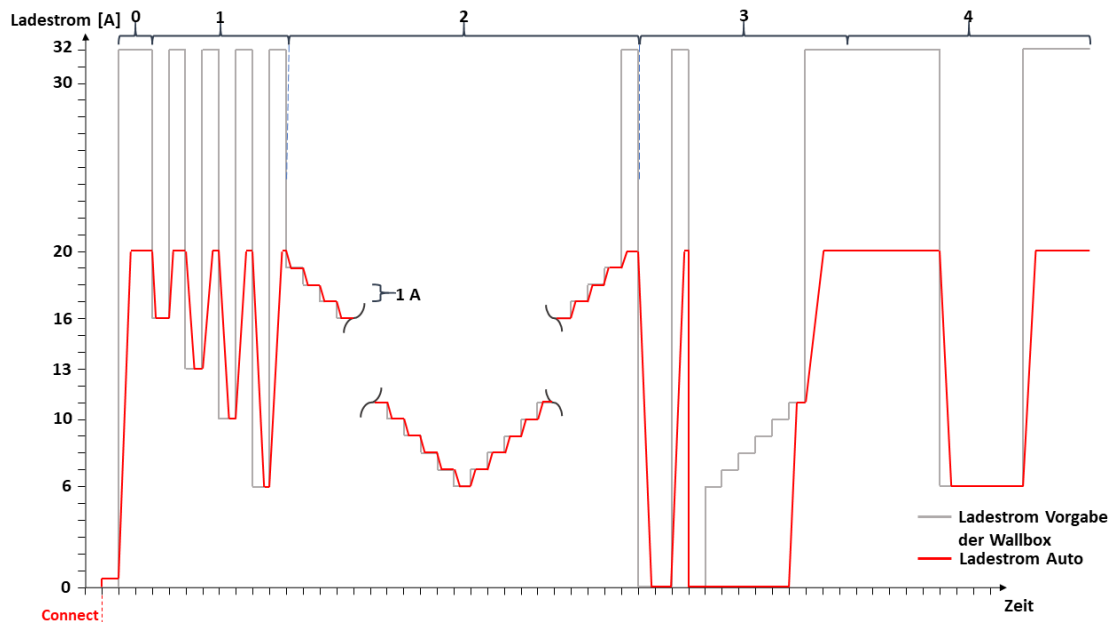


Abbildung 6.5.: Verlauf des Testverfahrens zur Autocharakterisierung [23]

Das Testprogramm ist in fünf Bereiche aufgeteilt, die unterschiedliche Ladeigenschaften des Fahrzeugtyps erfassen. In Abbildung 6.5 ist eine mögliche Reaktion eines Elektrofahrzeugs aufgezeigt. Der eingestellte Ladestrom des Elektrofahrzeugs (rot) zeigt eine einphasige Ladung im Bereich zwischen 6 A und 20 A.

Bevor das Testprogramm startet, wird über den „Proximity Plug“ die Stromtragfähigkeit des Ladekabels ermittelt, was in Kapitel 5.3.1 beschrieben ist. Dies bedingt einen geringen Strombezug. Voraussetzung ist, dass das genutzte Ladekabel, den Ladestrom des Elektrofahrzeugs nicht beschränkt. Daher sollte für einen signifikanten Test ein Ladekabel mit einer Stromtragfähigkeit von 32 A verwendet werden. Anschließend beginnt das Testverfahren zur Bestimmung des Ladeverhaltens.

Testbereich [0]:

Dieser Testverlauf startet die Ladung des Elektrofahrzeugs. Es wird zunächst der maximale Strombezug zugelassen, welcher, im Rahmen des Projektes, eine Stromstärke von 32 A pro Phase beträgt. Es kann dadurch der maximale Ladestrom des Autos ermittelt werden, der im Beispiel von Abbildung 6.5 20 A beträgt.

Weitergehend ist die Erfassung der Stromänderungsrate von Ladebeginn bis zum maximalen Strombezug möglich. Anhand dieser Daten kann die Reaktionsgeschwindigkeit des Ladevorganges des Autos bei großen Leistungssprüngen festgestellt werden.

Testbereich [1]:

In diesem Testbereich werden zyklisch die Stromänderungsraten bei unterschiedlichen Leistungssprüngen ermittelt. Dieser Test ist eine Erweiterung der Untersuchung des ersten Leistungssprunges. Die minimalen Kennwerte sind an die Ladezustände der Norm IEC-61851 angepasst, welche von jedem Elektrofahrzeug eingestellt werden müssten. Die eingestellten Werte werden von den höheren Ladeströmen zu den niedrigeren erfasst, wobei die Sprünge jeweils von dem maximalen Ladestrom ausgehen. Da, nach jedem Testzyklus der maximale Ladestrom wiedereingestellt wird, kann gleichzeitig die Stromänderungsrate eines positiven Sprunges erfasst werden. Daraus lässt sich die Geschwindigkeit der Leistungserhöhung eines Fahrzeugs ermitteln, wenn ein höherer Leistungsbezug durch das Lademanagement genehmigt wird.

Bei diesem Testverfahren wird ebenfalls erfasst, ob die Ladeströme der Norm IEC-61851 vom Fahrzeug eingestellt werden können. Außerdem kann der minimale Ladestrom des Fahrzeugs ermittelt werden, welcher normgerecht bei 6 A liegen sollte. Ist dem nicht der Fall, so könnte bei geringen Stromvorgaben des Lademanagementsystems ein ungewolltes Abschalten der Fahrzeuge auftreten. Lässt sich das Fahrzeug nicht automatisch durch das Lademanagement wieder einschalten, kann der Ladevorgang des Autos nicht fortgeführt werden.

Testbereich [2]:

In diesem Testbereich wird eine stufige Änderung der Ladeströme durchgeführt. Dabei wird, zunächst fallend von dem maximalen zum minimalen Ladestrom und anschließend steigend vom minimalen zum maximalen Ladestrom, eine schrittweise Änderung des Ladestroms eingestellt. Die Schrittweite beträgt 1 A, welches die kleinste Schrittweite des Ladekontrollers der Bestands-Ladestationen ist.

Zunächst lässt sich mit diesem Test überprüfen, ob eine variable Stromvorgabe des Elektrofahrzeugs möglich ist. Dies zeigt sich, indem eine Einstellung des Bezugsstroms in 1 A Schritten möglich ist oder der Ladekontroller des Elektrofahrzeuges nur die Strombezüge der Norm IEC-61851 zulässt.

Außerdem kann bei dieser Messung die Stromänderungsraten bei kleinen Bezugsstromänderungen ermittelt werden. Diese Änderungsraten sind besonders für den normalen Betrieb des Lastmanagementsystems wichtig, da bei einem Betrieb von mehreren Lasten eine geringe Änderung der Bezugsströme einzelner, eine große Auswirkung auf die Auslastung der Verteilsysteme hat.

Testbereich [3]:

Im Testbereich 3 wird festgestellt, ob ein Ab- und Wiedereinschalten der Elektrofahrzeuge durch das

Lademanagement möglich ist. Dies beinhaltet ein zurücksetzen des Fahrzeuges in den Ladezustand B, welcher im Kapitel 5.3.2 beschrieben ist. Von diesem Zustand soll das Fahrzeug wieder in den Zustand C beziehungsweise D gebracht und die Ladung fortgesetzt werden.

Ein Abschalten oder Unterbrechen des Ladevorgangs der Elektrofahrzeuge ist bei einer hohen Auslastung der Sicherheitseinrichtungen nötig, falls der Strombezug der Fahrzeuge, welche durch die Sicherheitseinrichtung geschützt werden, nicht mehr verringert werden kann. Dies ist der Fall, wenn die Fahrzeuge ihren minimal möglichen Strom beziehen. Eine weitere Absenkung des Ladestromes ist nicht möglich, da der Ladekontroller der Ladestation den minimalen Ladestrom auf 6 A beschränkt. In dem Testbereich werden zwei verschiedenen Methoden zur Untersuchung des Abschaltverhaltens angewendet.

Bei der ersten Methode wird untersucht, ob ein Wiedereinschalten der Ladung generell möglich ist. Dazu wird ausgehend von dem maximalen Strombezug, der Ladevorgang unterbrochen und nach einer gewissen Zeit wieder mit maximaler Leistung begonnen. Die Dauer des Abschaltintervalls wird variiert, um die Auswirkungen auf den Wiedereinschaltversuch zu untersuchen. Dieser wird ausgehend von einer Sekunde, logarithmisch bis zu einer Ladeunterbrechung von 1000 Sekunden erhöht. Die maximale Ladunterbrechung entspricht etwa 15 Minuten, was im realen Betrieb einer tragbaren Unterbrechung der Ladung entspricht.

Mit der zweiten Methode wird der minimale Wiedereinschaltstrom ermittelt. Damit wird überprüft, ob eine Bereitstellung der maximalen Leistung notwendig oder auch ein sofortiger Betrieb in Teillast möglich ist. Dabei wird die Stromvorgabe schrittweise um 1 A erhöht bis der Ladevorgang wieder beginnt. Die Änderungsrate des Stromes wird anhand der ersten Methode bestimmt.

Testbereich [4]:

Im letzten Testverfahren wird das Dauerladeverhalten des Elektrofahrzeugs untersucht. Dafür werden die Ströme des maximalen und minimalen Bezugs eingestellt. Die wechselnde Ladestromvorgabe wird bis zur vollständig Ladung des Elektrofahrzeugs durchgeführt. Anhand der Ladekurven lassen sich Rückschlüsse auf das Verhalten der Fahrzeuge bei verschiedenen Ladezuständen ziehen. Es wird der Strombezug bei unterschiedlichen Ladezuständen und selber Ladestromvorgabe und das Abschaltverhalten bei Erreichen der vollen Batteriekapazität untersucht.

6.3.4. Bestimmung der Stromänderungsrate

Wie bereits in Kapitel 6.3.2 erwähnt, ist die Stromänderungsrate die Reaktionszeit der regelbaren Lasten. Sie bestimmt, zusammen mit dem Lademanagementsystem, die Reaktionszeit auf Änderungen in dem System. Daher ist diese ein wichtiger Parameter bei der Regelung der Lasten, da eine kleine

Stromänderungsrate eine schnellere Reaktionszeit auf Laständerungen im System hat. Dadurch kann der Puffer zum Einhalten der Auslöseströme der Sicherungen kleiner dimensioniert werden, wodurch ein größerer Regelbereich entsteht.

Da die Stromänderungsrate für verschiedene Elektrofahrzeuge variieren kann, wird diese in dem „Testprogramm zu Autoerkennung“ erfasst. In Abbildung 6.6 ist die Erfassung der Stromänderungsrate aufgeführt. Beispielhaft ist der Beginn eines Ladevorgangs auf 20 A und eine Regelung des Bezugsstromes auf 10 A. Es ist der vorgegebene Ladestrom des Ladecontrollers der Wallbox (graue Kennlinie) und die Reaktion des Bezugsstromes des Elektroautos (rote Kennlinie) schematisch zu sehen. Die Änderung des Ladestromes kann mit einer Potentialfunktion dritten Grades beschrieben werden.

Bei der Erfassung der Stromänderungsrate wird der Strombezug des Elektrofahrzeugs von fünf Zeitbereichen zwischengespeichert, anhand derer der Beginn der Stromänderung und das Erreichen des neu eingestellten Stromes erkannt werden. Für jeden erfassten Wert wird eine obere und untere Toleranzgrenze gegeben, da eine kleine Abweichung der Ladeströme auftreten kann. Die Basis der Toleranzgrenze wird aus dem Durchschnitt der ersten vier Werte des Zeitbereiches bestimmt. Wird ein neuer Ladestrom durch den Ladecontroller vorgegeben und eine Abweichung von mehr als 5 Prozent des Basiswertes an dem fünften Zeitbereichswert festgestellt, so kann eine Ladestromänderung des Elektrofahrzeugs angenommen werden. Der Zeitpunkt des letzten Wertes, welcher innerhalb der Toleranzgrenze war, wird mit t_0 festgehalten. Das Ende der Stromänderung wird zum Zeitpunkt t_1 erreicht. Hierbei wird die Basis der Toleranzgrenze aus den Werten des Zeitbereiches zwei bis fünf gebildet. Der Zeitpunkt t_1 wird mit derselben Methode wie t_0 erfasst, jedoch wird t_1 zu dem Zeitpunkt bestimmt, indem alle Werte erneut innerhalb der Toleranzgrenze liegen. Das Prinzip der Erfassung einer positiven oder negativen Stromänderung ist äquivalent. Die Zeitpunkte der Stromänderung werden mit t_0 und t_1 bestimmt.

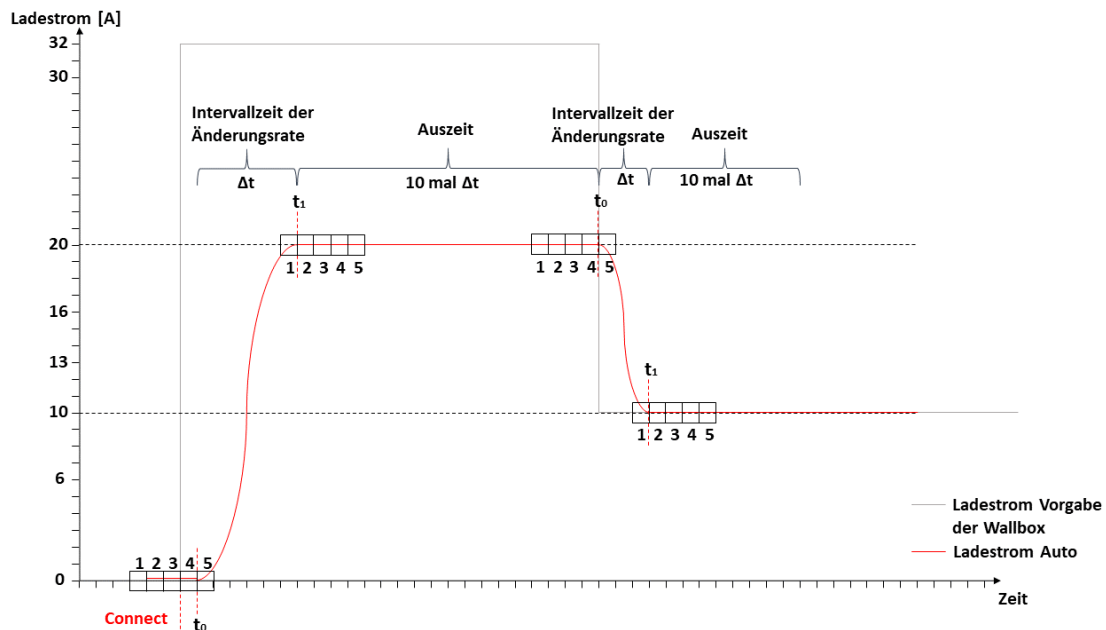


Abbildung 6.6.: Erfassung der Stromänderungsrate der Elektrofahrzeuge [23]

Die Differenz der Zeitpunkte t_0 und t_1 bildet die Intervallzeit Δt . Diese gibt die Reaktionszeit der Ladestromänderung des Elektrofahrzeugs an. Weitergehend kann anhand der Intervallzeit und der Höhe der Stromänderung die Stromänderungsrate des Elektrofahrzeugs bestimmt werden, welche ein Charakteristika für Elektrofahrzeuge darstellt.

Die „Auszeit“ nach der Änderung des Ladestromes wird aus einem Vielfachen der Intervallzeit gebildet. Sie hat einerseits die Funktion, dass eine erneute, verfrühte Regelung des Elektrofahrzeugs, durch den Ladecontroller, verhindert wird. Dadurch kann einerseits eine signifikante Datenerfassung mit eindeutiger Grenze der Versuche durchgeführt werden. Andererseits wird sichergestellt, dass eine weitere Änderung des Ladestromes erfasst wird. Dies kann sich widerspiegeln, indem der Ladestrom der Elektrofahrzeuge stetig geändert wird, jedoch innerhalb des Toleranzbereiches bleibt.

7. Nachweis der Programmfunktion

In diesem Kapitel wird der Nachweis der Funktion des Lademanagementsystems dargestellt. Dabei wird auf die beschriebenen Eigenschaften des Managementsystems eingegangen, welche im Vorhinein definiert wurden. Es wird die Regelbarkeit der Elektrofahrzeuge und die Machbarkeit der Umsetzung der Lastregelung untersucht. Dabei wird auf die Auswirkung der Leistungsregelung der Elektrofahrzeuge auf das bestehende Gebäudenetz eingegangen. Diese werden dem ungeregelten Fall entgegengestellt, wodurch die Notwendigkeit eines Lademanagementsystems des Wohngebäudes bestimmt wird.

7.1. Nachweis des Testprogramms der Autoerkennung

Die Ergebnisse des Testprogramms zur Autoerkennung dienen zur Erstellung einer Datenbank, anhand der eine Identifikation des Modells, bei Beginn eines Ladevorganges eines Elektrofahrzeugs, möglich ist. Dadurch kann das Lademanagementsystem, mittels eines kurzen Identifikationstestes, die Eigenschaften des Fahrzeugs beim Ladevorgang bestimmen. Diese Eigenschaften dienen einer besseren Einstellung des Ladestroms der Fahrzeuge und können ein ungewolltes Abschalten durch einen zu geringen Ladestrom verhindern.

Testbereich 1

In Abbildung 7.1 ist beispielhaft ein Ablauf des Testprogramms für ein Elektrofahrzeug für den ersten Testbereich. Hierbei werden zyklisch große Stromänderungen durchgeführt, sodass eine Erfassung der Stromänderungsrate des Fahrzeugs möglich ist. Diese starten jeweils bei 32 A zu einem anderen Ladestrom und gehen in den Ausgangszustand zurück. Die Daten sind die Messwerte des vorgegebenen Ladestroms und der eingestellten Ladeströme an der Wallbox und sind mit einer Auflösung von einer Sekunde erfasst.

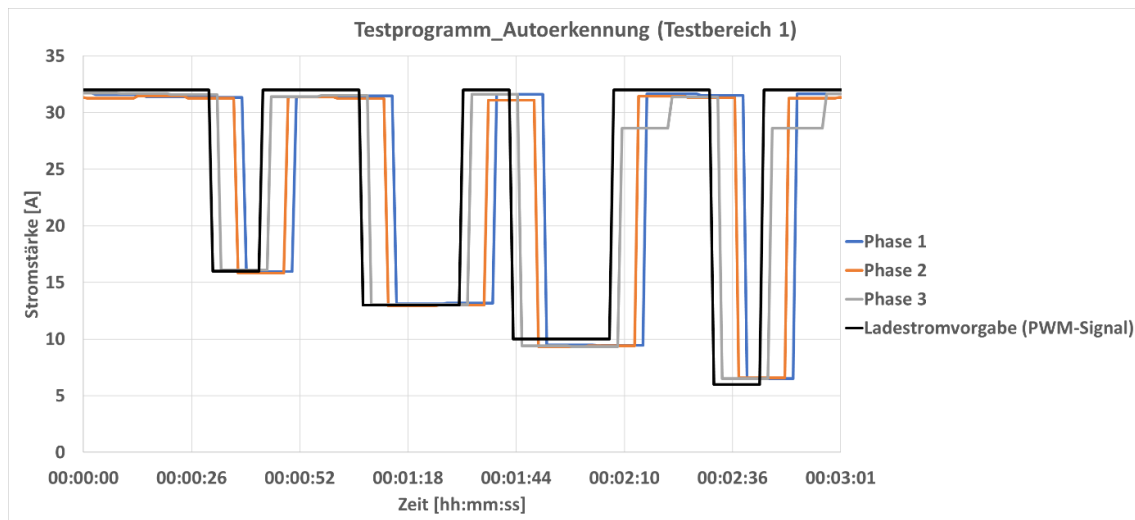


Abbildung 7.1.: Beispiel einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 1 des Programms zur Autoerkennung [23]

Zunächst kann gesagt werden, dass das Elektrofahrzeug einen dreiphasigen Strombezug mit bis zu 32 A aufweist, welches ein deutliches Erkennungsmerkmal ist, da dies zu diesem Zeitpunkt nur mit wenigen Fahrzeugen möglich ist. Außerdem ist in der Abbildung eine deutliche Zeitverzögerung der Ladeströme des Elektromobils zu erkennen. Dieser liegt in einem Zeitbereich von wenigen Sekunden, wobei sich für jede Phase eine unterschiedliche Differenz einstellt. Die kürzeste Reaktionszeit weist Phase 3 und die längste Phase 1 auf und ist als Muster für jeden Leistungssprung zu erkennen. Dieses Verhalten könnte ein Charakteristikum des Elektrofahrzeugs sein oder eine Eigenschaft des Ladecontrollers. Weitergehend ist zu erkennen, dass für den hohen und niedrigen Strombereich, der Ladestrom jeder Phase unterhalb der Ladestromvorgabe liegt, da dieser die maximale Stromgrenze bildet. Bei dem letzten Leistungssprung auf 6 A wird ein Ladestrom pro Phase eingestellt, welcher höher als der Vorgabestrom ist. Dabei könnte es sich um Messungenauigkeiten handeln oder es lässt sich daraus schließen, dass der minimale Ladestrom des Fahrzeugs minimal über 6 A liegt und eine weitere Ladestromreduzierung nicht möglich ist. Dieses Verhalten zeigt bei den Testläufen nur dieses Elektrofahrzeug und kann als Charakteristikum gelten. Dazu kann auch der zeitweilige Zwischenstrom von 28 A an der dritten Phase bei einer Änderung der Ladestromvorgabe von mehr als 22 A zählen. Dieser Zwischenschritt variiert bei mehreren Testkäufen zwischen 26 A und 29 A, kann jedoch trotzdem als Charakteristikum angesehen werden, dies ausschließlich auf einer Phase auftritt. Dieses Verhalten zeigen auch andere Modelle auf, jedoch liegt der Bereich des eingestellten Zwischenstrom auf einem anderen Stromstärkenniveau. Zuletzt kann aus diesem Testbereich die Stromänderungsrate bestimmt werden. Diese weist eine hohe Stromänderung pro Sekunde auf, da sich der neue Bezugsstrom, auch bei großen Stromsprüngen, innerhalb von wenigen Sekunden einstellt.

Testbereich 2

Der zweite Testbereich behandelt kleine Stromänderungen des Ladestroms, wobei eine stetige Änderung der Ladeströme vom Ladestrommaximum zum -minimum und vom Ladestromminimum zum -maximum in 1 A Schritten durchgeführt wird. Dabei wird vor allem auf die Stromänderungsrate und den Zeitversatz der Ladestromvorgabe zu dem Bezugsstrom pro Phase geachtet. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung A ein Teilausschnitt des Testbereiches mit einer fallenden Flanke von 30 A bis 24 A dargestellt.

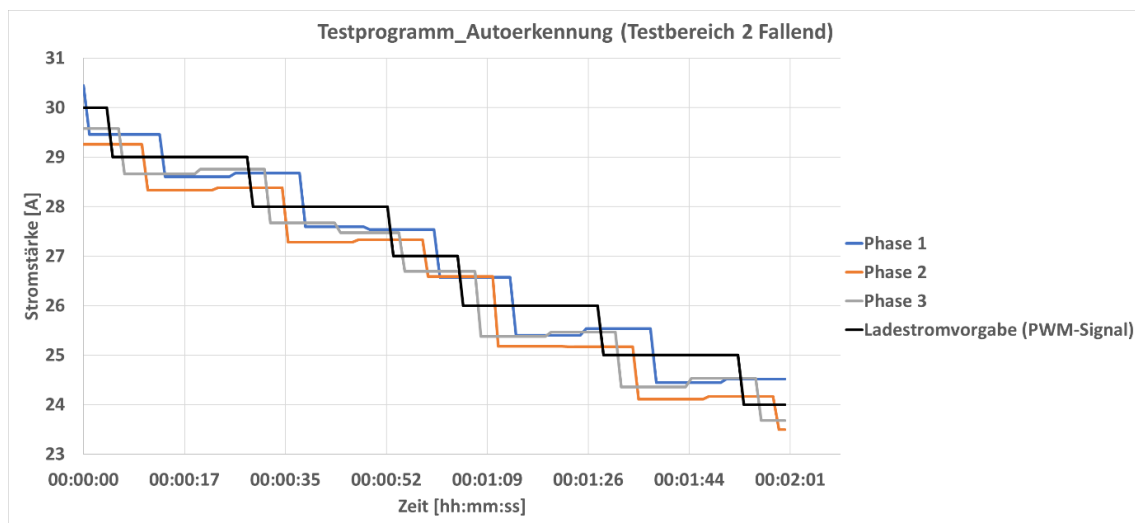


Abbildung 7.2.: Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 2 mit einer fallenden Flanke des Programms zur Autoerkennung [23]

Es ist zu erkennen, dass die Ladeströme des Testbereiches 1 ein ähnliches Verhalten Testbereich 2 aufweisen. Die zeitliche Verzögerung der Phasenströme gegenüber des vorgegebenen Ladestroms liegen im Sekundenbereich und unterscheiden sich zwischen den Phasen. Dies könnte ebenso auf ein Charakteristikum des Elektrofahrzeugs hinweisen oder ein Versatz durch die Messung der Ströme der Wallbox sein. Dazu kann gesagt werden, dass der zeitliche Phasenstromversatz auch durch andere Messstellen festgehalten ist, was auf eine unabhängige verzögerte Phasenstromänderung des Fahrzeugs hinweist. Die Stromstärke pro Phase stellt sich unterhalb des vorgegebenen Ladestroms ein. Ausnahme ist eine Ladestromvorgabe von 6 A, bei welcher eine höhere Stromstärke pro Phase ermittelt wird. Der Unterschied der Dauer der Einstellung der Ladestromvorgabe ist durch die Auszeit der Stromänderungsrate bedingt. Das Programm erfasst die Intervallzeit im Sekundenintervall, wodurch eine Rundung der Werte zwischen einer und zwei Sekunden auftritt.

In Abbildung 7.3 ist ein Teilausschnitt des zweiten Testbereiches mit einer steigenden Flanke, mit der gleichen Ladestromvorgabe wie in Abbildung A, dargestellt. Auch hier ist eine Zeitverzögerung der

Phasen zu erkennen. Lediglich eine minimale Abweichung der eingestellten Ladeströme zwischen der steigenden und fallenden Flanke ist festzustellen.

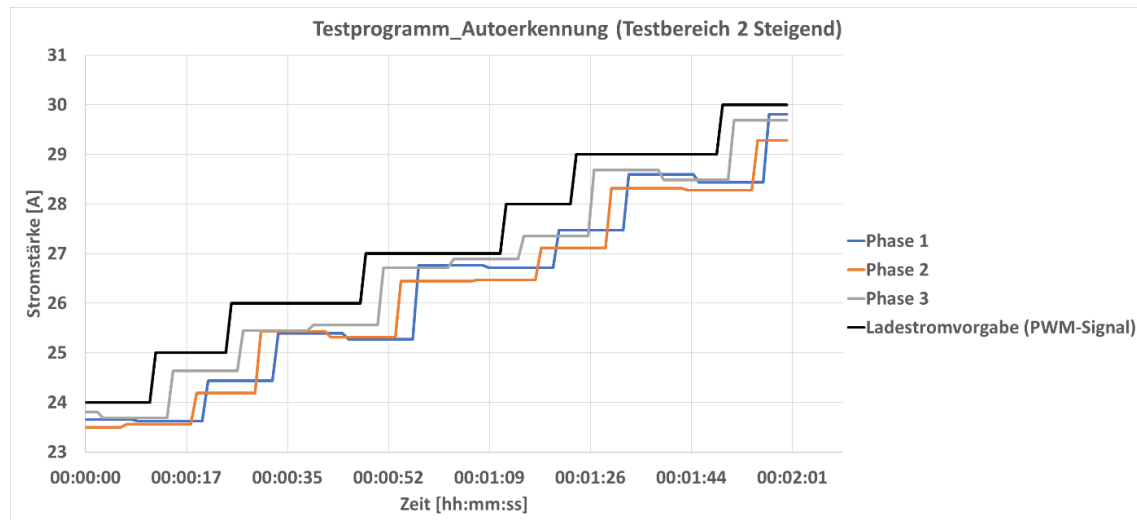


Abbildung 7.3.: Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 2 mit einer steigenden Flanke des Programms zur Autoerkennung [23]

Die Stromänderungsrate ist, im Gegensatz zum Testbereich 1, in diesem Testbereich niedriger, da die zeitlichen Erfassung der Daten begrenzt ist. Daher wird eine Stromänderungsrate von 1 Ampere pro Sekunde festgestellt, welches skaliert auf einen 20 A Sprung, eine hohe Einstellzeit des Stromes bedeutet.

Testbereich 3

Im dritten Testbereich wird das Abschaltverhalten und die Unterbrechungsdauer des Ladevorganges der Elektrofahrzeuge untersucht. Dabei wird festgestellt, ob eine Ladunterbrechung möglich und wie hoch die Wiedereinschaltdauer und der -strom sind. In Abbildung 7.4 ist das Wiedereinschalten eines Ladevorganges eines Elektromobils dargestellt. Es wird kontinuierlich eine Ladestromvorgabe von 20 A vorgegeben, wobei der Ladevorgang in Abhängigkeit der Zeit unterbrochen und wiederaufgenommen wird.

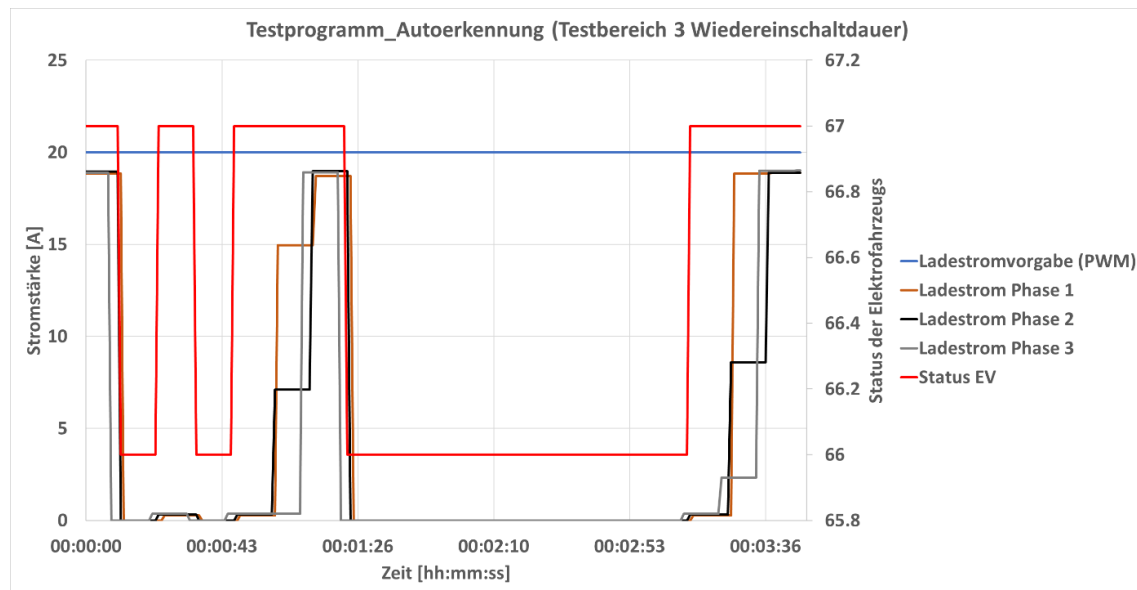


Abbildung 7.4.: Unterbrechung des Ladevorganges eines Elektrofahrzeugs in Abhängigkeit der Zeit [23]

Der Verlauf der Ladeströme und des Status des Elektrofahrzeugs zeigt, dass ein Wiedereinschaltvorgang der Ladung möglich ist. Das Fahrzeug wechselt von Status 67¹ zu Status 66² und umgekehrt. Ebenso wird bei einem Wechsel in den Zustand B der Ladestrom auf 0 A verringert, was bedeutet, dass das Fahrzeug keinen Strom bezieht. Aus diesem Zustand ist ein Wiedereinschalten mit hohem Strombezug möglich.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei einem Wiedereinschaltvorgang der Strombezug für wenige Sekunden weniger als ein Ampere beträgt. Zurückzuführen ist dies auf die digitale Kommunikation (Kapitel 5.3.2), welche zu Beginn eines Ladevorganges zwischen der Ladestation und dem Elektrofahrzeug hergestellt wird. Diese hat ein Tastverhältnis zwischen 3 und 7 Prozent, was dem dargestellten Stromwert entspricht. Es ist zu erkennen, dass der Ladevorgang erst nach dem Beenden der digitalen Kommunikation beginnt, welches einige Sekunden in Anspruch nimmt. Daher ist bei der Regelung des Ladevorganges eine hohe Taktung der Ladeunterbrechung nicht möglich.

Im Gegensatz dazu ist eine lange Unterbrechung des Ladevorgangs durchführbar, wodurch eine längere, vollständige Entlastung des Hausanschlusses durch Elektrofahrzeuge möglich ist. Gleichmaßen ist ein Wiedereinschalten des Ladevorganges bei geringer Stromstärke möglich. In Abbildung 7.5 ist ein Wiedereinschaltvorgang bei geringer Ladestromvorgabe aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass der Ladevorgang, nach Abwicklung des Vorgangs der digitalen Kommunikation, bei einem geringen Ladestrom wiederbeginnt.

¹Status C nach IEC-61851

²Status B nach IEC-61851

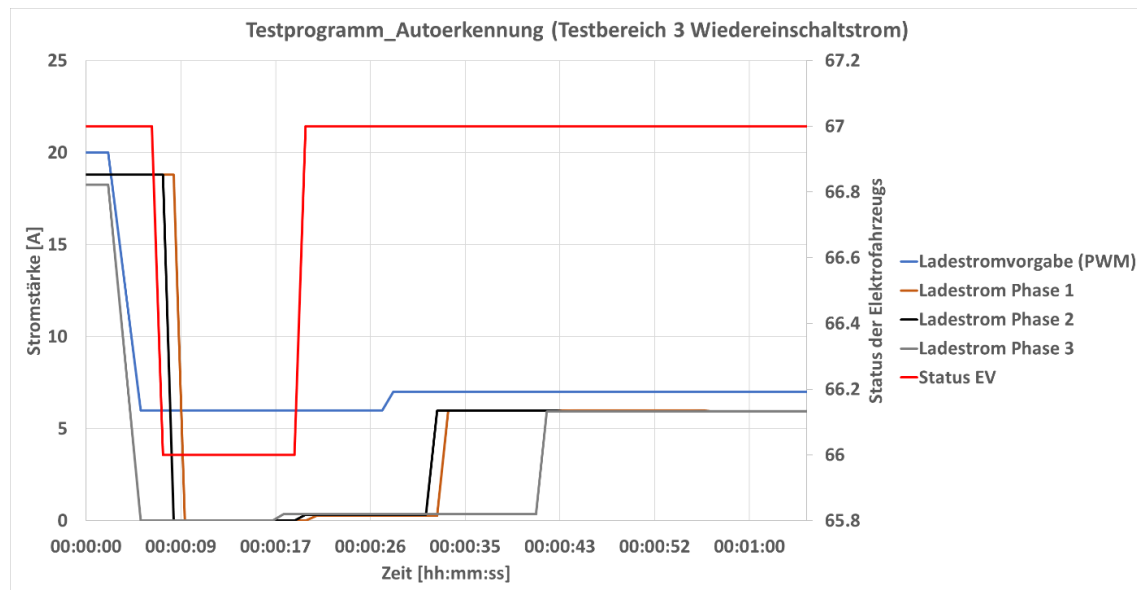


Abbildung 7.5.: Unterbrechung des Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges in Abhängigkeit des Ladestromes [23]

Anhand der Möglichkeit den Ladevorgang bei geringem Ladestrom erneut zu beginnen, kann ein hartes Zuschalten der Elektrofahrzeuge vermieden werden. Dies hat positive Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz, da durch ein Einschalten der Elektrofahrzeuge, keine großen Stromsprünge entstehen.

Testbereich 4

Im Testbereich 4 wird das Dauerladeverhalten an den Stromgrenzen des Elektrofahrzeugs ermittelt. Dies wird bis zur vollständigen Ladung in einem zyklischen Ablauf wiederholt. Dabei wird die Konstanz der Bezugsströme der Phasen erfasst.

In Abbildung 7.6 ist ein Teilausschnitt des Testverlaufes aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei einer Ladestromvorgabe von 6 A wieder ein minimal höherer Bezugsstrom des Elektromobils eingestellt wird. Ebenso tritt der Zwischenschritt der Phase 3 bei einem großen positiven Stromstärkensprung auf. Das Verhalten der Konstanz der Ladestromstärke vom maximalen und minimalen Limit weist jedoch Unterschiede auf. Bei einem eingestellten minimalen Ladestrom sind die Verhalten der Ladeströme sehr stabil. Die Stromstärke schwankt im Bereich von einigen Milliampere über die Dauer des Abschnittes, welches tolerierbar ist. Dies gilt nicht für das Testverfahren mit maximaler Stromstärke. Es ist eine deutliche Fluktuation des Ladestroms der einzelnen Phasen zu erkennen. Hinzu kommt ein stufiges Verringern des Ladestromes der Phasen ab ca. 4:30 Minuten, welches verbraucherseitig vom Ladekontroller des Elektrofahrzeugs eingeleitet wird. Dies lässt sich durch den Ladestatus der

Batterie erklären, da dieser einen Ladezustand von etwa 80 Prozent erreicht hat. Ab diesem Batterieladestand wird eine kontinuierliche Verringerung des Ladestroms eingeleitet. Dieses Verhalten soll eine höhere Zyklenfestigkeit und somit eine längere Lebensdauer des Akkumulators garantieren. Der hohe Batterieladestand könnte auch der Grund für die Schwankungen des Ladestromes bei hoher Ladestromvorgabe sein, da eine konstante Regelung des hohen Ladestromes nicht mehr durch das Ladesystem des Elektrofahrzeugs ausgeführt werden kann.

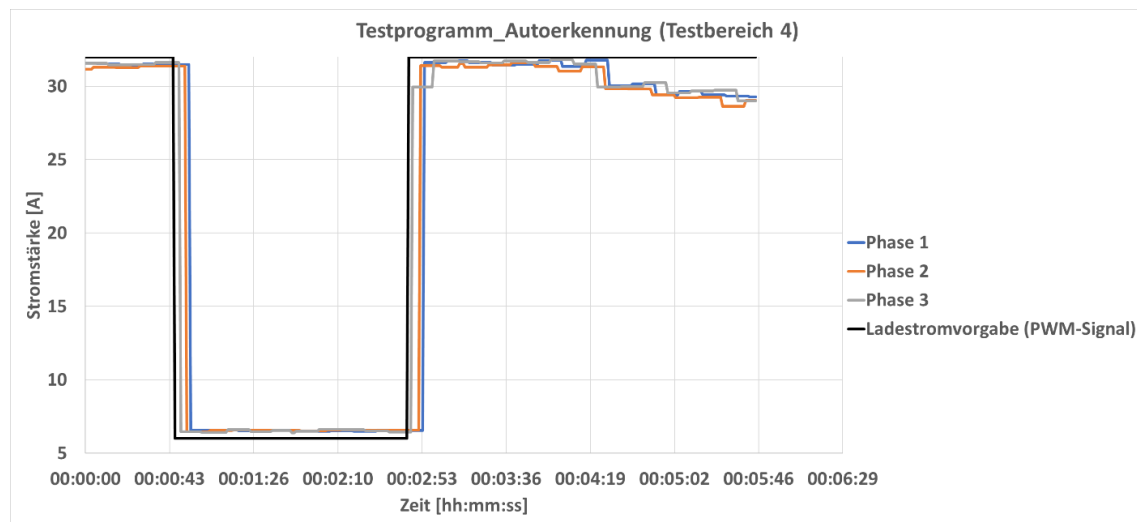


Abbildung 7.6.: Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 4 des Programms zur Autoerkennung [23]

Die Messergebnisse mehrerer Elektrofahrzeuge zeigt, dass die Reaktionszeit der Fahrzeuge auf eine neue Stromvorgabe sehr gering ist. Sowohl bei kleinen, als auch bei großen Stromsprüngen, liegt diese in einem einstelligen Sekundenbereich. Ein Grund dafür ist die hohe Stromänderungsrate der Fahrzeuge, welche einen große Stromänderung innerhalb weniger Sekunden aufweist. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die reale Stromänderungszeit unterhalb einer Sekunde liegt, welches jedoch mit einer Datenspeicherauflösung von einer Sekunde nicht bewiesen werden kann. Außerdem zeigt sich, dass der bezogene Ladestrom durchschnittlich 1 A unterhalb des vorgegebenen Ladestromes liegt. Dies kann an Messungenauigkeiten und Verlusten der Bauteile, den Schnittstellen und den Übertragungskabeln liegen.

Fazit zum Testprogramm

Als Ergebnis des Testprogramms zur Autoerkennung kann gesagt werden, dass eine Regelung von Elektrofahrzeugen durch das Lastmanagementsystem möglich ist. Eine variable Einstellung der Ladestromvorgabe innerhalb der technischen Grenzen ist umsetzbar. Dabei können große und kleine Stromänderungen in kurzer Zeit eingestellt werden. Ebenso ist eine Unterbrechung des Ladevorgangs

möglich. Das Wiedereinschalten ist für kurze Einschaltvorgänge auf die Dauer der digitalen Kommunikation begrenzt. Eine zeitliche Limitierung von längeren Ladeunterbrechungen konnte nicht festgestellt werden.

Bei der Charakterisierung der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen sind drei Charakteristika für die Fahrzeugerkennung valide. Zum einen die Anzahl der Phasen von denen das Fahrzeug Ladestrom bezieht. Dies ist zum derzeitigen Zeitpunkt der Automodelle ein starkes Charakteristikum, da eine hohe Varietät von ein- bis dreiphasiger Ladung, bei der geringen Anzahl von Elektrofahrzeuge auf dem Markt, herrscht. Das zweite Charakteristikum ist das Limit des maximalen Ladestromes pro Phase. Die Messversuche haben gezeigt, dass ein maximaler Ladestrom zwischen 13 A und 32 A möglich ist. Dabei ist ein Unterschied zwischen dem eingestellten, maximalen Ladestrom und dem bezogenen Ladestrom festzustellen. Diese Differenz kann von wenigen hundert Milliampere bis zu zwei Ampere variieren. Diese Varietät kann einerseits ein weiteres Charakteristikum sein, andererseits kann dieses Verhalten durch Messfehler hervorgerufen werden. Daher ist diese Differenz nicht für eine valide Bestimmung der Elektrofahrzeuge geeignet. Das dritte Charakteristikum ist der minimal einstellbare Ladestrom der Elektrofahrzeuge. Im Rahmen der Testläufe konnte festgestellt werden, dass jedes der getesteten Fahrzeuge die Vorgabe des minimalen Ladestromes nach IEC-61851 erfüllt. Dazu ist zu erwähnen, dass die getesteten Elektrofahrzeuge überwiegend aus einer neueren Generation von Elektrofahrzeugen waren. Bei der Einstellung des minimalen Ladestromes ist auch eine Differenz zwischen Ladestromvorgabe und Ladestrombezug zu erkennen. Die Differenz schwankt dabei zwischen einer negativen Differenz von circa 1,1 A und einem positiven Ladestrombezug von etwa 0,2 Ampere. Es kann gesagt werden, dass diese Erkenntnisse nicht valide sind, da ein höherer Ladestrombezug als -vorgabe gemessen wird, was auf Messfehler zurückzuführen ist.

Die Messungen der Stromänderungsrate zeigen, dass eine hohe Stromänderungsrate bei allen Fahrzeugen möglich ist. Dies gilt sowohl für kleine, als auch große Stromsprünge. Aufgrund der Limitierung der zeitlichen Auflösung von einer Sekunde des Datenloggers, kann keine genaue Bestimmung der Stromänderungsrate der Fahrzeuge getroffen werden, weshalb eine Charakterisierung der Fahrzeuge durch die Stromänderungsrate nicht möglich ist.

7.2. Lastkurve des Gebäudes ohne Regelung durch ein Lademanagementsystems

Das Bestands-Wohngebäude, welches im Rahmen dieses Projektes behandelt wurde, weist eine hohe Anzahl von Wohngebäuden und -parteien auf, welches viele Verbraucher zur Folge hat. Hinzu kommt, dass das Verbraucherverhalten der Bewohner und damit die jeweiligen Lastkurven stark variieren. Kombiniert ergeben diese Lastkurven eine homogene Belastung über einen Tagesverlauf auf den Phasen. Dies ergibt sich auch bei einem unregelmäßigen System, da, erfahrungsgemäß bei mehreren Lasten, eine gleichmäßigere Verteilung der Last auf die Phasen vorherrscht.

Trotz alledem können, besonders bei Systemen mit vielen Verbrauchern, hohe ein- oder zweiphasige Belastungen auftreten, welche die maximal vorgeschriebene Schieflast einer Phase von 4,6 kVA überschreiten und somit das Niederspannungsnetz belasten. In Abbildung 7.7 ist der gemessene Strombezug der Phasen des Wohngebäudes an dem Hausanschluss aufgezeigt, welcher das Auftreten einer starken einphasigen Schieflast darstellt. Es ist zu erkennen, dass, über die Dauer von etwa einer Stunde, mehrfach ein Schieflastbezug des Wohngebäudes auftritt. Bereits innerhalb der ersten 5 Minuten wird von der Phase 1 ungefähr 30 A mehr als von Phase 3 bezogen. Dies überschreitet die Schieflastbedingung der VDE-AR-N 4105 [54], welche eine maximale Phasenschieflast von 20 A erlaubt.

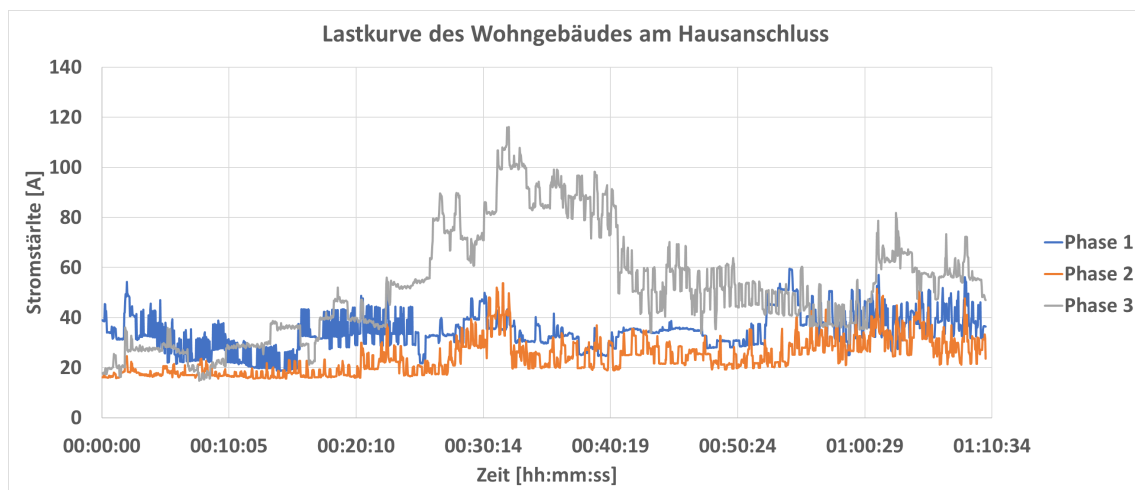


Abbildung 7.7.: Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schieflast am Hausanschluss [23]

Ein besonders hoher Schieflastbezug tritt in dem Zeitbereich von Minute 22 bis Minute 40 auf. Hierbei ist der Strombezug der Phase 1 um ein Vielfaches höher als bei den anderen Phasen. Dabei erreicht die einphasige Last knapp 120 A und übersteigt somit den zulässigen einphasigen Dauerstrom von

100 A am Hausanschluss. Die Differenz der stark belasteten Phase zu den beiden anderen Phasen beträgt circa 50 A, was eine Überschreitung von 250 Prozent der zulässigen Schieflast ist. Durch diese starke Schieflast werden die Komponenten des Niederspannungsnetzes stark belastet, was eine erhöhte netzseitige Regelleistung erfordert.

Eine starke einphasige Belastung setzt sich häufig aus mehreren Verbrauchern zusammen, welche gleichzeitig eingeschaltet sind. Häufig ist eine Rückverfolgung der Verbraucher möglich, sodass ein erneutes Auftreten einer hohen Schieflast verhindert werden kann. Möglich ist dies mittels eines Managementsystems, welche die Leistung der Verbraucher regelt.

In Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 sind die Lastkurvenverläufe an der Niederspannungshauptverteilung der Zähleranlage 1 und 3 dargestellt. Die zeitliche Erfassung der Daten entspricht dem Zeitpunkt der Daten aus Abbildung 7.7. In dem Zeitbereich der starken Schieflast weist die erste Phase der Zähleranlage 1 eine hohe Belastung auf. Diese Last ist, bis auf ein geringes Flickern konstant und lässt auf das Einschalten von einigen starken, einphasigen Dauerverbrauchern schließen. Aus dem Zuschalten der einzelnen Verbraucher ergeben sich die Stromsprünge auf der Phase.

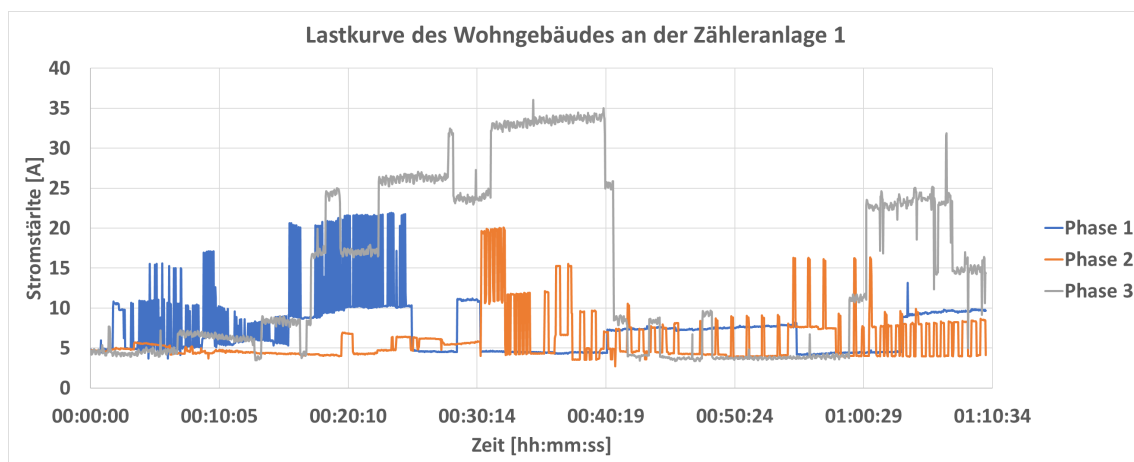


Abbildung 7.8.: Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schieflast an der Zähleranlage 1 [23]

Ebenso wird an der Zähleranlage 3, im selben Zeitbereich des starken, einphasigen Leistungsbezugs der Zähleranlage 1, der Anschluss von einigen einphasigen Verbrauchern festgestellt. Diese beziehen ebenfalls Strom auf der dritten Phase, wodurch die zeitweilig hohe Schieflast zustande kommt. Hinzu kommt die hohe Taktung der Verbraucher an der Zähleranlage 3, welche eine zusätzliche Belastung darstellen. Diese schnelle Taktung setzt sich am Hausanschluss fort und bewirkt eine zusätzliche Regelgröße im Niederspannungsnetz, welche durch Regelleistung ausgeglichen werden muss.

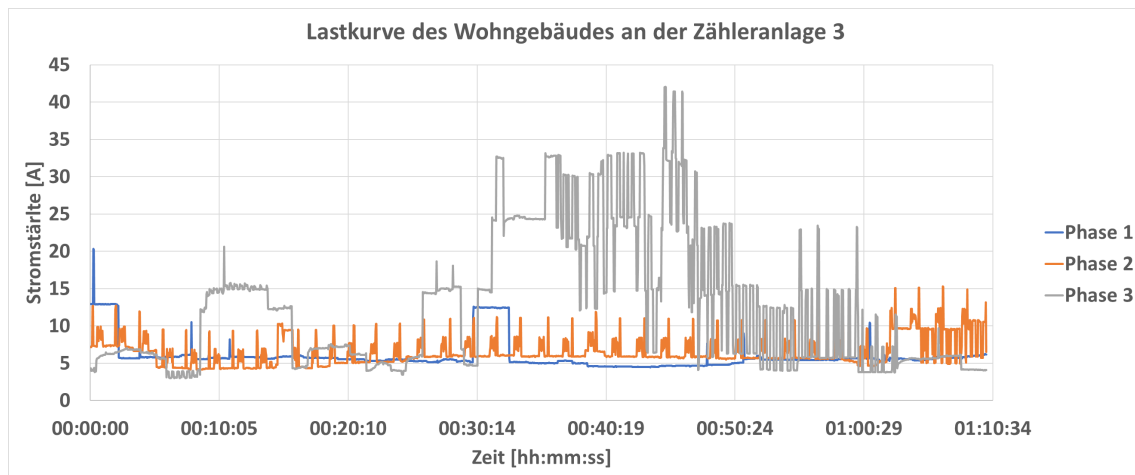


Abbildung 7.9.: Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schiefast an der Zähleranlage 3 [23]

Die in Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 auftretenden starken Stromschwankungen der Lastprofile, können mittels des Lademanagementsystems reduziert werden. Dabei können starke Leistungssprünge, mittels schnellem runter- oder hochregeln des Ladestroms der Elektrofahrzeuge, ausgeglichen werden. Dadurch kann der Strombezug der schnellen Taktung der Verbraucher aus Abbildung 7.9 abgeschwächt werden, sodass eine gleichmäßigere Lastkurve entsteht.

Bei einem Ladevorgang eines Elektrofahrzeugs wird eine hohe Last in das Gebäudenetz eingebracht. Diese bezieht innerhalb kürzester Zeit eine hohe Stromstärke, wodurch ein großer Leistungssprung entsteht. Dies kann rapide zu einer Schiefast des Netzes führen, da nicht alle Elektrofahrzeuge einen dreiphasigen Strombezug aufweisen. Insbesondere bei Anschluss von mehreren Fahrzeugen kann dieser Fall auftreten. Bei dem Szenario des Anschlusses von mehreren Fahrzeugen ist ebenso der maximale mögliche Dauerstrom der Sicherungen an der Niederspannungshauptverteilung und dem Hausanschluss schnell erreicht. Wird zusätzlich zu der Gebäudelast des Beispiels aus Abbildung 7.7 ein Elektrofahrzeug mit dem maximalen Ladestrom aus Kapitel 6.3.3, liegt der Bezug von Phase 3 für einen großen Zeitraum über der Dauerstromgrenze. Bei einem Ladevorgang von mehreren Fahrzeugen könnte die Kurzstromgrenze überschritten werden und ein Auslösen der Sicherungen auftreten, was einen Stromausfall im ganzen oder Teilen des Gebäudes verursachen würde.

In Abbildung 7.10 ist der Beginn eines Ladevorganges eines Elektromobils an der Niederspannungshauptverteilung zu sehen. Der einphasige Strombezug des Elektromobils beträgt dabei 29 A.

Es ist deutlich, dass der Ladebeginn des Fahrzeugs eine große Auswirkung auf die Phasenlast der Zähleranlage hat. Die ausgeglichene Phasenbelastung ist binnen weniger Sekunden um 25 A schief.

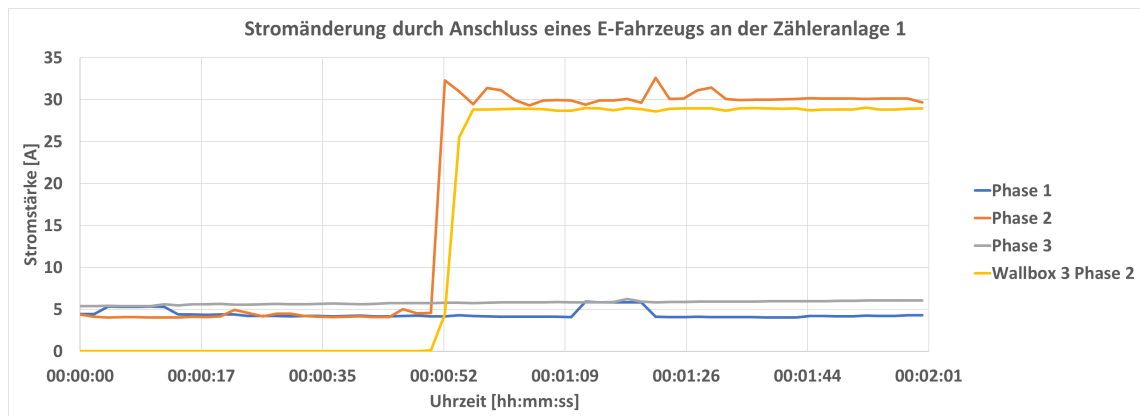


Abbildung 7.10.: Stromsprung an der Niederspannungshauptverteilung durch Anschluss eines Elektrofahrzeugs [23]

Dieser Zustand bleibt im weiteren Verlauf des Ladevorgangs beständig, solange keine Belastung der Phase 1 und 3 oder eine Abregelung des Ladestroms erfolgt.

Die Auswirkungen auf den Hausanschluss sind in Abbildung 7.11 dargestellt. Die Änderung der Strombelastung zeigt eine sprunghafte Erhöhung der Phase 2 auf, wodurch eine neue Phasenbelastung eingestellt wird. Die Höhe des Sprunges wird an dem Hausanschluss durch die Entlastung der Wohnungsverbraucher etwas abgedämpft, zeigt jedoch trotzdem die große Bezugsstromänderung am Hausanschluss. In diesem Falle hat der Ladevorgang keine fatale Auswirkung auf den Schiefastbezug des Gebäudes, liegt jedoch an der Grenze der der Vorgabe nach VDE-AR-N 4105 [54]. Würde das Fahrzeug den Strom von Phase 3 beziehen, so würde eine hohe Schiefast bezogen.

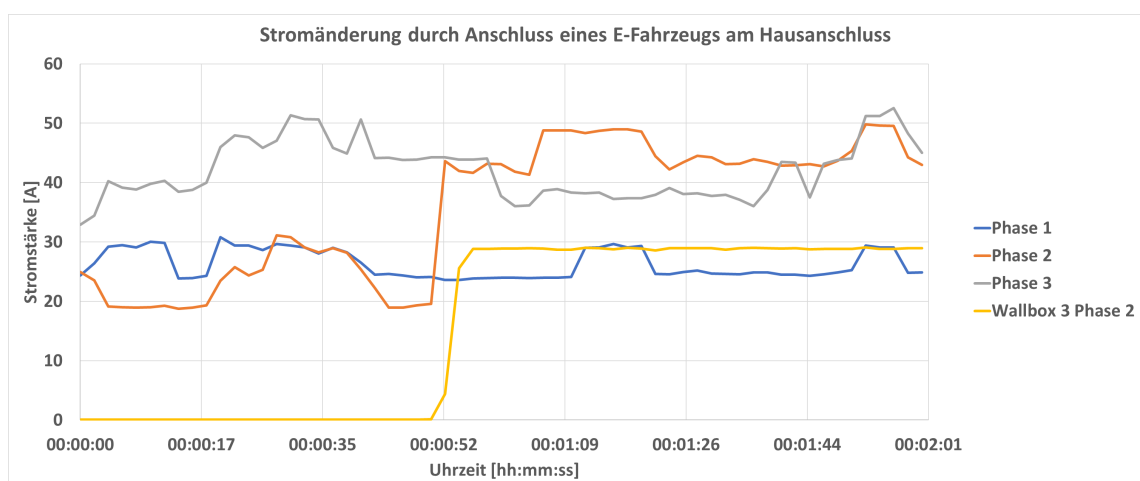


Abbildung 7.11.: Stromsprung am Hausanschluss durch Anschluss eines Elektrofahrzeugs [23]

Mittels eines Lademanagementsystems könnte die positive und negative Flankierung des Elektrofahrzeugs eine schnelle Regelgröße zum Ausgleich von Schwankungen im Gebäudenetz sein. Dabei würde eine flexible Ladung des Elektrofahrzeugs durchgeführt, welche einen gleichmäßigen Lastbezug der Phasen bewirkt. In Abbildung 7.12 ist der Lastgang der hohen Schieflast des Wohngebäudes mit der Regelung eines Elektromobils durch das Lademanagementsystem dargestellt. Es wird die Annahme getroffen, dass die Last der Phase 1 eine Kombination des Strombezugs der Wohnungen und eines Elektrofahrzeugs ist. Der Ladevorgang des Elektrofahrzeugs wird durch das Lademanagementsystem geregelt, wodurch ein Ausgleich der starken Schwankungen möglich ist. Die rote Kurve zeigt den neuen Phasenstrombezug der Phase 1 des Hausanschlusses. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Strombezug der Phase gleichmäßiger bezogen wird, was eine geringere netzseitige Regelung bewirkt. Der maximale Ausgleich der Stromsprünge kann höchstens die Strombezugsgröße von 29 A des Elektrofahrzeugs sein, welche für positive und negative Regelleistung möglich ist. Dadurch wird die Regelleistung von der Netz- auf die Verbraucherseite transponiert.

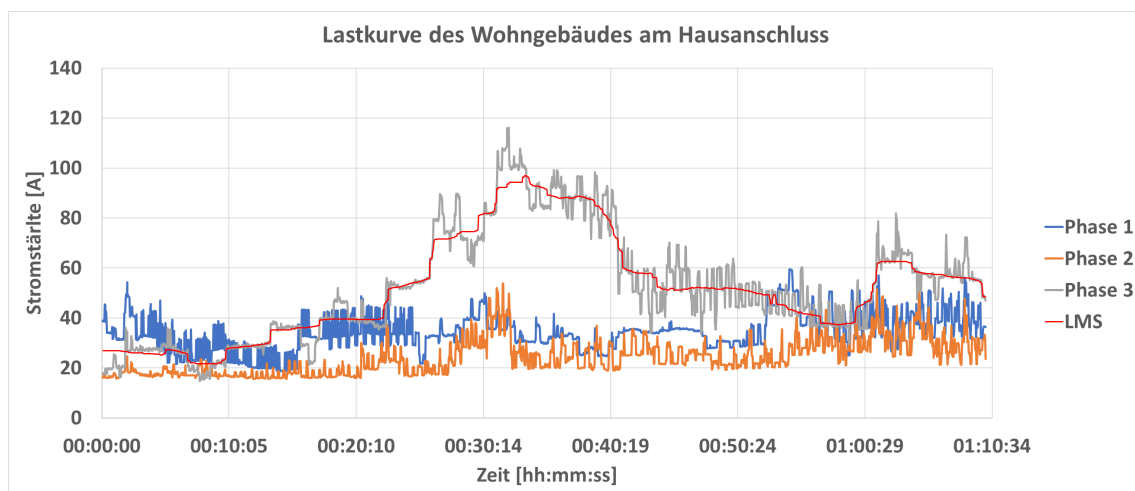


Abbildung 7.12.: Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit Regelung des Phasenstroms 1 durch das Lademanagementsystem [23]

Eine Verhinderung der schiefen Phasenlage ist in diesem Szenario nicht möglich, da ein Abschalten des Ladevorganges eines Fahrzeugs nicht ausreicht. Dafür würden weitere Fahrzeuge benötigt werden, welche entweder den Strom von Phase 1 beziehen und den Strombezug drosseln oder den Ladevorgang abbrechen, oder die Last an den anderen Phasen erhöhen würden.

7.3. Lastkurve des Gebäudes mit dynamischer Regelung des Lastmanagementsystem

Bei der Umsetzung des Lastmanagementsystems müssen im Rahmen dieser Arbeit mehrere Faktoren berücksichtigt und beeinflusst werden. Dies gilt für die Sicherungsgrenze, die Last der Haushaltsverbraucher und den Ladestrom der Elektrofahrzeuge. Die Sicherungsgrenze ist der maximal erlaubte Dauer-Strombezug der Haushaltsverbraucher und der Elektrofahrzeuge, welcher an einer Phase anliegen darf. Diese ist nicht mit dem maximalen Kurzschlussstrom der Sicherung zu vergleichen, welche im Kapitel 6.1.1 erläutert ist. Diese bestimmt die Grenze der maximalen kurzzeitig auftretenden Ströme der Sicherungen. Die Sicherungsgrenze des Dauer-Strombezugs bildet den maximalen Strombezug, welche über eine längere Zeit auftreten darf, wie es beim Ladevorgang eines Elektromobils auftreten kann. Durch die Begrenzung des Dauerstrombezugs soll unter anderem eine Überhitzung der Komponenten des Haushaltsnetzes verhindert werden, welche sonst beschädigt werden könnten. Da eine Dauerbelastung des Haushaltsnetzes durch Elektrofahrzeuge noch nicht genau untersucht ist, ist eine Bestimmung des Wertes der Sicherungsgrenze nicht möglich, weshalb der Wert variabel eingestellt werden kann.

Weitergehend ist für die Validierung des Lastmanagementsystems der Strombezug der Lasten, in Kombination der zur Verfügung stehenden Elektrofahrzeuge, zu niedrig, um eine repräsentative Regelung der Fahrzeuge darzustellen. Daher werden virtuelle Lasten in das System eingefügt, welche variable die Phasen der Sicherungsebenen belasten.

In Abbildung 7.13 ist die Leistungsverteilung eines Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges dargestellt. Dieses bezieht einphasig Strom, weshalb der Strombezug und die Ladestromvorgabe nur einphasig aufgezeigt sind. Der Strombezug des Elektrofahrzeuges liegt minimal bei 6 A und maximal bei 13 A, welcher variabel an den Reststrom angepasst wird, wobei ein Unterbrechen des Ladevorganges bei diesem Testzyklus nicht zulässig ist. Der Strombetrag der Sicherungsgrenze ist ebenso variabel, damit die Reaktion des Lastmanagementsystems zu sehen ist.

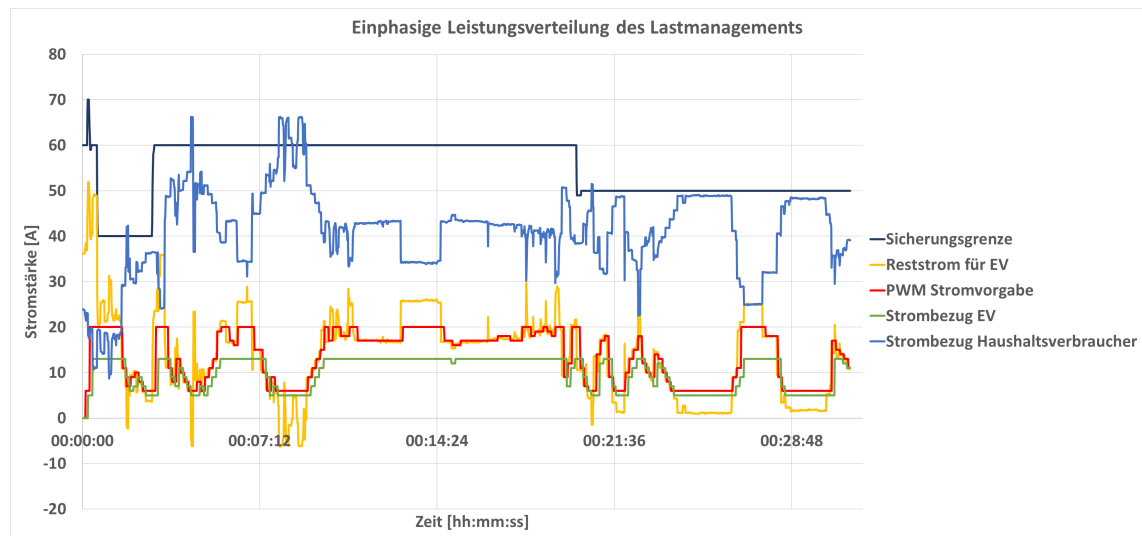


Abbildung 7.13.: Leistungsverteilung des Lastmanagements eines einphasigen Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges [23]

Es ist zu erkennen, dass der Strombezug der Haushaltsverbraucher inklusive der virtuellen Lasten fluktuierend auftritt. Dabei sind die virtuellen Lasten manuell zugeschaltet, sodass der Strombezug möglichst unterhalb der Sicherungsgrenze liegt. Die Differenz der Sicherungsgrenze und dem Strombezug der Haushaltsverbraucher ergibt den Reststrom, der von dem Elektrofahrzeug bezogen werden kann. Der Betrag des Stromwertes wird per Pulsweitenmodulation des Ladekontrollers dem Elektrofahrzeug vorgegeben (siehe Kapitel 5.3.2). Die Grenzen der Stromvorgabe der Pulsweitenmodulation werden einerseits durch die Stromtragfähigkeit des Ladekabels, andererseits durch die Limitierung der Pulsweite des Kontrollers festgelegt.

In der Darstellung ist deutlich das reziproke Verhalten des Reststromes für das Elektrofahrzeug zu dem Strombezug der Haushaltsverbraucher und der Sicherungsgrenze zu erkennen. Die davon abhängige PWM-Stromvorgabe weist den selben Verlauf auf, wie der vorgegebene Reststrom. Dies beweist die Funktionalität der Ladestromvorgabe der Elektrofahrzeuge durch das Lastmanagement.

Eine höhere Auflösung des Regelungsvorganges ist in Abbildung 7.14 dargestellt. Es ist deutlich die Reaktion der PWM-Stromvorgabe und des Strombezugs des Fahrzeugs auf den fluktuierenden Reststrom zu erkennen. Die Reaktionszeit liegt dabei bei wenigen Sekunden, welches sich durch die Reaktionszeiten der einzelnen Bauteile begründen lässt. Außerdem bewirkt die Auflösung der Datenaufnahme Ungenauigkeiten, welche die Reaktionszeit des Managementsystems verfälschen. Einerseits ist eine maximale Auflösung von einer Sekunde durch den Datenlogger der speicherprogrammierbaren Steuerung möglich, wodurch kurze Stromänderungen unterhalb einer Sekunde, welche zu einem neuen Zustand führen und dann wieder zu dem Ausgangszustand, nicht erfasst werden können. Außerdem dauert die Darstellung, der eingestellten Werte des Ladekontrollers der Wallbox, einige

Sekunden, weshalb eine Reaktionszeit, des Strombezugs des Elektrofahrzeugs auf eine Reststromänderung, von einigen Sekunden festgestellt wird.

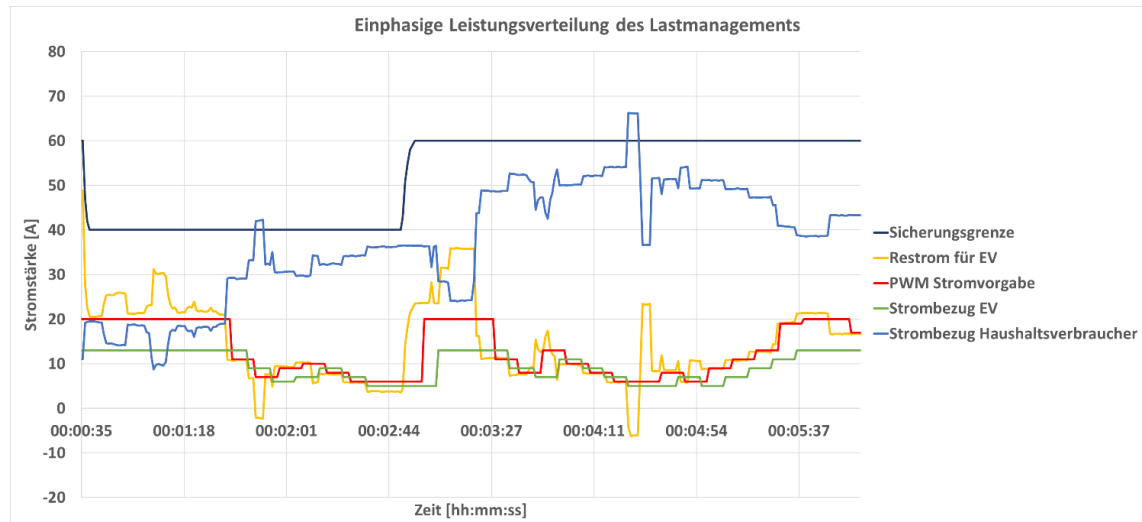


Abbildung 7.14.: Ausschnitt der Leistungsverteilung des einphasigen Ladevorganges [23]

7.4. Lastkurve des Gebäudes bei dynamischer Regelung multipler Ladevorgänge

Für die Lastverteilung mehrerer Fahrzeuge muss auf einige Faktoren geachtet werden. Dabei sollte der Reststrom gleichmäßig auf die Elektrofahrzeuge aufgeteilt werden. Es kann jedoch ein unterschiedlicher Reststrom für die Fahrzeuge vorgegeben werden, wenn ein unterschiedlich hoher maximaler Ladebezugsstrom der Fahrzeuge festgestellt wird. Außerdem ist auf den Phasenbezug der Fahrzeuge und deren kritische Sicherungsebene zu achten. Der Reststrom kann unterschiedlich für die drei Phasen sein, wobei ein unterschiedlicher Phasenbezug der Fahrzeuge, auch eine unterschiedliche Ladestromvorgabe bedeutet. Aus diesem Grund kann die Ladeleistung der Fahrzeuge differierend sein. In Abbildung 7.15 ist der Zusammenhang der Strombezüge und -zuordnung der Wallboxen anhand eines Beispiels zwei ladender Elektrofahrzeuge dargestellt. Die Sicherungsebene ist bei diesem Beispiel die Niederspannungshauptverteilung, wobei die Sicherungsgrenze bei 30 A gesetzt ist. Der Strombezug der Verbraucher ist überwiegend negativ, da die Photovoltaikanlage an diesem Verteilerstrang angeschlossen ist. Damit in diesem Beispiel eine Regelung der Fahrzeuge durchgeführt werden kann, sind virtuelle Lasten hinzugefügt worden, welche der Photovoltaikeinspeisung entgegenwirken. Das Zuschalten der virtuellen Lasten ist durch einen Stromsprung bei etwa 00:01:20 und 00:02:00 zu

erkennen. Durch die fluktuierende Einspeisung der Photovoltaikanlage und dem Verbrauch der Hausbewohner, variiert die Stromstärke der Phasen zwischen Einspeisung und Bezug um den Nullpunkt. Daraus ergibt sich ein fluktuierendes Verhalten des Reststromes der Phasen um die Stromgrenze der Sicherungsebene.

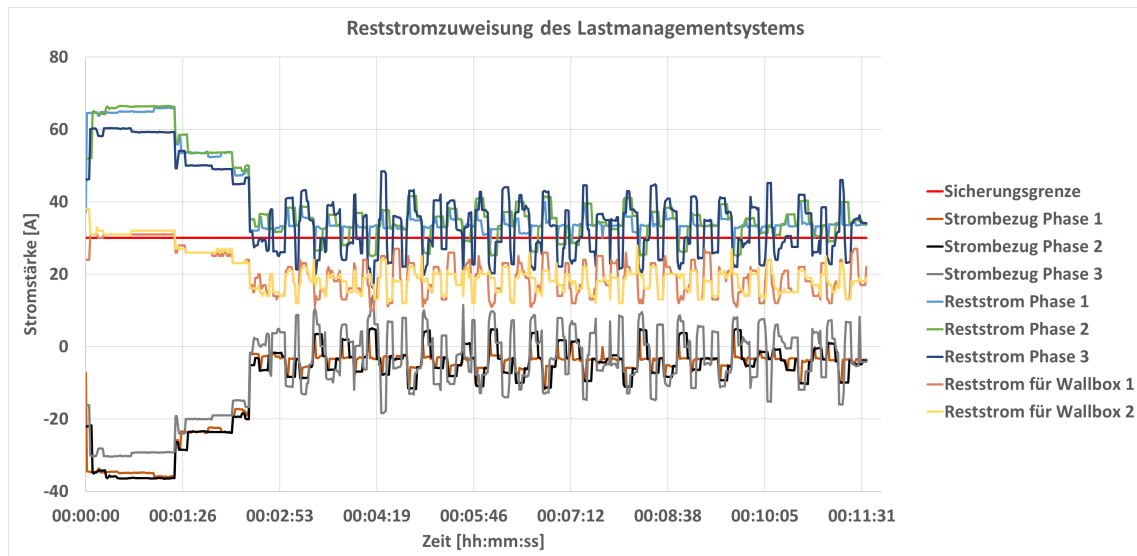


Abbildung 7.15.: Zusammenhang der Sicherungsebene, dem Strombezug, des Reststromes und der Reststromzuweisung der Wallboxen [23]

Das volatile Verhalten des Strombezugs ist in der Zuteilung des Reststromes der Wallboxen wieder zu erkennen. Diese weisen eine unterschiedliche Reststromverteilung auf, da ein Fahrzeug einen einphasigen und das andere einen dreiphasigen Strombezug hat.

Die Zuteilung des Reststromes für die Wallboxen und die eingestellte Ladestromvorgabe der Fahrzeuge sind in Abbildung 7.16 und Abbildung 7.17 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine unterschiedliche Reststromvorgabe für die Wallboxen eingestellt ist.

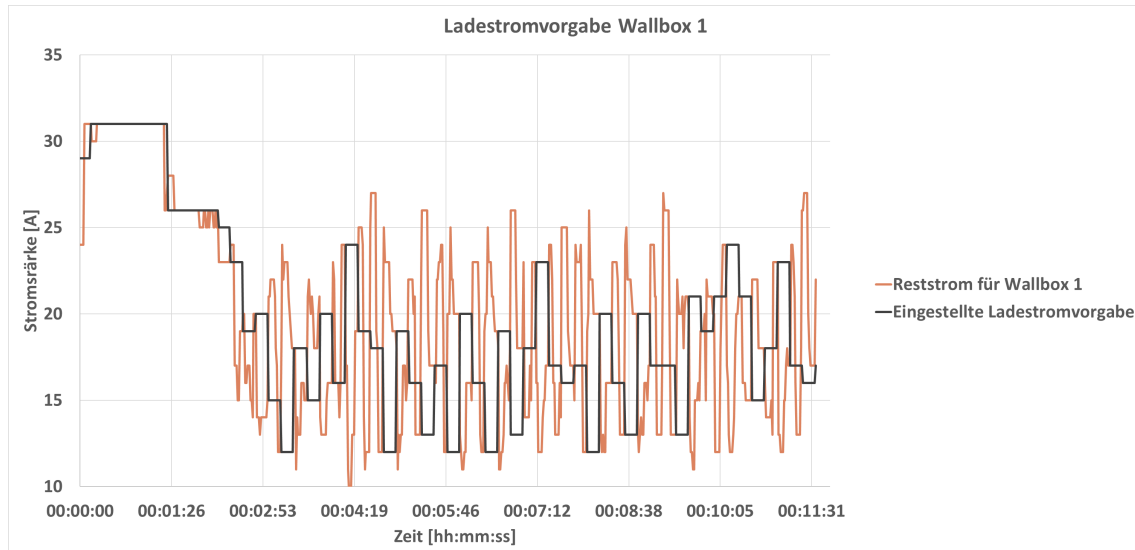


Abbildung 7.16.: Zuteilung des Reststromes der Wallbox 1 durch das Lastmanagement bei einem dreiphasigen Strombezug bis 32 A [23]

Abbildung 7.16 zeigt die Ladestromvorgabe eines dreiphasigen Strombezuges mit maximal 32 A. Die eingestellte Ladestromvorgabe weist eine Verzögerung zu dem Reststrom auf, welcher der Wallbox zum Laden des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt wird. Dies lässt sich auf die Modbus-Kommunikation zurückführen, welche die Ladestromvorgabe erst nach einigen Sekunden einstellt. Dadurch ist eine hochfrequente Regelung der Wallboxen durch das Lastmanagement nicht möglich. Es ist zu erkennen, dass der Wert des Reststromes zum Abfragezeitpunkt eingestellt wird. Anhand dieser Eigenschaft und dem Verhalten der hochfrequenten Reststromvorgabe ist eine deckungsgleiche Einstellung der Ladestromvorgabe zum Reststrom durch das Lastmanagement nicht möglich.

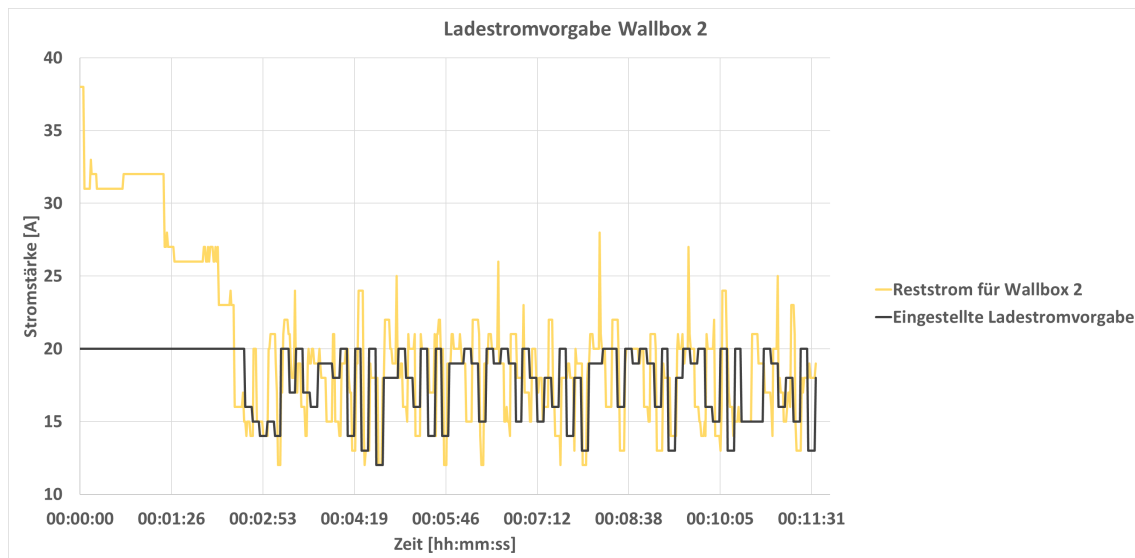


Abbildung 7.17.: Zuteilung des Reststromes der Wallbox 2 durch das Lastmanagement bei einem einphasigen Strombezug bis 20 A [23]

In Abbildung 7.17 ist die gleiche Verzögerung des Ladestromes zum Reststrom zu erkennen. Ein Unterschied zu der Ladevorgabe in Abbildung 7.16 ist, dass der vorgegebene Reststrom geringer ist. Dies lässt sich durch den einphasigen Ladestrombezug mit einem Ladestromlimit von 20 A begründen. Das Lastmanagement weist der ersten Wallbox den Reststrom zu, welcher von dem Fahrzeug an der zweiten Wallbox durch die Ladestromlimitierung nicht genutzt werden kann.

In Abbildung 7.18 und Abbildung 7.19 sind die Ladestrombezüge der Fahrzeuge an den Wallboxen eins und zwei aufgeführt. Es sind die gleichen Charakteristika wie in Kapitel 6.3.3 auszumachen. Der Strombezug ist ein wenig geringer als die Ladestromvorgabe. Ebenso weist die Einstellung des Strombezuges auf eine Änderung der Ladestromvorgabe eine geringe Verzögerung auf.

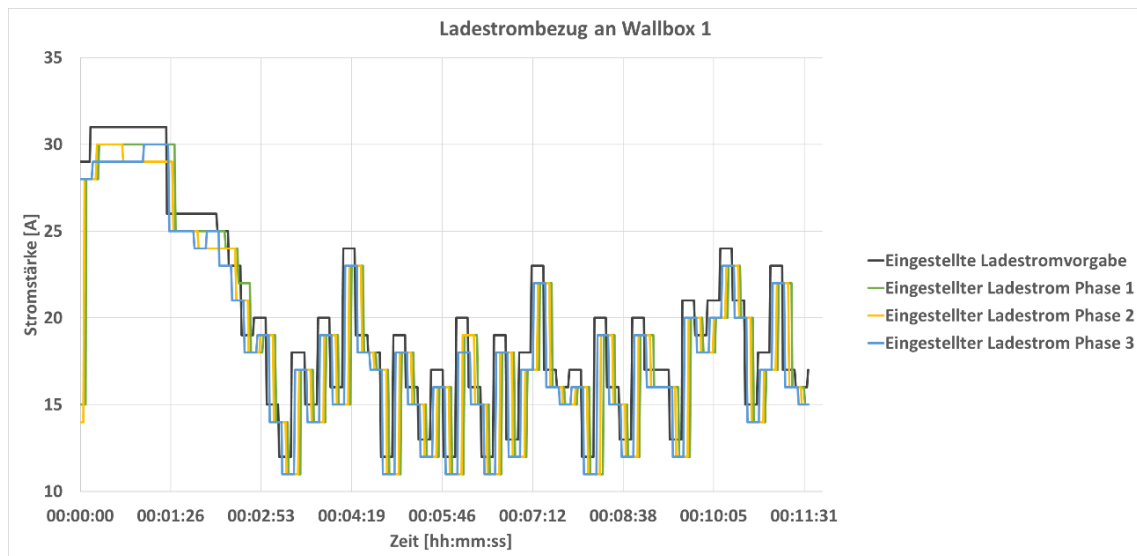


Abbildung 7.18.: Dreiphasiger Ladestrombezug des Fahrzeugs an Wallbox 1 [23]

In Abbildung 7.19 ist auffällig, dass der Verlauf des Ladestrombezuges nicht genau dem Verlauf der Ladestromvorgabe entspricht. Grund dafür ist die hohe Frequenz der Ladestromvorgabe. Sie ist schneller als die Übertragungsrate der Daten über die Modbus-Kommunikation, wodurch eine genaue Erfassung des eingestellten Ladestromes nicht möglich ist.

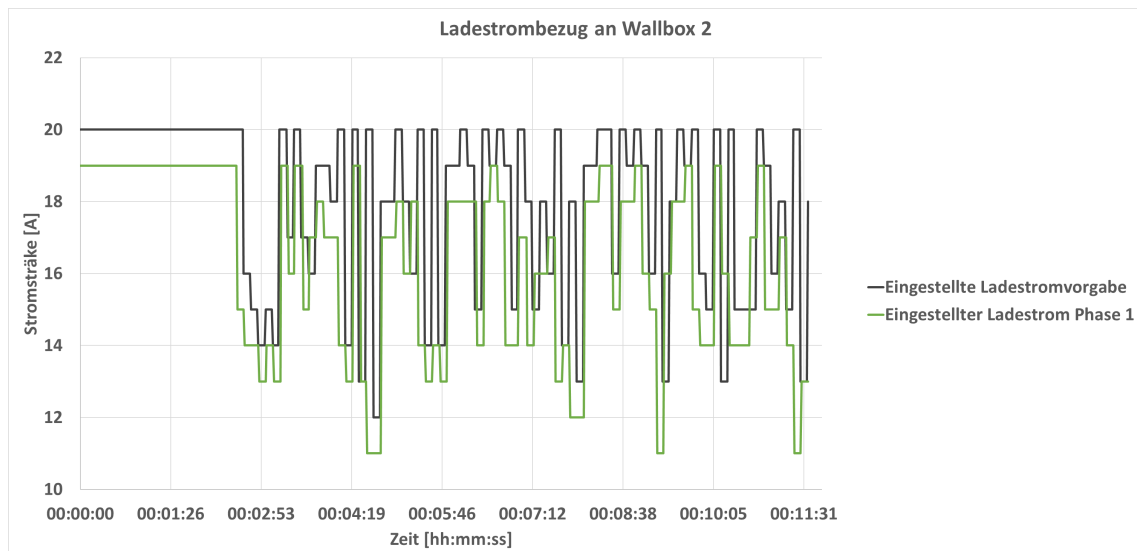


Abbildung 7.19.: Einphasiger Ladestrombezug des Fahrzeugs an Wallbox 2 [23]

7.5. Zwischenfazit des Lastmanagementsystems

Als Ergebnis der Testläufe des Lastmanagementsystems kann gesagt werden, dass eine dynamische Regelung der Ladeströme der Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit des Strombezuges an dem Hausanschluss und der Niederspannungshauptverteilung möglich ist. Die Ermittlung des Reststromes für die Fahrzeuge und die Zuweisung der Ladestromvorgabe ist für ein Fahrzeug oder mehrere durchführbar. Weitergehend ist eine dynamische Verteilung der Restströme der Wallboxen möglich, wenn der Strombezug eines Fahrzeugs geringer als der Vorgabestrom ist. Das führt dazu, dass der Reststrom besser verteilbar ist und eine optimale Ladestromvorgabe der Fahrzeuge erreicht wird. Eine schnelle Reaktion des Lastmanagementsystems auf Stromsprünge des Hausnetzes, welche mit hoher Frequenz auftreten, ist im geringen Maße möglich. Die Reaktionszeit des Lastmanagementsystems wird vor allem durch die Modbus-Kommunikationszeit mit den Ladekontrollern der Wallboxen bestimmt. Die Erfassung der Verbrauchsdaten und die Berechnung der Restströme pro Phase ist dagegen vernachlässigbar klein. In Kombination entsteht eine Reaktionszeit des Systems von wenigen Sekunden.

8. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Implementierung eines Lastmanagementsystems in ein Bestandsgebäude mit limitiertem Netzanschluss durchführbar ist. Anhand mehrerer Messstellen kann der Zustand des elektrischen Gebäudenetzes erfasst und eine Regelung der Ladestationen ausgeführt werden. Der Ladestrom der Fahrzeuge wird in Abhängigkeit der Gebäudelast und der Sicherungsgrenzen festgelegt. Dadurch ist eine dynamische Reaktion auf die fluktuierenden Leistungszustände möglich. Ein Auslösen der Sicherungen durch das Laden von Elektromobilen ist unterbunden und ein gesicherter Betrieb der Betriebsmittel gewährleistet.

8.1. Zusammenfassung

Messstellen:

Es können Daten der kritischen Komponenten und regelbaren Lasten aufgenommen werden. Die Erfassung der Daten geschieht anhand mehrerer Messstellen, welche in das Bestandsobjekt implementiert wurden. Die Daten an dem Hausanschluss und der Niederspannungshauptverteilung werden über Stromwandlerpulen gemessen, welche eine direkte Datenerfassung ohne Verzögerung garantieren. Das Lastmanagement kann auf hohe Auslastungen der kritischen Komponenten reagieren, sodass ein Auslösen der Sicherungen verhindert werden kann. Die Hauptanforderung des Lastmanagementsystems ist somit erfüllt. Die Sicherungsgrenze, ab der das Lastmanagementsystem reagieren soll, ist variable einstellbar, wodurch manuell eine Anpassung an verschiedene Betriebsweisen durchführbar ist. Weitergehend werden die Daten der nicht-regelbaren und regelbaren Lasten anhand von Smartmetern erfasst. Diese können mittels einer Direkt- oder Schnittstellenmessung an die speicherprogrammierbare Steuerung übertragen werden. Die Schnittstellenmessung wird über das Portal des Unternehmens anhand deren Programmierschnittstelle durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass eine genaue, phasenweise Datenerfassung der einzelnen Smartmeter im Intervall von zwei Sekunden möglich ist. Der Nachteil der Methode ist die Zuverlässigkeit und Latenz der Datenabfrage, welche abhängig von der Internetverbindung des Objektes sind. Sie bieten, durch Auftreten eines Abbruches oder einer langsamen Übertragungsrate der Verbindung, keine zuverlässige Datenversorgung des Lastmanagementsystems. Die Erfassung der Daten der Smartmeter über die Direktmessung bietet eine zuverlässige

sige Übertragung. Diese werden mittels eines Konverters über das lokale Informationsnetzwerk des Gebäudes zur speicherprogrammierbaren Steuerung gesendet. Dadurch wird eine Abhängigkeit der Internetverbindung vermieden. Außerdem erhöht dies den Datenschutz der Daten, da diese innerhalb des lokalen Netzwerkes übermittelt werden. Nachteilig ist die Summierung der Phasenströme, wodurch eine phasengesteuerte Leistungsregelung nicht durchführbar ist. Eine weitere Erfassung der Daten der regelbaren Lasten kann anhand einer Modbus-Abfrage des Ladekontrollers der Wallboxen durchgeführt werden. Dabei können die Daten der einzelnen Wallboxen mit geringer Verzögerung abgefragt werden. Eine gezielte Anpassung der Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit der prognostizierten Photovoltaikstrom-Generation konnte in dieser Arbeit nicht umgesetzt werden. Die Bedingungen der Informationen über die An-, Abfahrtzeit und den Ladestand der Fahrzeuge sind nicht von dem zuständigen Unternehmen zur Verfügung gestellt worden. Ein Unterbrechen und spätere Wiederaufnahme des Ladevorganges ist möglich, aber nicht für das gezielte „PEAK-Shaving“ der Photovoltaikeinspeisung implementiert. Die Fahrzeuge werden nach der aktuellen Einspeisung der Anlage geregelt, wodurch eine höhere Ladeleistung der Fahrzeuge bei hoher Stromgeneration der Photovoltaikanlage eingestellt werden kann.

Durch die verschiedenen Messmethoden ist es möglich den Zustand des Gebäudenetzes an den kritischen Komponenten zu erfassen. Diese Daten werden für die Umsetzung des Lastmanagementsystems benötigt, damit eine Regelung der Ladeleistung der Wallboxen festgelegt werden kann. Eine Adaption der Messmethoden ist gegeben, wenn die benötigte Technologie vorhanden ist. Dazu zählt die Datenerfassung der Verbräuche mittels Smartmeter und der Berechtigung der Datenerhebung.

Ladeverhalten der Elektrofahrzeuge:

Anhand des Testprogramms zur Autoerkennung können signifikante Charakteristika von Elektrofahrzeugen erkannt werden. Mittels dieser Daten ist eine Optimierung des Lastmanagements möglich, da eine Einteilung der Ladeströme der Fahrzeuge besser abgestimmt werden kann. Dadurch kann der Reststrom der kritischen Sicherungsebenen für jede Phase optimal zugeordnet werden. Weitergehend geben die Daten ein generelles Verständnis für den Ladevorgang und das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen.

Die eindeutigen Charakteristika der Fahrzeuge sind dabei die Leistungsgrenzen der Fahrzeuge und deren Phasenstrombezug. Bei den Leistungsgrenzen hat sich eine Varietät von Ladeströmen ergeben. Dies betrifft besonders die maximale Ladestromgrenze, wobei sich ein Ladestrombezug von 13 A bis 32 A herausgestellt hat. Bei der minimalen Ladestromgrenze ist der Ladestrom auf 6 A durch den Ladekontroller der Wallbox vorgegeben. Eine von außen gesteuerte Unterschreitung des Ladestroms ist nur durch ein Unterbrechen des Ladevorgangs möglich. Dadurch kann der Ladevorgang zeitlich entkoppelt werden, was eine Netzentlastung ermöglicht. Die Entkopplung kann dabei einige Minuten durchgeführt und durch ein kurzes Ansteuern über die digitale Kommunikation erneuert werden. Für die Regelung der Ladeströme zwischen den Ladestromgrenzen kann eine variable Vorgabe mit 1

A-Schritten vorgegeben werden. Ebenso sind große Ladestromsprünge von minimaler zur maximaler Ladestromgrenze möglich. Die Einstellung des neuen Wertes bei großen Ladestromsprünge ist von der Stromänderungsrate des Fahrzeugs abhängig. Für die getesteten Fahrzeuge liegt eine Ladestromänderung von der minimalen zur maximale Ladestromgrenze bei einer Sekunde. Eine genaue Definition ist durch die Auflösung des Dataloggers begrenzt, da dieser die Werte im ein-Sekundenintervall aufnimmt. Der Phasenbezug der Fahrzeuge ist durch den Hersteller und den Steckertypen definiert. Bei einem „Typ 1“ Stecker ist der Ladestrombezug auf eine Phase begrenzt. Ist ein „Typ 2“ Stecker vorhanden, kann der Phasenbezug ein-, zwei- oder dreiphasig sein. Anhand der Testverfahren ist verifizierbar, dass hohe Ladeströme bei Drehstromladung verwendet wird. Für ein- und zweiphasigen Ladestrombezug ist meist ein maximaler Ladestrom von 20 A möglich. Dies gilt vor allem für neuere Modelle. Daraus lässt sich schließen, dass die Automobilhersteller das Schieflastkriterium der VDE-4105 berücksichtigen.

Lastmanagementsystem:

Das erstellte Lastmanagementsystem ist in der Lage den aktuellen Zustand des Gebäudenetzes zu erfassen und eine Regelung der Ladestationen zu realisieren. Es werden die gemessenen Daten ausgewertet und eine Zuteilung des Stromes für jede Ladestation berechnet. Dies wird durch die Erfassung der kritischen Sicherungsebene, die Anzahl des Ladestrombezugs der Fahrzeuge und dem vorhandenen Reststrom pro Phase durchgeführt. Bei den Sicherungsebenen handelt es sich um die Abstufung der Sicherungen vom Hausanschluss, über die Niederspannungshauptverteilung, bis zu den Wohnungssicherungen. Die kritische Sicherungsebene wird durch die Sicherungsgrenze der Sicherungsebene und deren Lasten bestimmt. Es ist eine manuelle Einstellung der Sicherungsgrenze möglich, wodurch der Strombezug der Elektrofahrzeuge limitiert werden kann. Eine hohe Auslastung des Gebäudenetzes durch Elektrofahrzeuge ist jedoch nicht untersucht, weshalb die Sicherungsgrenze bei 50 Prozent des Stromes für die Sicherungen der Ebene eins und zwei eingestellt wird. Die Differenz der Sicherungsgrenze und dem Strombezug der Gebäudelasten bildet den Reststrom, welcher für die Ladung der Elektrofahrzeuge zur Verfügung steht. Dabei wird der Reststrom gleichmäßig auf die Ladestationen verteilt, an denen ein Elektromobil geladen wird. Die Stromvorgabe der Ladestationen wird anhand der Strombezugsphase des Fahrzeugs mit dem geringsten Reststrom der kritischen Sicherungsebene bestimmt. Aus diesem Grund wird der zugeteilte Reststrom der anderen Phasen nicht genutzt, sodass dieser für die Ladung anderer Fahrzeuge zur Verfügung gestellt werden kann.

Das Lastmanagementsystem kann den Ladestrom mehrerer Fahrzeuge begrenzen, wodurch ein Auslösen der Sicherungen verhindert wird. Dadurch ist ein sicherer Ladevorgang mehrerer Fahrzeuge gegeben, ohne einen Stromausfall des Gebäudes hervorzurufen.

Da die Lastkurven der Gebäudelasten fluktuierend sind, muss eine dynamische Anpassung der Ladeströme durchgeführt werden. Dies ist durch das Lastmanagementsystem gegeben. Eine Reaktion auf Stromsprünge ist innerhalb weniger Sekunden möglich, indem die Ladeleistung der Fahrzeuge vari-

iert wird. Dadurch wird einerseits eine Überlastung der Komponenten verhindert, andererseits eine gleichmäßigere Belastung des Gebäudenetzes erreicht. Weitergehend wirkt sich dies auf das Niederspannungsnetz aus, da eine gleichmäßigere Belastung das Netz entlastet.

8.2. Grenzen und Verbesserungen des Systems

Managementsysteme für Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Daher ist eine Weiterentwicklung und Verbesserung des Systems in mehrfacher Hinsicht möglich. Eine aussagekräftige Bewertung der Grenzen und Auslastung des Systems kann erst nach einem Ausbau der Tiefgarage mit mehreren Ladestationen getroffen und anhand des Verhalten der Ladestromverteilung eine Anpassung des Systems durchgeführt werden.

Die Grenzen des derzeitigen Systems liegen vor allem in der Reaktionszeit auf Veränderungen des Lastbezuges im Gebäudenetz. Das Lastmanagementsystem stellt erst nach einigen Sekunden eine neue Stromvorgabe für die Ladestationen ein. Wird innerhalb dieses Zeitbereiches eine hohe Last zugeschaltet, wird dieser durch die Regelung der Ladestromvorgabe des Systems verzögert entgegengewirkt. Dies gilt ebenfalls bei hohen Stromsprüngen in kurzen Intervallen. Liegt ein mehrfach variierender Strombezug der Lasten unterhalb der Reaktionszeit des Lastmanagements vor, kann eine angepasste Regelung der Ladestationen nicht ausgeführt werden. Grund dafür ist die Abfragezeit der Modbus-Kommunikation zwischen der Speicherprogrammierbaren Steuerung und dem Ladekontroller der Wallboxen. Die Vorgabe und Einstellung des Ladestromes machen einen wesentlichen Anteil der Reaktionszeit aus. Bei einer schnelleren Kommunikation wäre eine kürzere Reaktionszeit des Lastmanagementsystems möglich. Dies wäre durch eine Direktmessung der Daten der Wallboxen mittels Stromwandlerspulen umsetzbar.

Eine weitere Einschränkung ist die Abfrage der Smartmeterdaten über die Programmierschnittstelle des Herstellers. Die Abfrage ist nicht beständig, was durch die Datenübertragung über das Internet hervorgerufen wird. Dies kann zu zeitlichen Verzögerungen des Datentransfers, bis zu einem kompletten Abbruch der Kommunikation führen. Von Seiten des Herstellers ist eine neue Programmierschnittstelle entwickelt worden, welche einen stabileren Datentransfer garantiert. Eine Abfrage der Daten über die neue Programmierschnittstelle ist jedoch derzeit nicht mittels der speicherprogrammierbaren Steuerung möglich.

Bei Ausfall der speicherprogrammierbaren Steuerung ist eine Regelung der Wallboxen durch Abschaltung gesichert, damit ein ungesteuerter Strombezug der Fahrzeuge verhindert wird. Die Wiederaufnahme des Lastmanagementsystems kann nur manuell durchgeführt werden. Das bedeutet die

Durchführung eines Neustarts des Systems vor Ort. In Hinblick auf eine Verbreitung des Systems sollte dies fernsteuerbar sein.

Eine Optimierung der Laderegulierung kann durch einen Vergleich des Leistungsbezuges der Fahrzeuge umgesetzt werden. Derzeit wird der Ladevorgabestrom der Fahrzeuge anhand des Reststromes der Phasen bestimmt. Dadurch kann eine ungleiche Leistungsverteilung auftreten. Ist die kritische Sicherungsebene von zwei Fahrzeugen gleich, wird der Reststrom gleichermaßen aufgeteilt und der Ladestrom vorgegeben. Bezieht ein Fahrzeug den Ladestrom einphasig und das andere dreiphasig, ist die Ladeleistung bei dreiphasigen Bezug um Faktor drei höher. Für eine höhere Akzeptanz des Lastmanagements durch die Bewohner ist eine gleichmäßige Lastverteilung der Fahrzeuge durchzuführen.

8.3. Ausblick

Das System reagiert aktiv auf die Verteilung des Reststromes, welcher für die Elektrofahrzeuge bereitgestellt wird, wodurch passiv eine gleichmäßige Belastung des Gebäudenetzes erreicht wird. Dies kann eine Verhinderung der Phasenschiefasten hervorrufen. Dies wird jedoch nicht aktiv durchgeführt, wodurch ein Auftreten von Schiefasten vorkommen kann. Eine Weiterentwicklung des Lastmanagementsystems kann aktiv eine Schiefast verhindern, indem Ladeströme an der Phase mit hoher Auslastung gedrosselt und Ladeströme an den Phasen mit geringer Auslastung erhöht werden. Die Grundlage der Mess- und Regelgrößen sind bereits im Lastmanagementsystem implementiert. Dies kann weitergeführt werden, indem eine Bestimmung des Zustandes des Niederspannungsnetzes erfasst wird. Das Lastmanagementsystem kann, mittels Regelung der Ladeleistung der Fahrzeuge, aktiv eine Entlastung des Niederspannungsnetzes bewirken. In Kombination mehrerer Lastmanagementsysteme innerhalb eines Niederspannungsverteilnetzes ist eine automatisierte Regelung des Netzes möglich. Dabei kann einer hohen Auslastung oder Schiefast von dezentralen Energieerzeugern entgegengewirkt werden.

Für die Akzeptanz der Elektrofahrzeugbesitzer können verschiedene Vorgaben für die Einstellung des Ladestromes umgesetzt werden. Neben der gleichberechtigten Leistungsverteilung, kann eine prioritäre Vergabe der Ladeströme durchgeführt werden. Die Möglichkeiten einer zeitlichen oder wählbaren Priorität wurden in das Programm eingefügt, jedoch nicht auf Ihre Funktion getestet. Diese können erweitert und durch weitere Lademöglichkeiten ergänzt und getestet werden.

Zudem kann bei den Ladevorgängen ein erhöhter Anteil an Grünstrom erreicht werden, indem die Fahrzeuge bei hoher Stromgenerierung dezentraler erneuerbarer Energieerzeuger geladen werden. Hinsichtlich des Projektes ist eine Ladepriorität bei hoher Stromproduktion der Photovoltaikanlage möglich. Die Fahrzeuge werden bei hoher Stromgenerierung der Photovoltaikanlage geladen und bei

geringer Stromproduktion der Ladevorgang unterbrochen. Voraussetzung sind die Informationen über die An- und Abfahrtszeiten der Elektrofahrzeuge und dessen Batterieladestand, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht von dem zuständigen Unternehmen zur Verfügung gestellt wurden. Mittels der Daten kann der Beginn, das Ende und die Ladeleistung der Fahrzeuge festgelegt werden

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Wirtschaft und Energie. Erneuerbare energien. In *Erneuerbare Energien sind die wichtigste Stromquelle in Deutschland und ihr Ausbau eine zentrale Säule der Energiewende. Unsere Energieversorgung soll klimaverträglicher werden und uns gleichzeitig unabhängiger vom Import fossiler Brenn-, Kraft- und Heizstoffe machen.*, 01.08.2018.
- [2] Umwelt Bundesamt. Europäische energie- und klimaziele. In *Die Europäische Union hat sich zu klima- und energiepolitischen Zielen verpflichtet unter der Maßgabe der Klimarahmenkonvention und verschiedener eigener Beschlüsse. Sie ist auf einem guten Weg, ihre kurzfristigen Ziele zu erreichen. Allerdings steigen die mittel- und langfristigen Zielwerte sehr viel steiler an, sodass verstärkte Anstrengungen unternommen werden müssen.*, 13.08.2018.
- [3] Bundesregierung. Kernkraft. In *Kernkraft – ein Auslaufmodell: Wie schaffen wir den Ausstieg? Wie werden alter Kernkraftwerke stillgelegt? Was ändert sich dadurch auf dem internationalen Energiemarkt.*, 01.08.2018.
- [4] Umweltbundesamt. Treibhausgas-emissionen. In *Emissionsquellen*, 15.08.2018.
- [5] ecomento.de. Autoindustrie. In *Weltweit knapp 6500 Wasserstoff-Elektroautos unterwegs*, 15.08.2018.
- [6] Nationale Plattform Elektromobilität. Mit elektromobilität nach vorn. In *Elektromobilität: Der Hintergrund*, 01.08.2018.
- [7] Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V. (ADAC). Fragen und antworten zum dieselfahrverbot. 13.07.2018.
- [8] Jens Eickelmann. *Wachstumsmotor Elektromobilität*. Phoenix Contact Deutschland GmbH, 2017.
- [9] Daniel Bönnighausen. Stromer-kompromiss: Neuer vw e-golf im fahrbericht. In *Reduzierte Ladeleistung per CCS*, 05.04.2017.

- [10] Volkswagen AG. Der e-golf. In *Technologie: e-Antrieb, Reichweite, Lademöglichkeit, Nachhaltigkeit*, 25.07.2018.
- [11] Smart. Eq fortwo. In *Technologie: e-Antrieb, Reichweite, Lademöglichkeit, Nachhaltigkeit*, 25.07.2018.
- [12] goingelectric.de. Elektroauto wiki. In *Hyundai Ioniq*, 25.07.2018.
- [13] goingelectric.de. Elektroauto wiki. In *Renault ZOE*, 25.07.2018.
- [14] goingelectric.de. Elektroauto wiki. In *Nissan Leaf 30 kWh (2016)*, 25.07.2018.
- [15] goingelectric.de. Elektroauto news. In *Wie schnell lädt der neue 30 kWh Nissan Leaf?*, 14.04.2016.
- [16] electrive.net. Energie & ladeinfrastruktur. In *Elon Musk: Tesla Supercharger V3 mit über 350 kW*, 03.01.2017.
- [17] Statista.com. Fahrzeuge & straßenverkehr. In *Marktanteile der größten Automarken in Deutschland im Juli 2018 gemessen an der Anzahl der Pkw-Neuzulassungen*, 14.08.2018.
- [18] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Energie & effizienz. In *Elektromobilität (Umweltbonus)*, 13.08.2018.
- [19] Daniel Bönnighausen. Automobil. In *eMobility-Dashboard Mai: 2.310 reine Elektro-Pkw*, 04.06.2018.
- [20] Mennekes Elektrotechnik GmbH & Co. KG. Frequently asked questions. In *Lastmanagement*, 25.07.2018.
- [21] Elektronik Informationstechnik (VDE) Verband der Elektrotechnik. Din vde 0100. In *Gliederung der Normenreihe DIN VDE 0100 Errichten von Niederspannungsanlagen*, 13.08.2018.
- [22] Deutsches Institut für Normung (DIN). Din 18015. In *Elektrische Anlagen in Wohngebäuden - Teil 5: Luftdichte und wärmebrückenfreie Elektroinstallation*, 01.09.2018.
- [23] André Kores. Eigens erstellte darstellung. In *Darstellungen sind im Rahmen dieser Arbeit erstellt worden.*, 13.08.2018.
- [24] Autoflotte. Elektrifizierung. In *Fünf Fakten zum induktiven Laden*, 02.07.2018.

- [25] Statistika. Fahrzeuge & Straßenverkehr. In *Anzahl der Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Zeitraum 1. Quartal 2017 bis 3. Quartal 2018*, 01.08.2018.
- [26] Dr. Marc Mültin. Intelligentes laden über iso/iec 15118. In *Potentiale und Funktionsweise des Standards*, 18.06.2018.
- [27] *EV Charge Control Normkonforme Ansteuerung der Schnittstellen Control Pilot und Proximity Plug zwischen Elektrofahrzeug und Ladestation*.
- [28] CCC. Ccc-zertifizierung (china compulsory certification). In *CQC: Neuer GB-Standard für die freiwillige Zertifizierung von Anschlusselementen von induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge*, 30.07.2018.
- [29] CCC. Ccc-zertifizierung (china compulsory certification). In *GB Standards*, 30.07.2018.
- [30] ecomento.de. Aufladen & tanken, technik. In *Tesla: "350-kW-Lader ergeben nicht wirklich Sinn"*, 08.05.2018.
- [31] goingelectric.de. Elektroauto news. In *CHAdeMO 2.0 ermöglicht bis zu 400 kW Ladeleistung*, 20.06.2018.
- [32] Wikipedia. Combined charging system. In *Fahrzeugkupplung einer Combo-2-Schnellladestation*, 13.08.2018.
- [33] Marc Mültin. *Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home*. PhD thesis, Karlsruher Instituts für Technologie, 18.07.2014.
- [34] ITWissen.info. Iso 15118. In *Ladestationen werden für das Aufladen der Lithium-Ionen-Akkus von Elektrofahrzeugen benutzt. Neben der konventionellen Ladetechnik arbeitet die Internationale Standardisierungs-Organisation (ISO) an einem Standard für Smart Charging: ISO 15118. Beim intelligenten Laden kommuniziert die Ladestation mit dem Ladesteuergerät des Elektromobils.*, 16.06.2018.
- [35] International Organization for Standardization (ISO). Iso 15118-8:2018. In *Road vehicles – Vehicle to grid communication interface – Part 8: Physical layer and data link layer requirements for wireless communication*, 18.06.2018.
- [36] Sarah Detzler. *Lademanagement für Elektrofahrzeuge*. PhD thesis, Karlsruher Instituts für Technologie, 31.05.2016.

- [37] cantamen GmbH. Ebus softwarelösungen. In *Das umfassende System zur Bewirtschaftung Ihres Fuhrparks*, 25.06.2018.
- [38] Energiewendeplaner GmbH. Ausschnitt des Strombaumes des Gebäudes. 25.06.2018.
- [39] Frank Müller. Wago kontakttechnik gmbh. In *Workshop*, 17.05.2018.
- [40] Prof. Urbas. Din en 61131. In *Ein vereinheitlichendes Modell einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS)*, 21.06.2018.
- [41] Prof. Dr. Seitz. Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik- und Prozessautomation. In *Strukturierte und objektorientierte SPS-Programmierung, Motion Control, Sicherheit, vertikale Integration*, 21.06.2018.
- [42] Wago Kontakttechnik GmbH. Engineering-Software: e!cockpit. In *Programmieren und Konfigurieren mit der Engineering-Software e!COCKPIT*, 25.06.2018.
- [43] 3S-Smart Software Solutions GmbH. Controller development system (codesys). In *CODESYS Development System das IEC 61131-3 Programmierwerkzeug für die industrielle Steuerungs- und Automatisierungstechnik*, 25.06.2018.
- [44] WAGO - e!cockpit - Software Manual.
- [45] Discovery GmbH. Discovery smart meter gateway. In *Meterit - Sichere Kommunikation für intelligente Messsysteme*, 13.08.2018.
- [46] Björn Behrendt. Application-programming-interface (api). In *Was ist eine API?*, 25.06.2018.
- [47] Network Working Group. Hypertext transfer protocol – http/1.1. In *Method Definitions*, 26.06.2018.
- [48] Discovery GmbH. Json api. In *API Documentation*, 25.06.2018.
- [49] Discovery GmbH. Rest api. In *API Documentation*, 25.06.2018.
- [50] Internet Engineering Task Force (IETF). Informational. In *The OAuth 1.0 Protocol*, 01.04.2010.
- [51] Kompendium.infotip.de. RS-232 - die serielle Schnittstelle. In *Serielle Schnittstellen*, 02.07.2018.
- [52] androegg.de. Hilink converter RS485 zu Ethernet. In *IoT WLAN Wifi UART openWRT 8MB Flash 32MB Ram Router Board*, 02.07.2018.

- [53] Discovery GmbH. Discovery zählerdaten auf dem knx-bus. In *RS485-Kabel*, 15.08.2016.
- [54] Elektronik Informationstechnik (VDE) Verband der Elektrotechnik. Vde-ar-n 4105 anwendungsregel:2011-08 erzeugungsanlagen am niederspannungsnetz. In *Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, 01.08.2011.
- [55] SMA Solar Technology AG. Vde-anwendungsregel 4105. In *Basisanforderungen*, 01.09.2012.
- [56] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Publikation der deutschen versicherer zur schadenverhütung. In *Ladestationen für Elektrostraßenfahrzeuge*, 22.07.2018.
- [57] Kfz-Tech. Alternative antriebe. In *Was versteht man unter Hybrid Technik?*, 14.07.2018.

Abbildungsverzeichnis

3.1. Bruttostromerzeugung in Deutschland 2017 in TWh [1]	11
4.1. AC-Ladeleistung ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]	16
4.2. DC-Ladeleistung ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 12, 15, 16]	17
4.3. Batteriekapazität ausgewählter Elektrofahrzeuge [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]	18
4.4. Zahl der batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-in-Hybride sowie Range Extender in Deutschland [6]	19
4.5. Neuzulassungen von batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybride in Deutschland [19]	20
4.6. Systemansätze zum Laden eines Elektrofahrzeugs [8, S.91]	21
4.7. Topologie der Komponenten beim Wechselstromladen [8, S.95]	23
4.8. Topologie der Komponenten beim Gleichstromladen [8, S.97]	24
4.9. Belastung eines Systems ohne Lastmanagement [8, S.150]	25
4.10. Belastung eines Systems mit statischem Lastmanagement [8, S.152]	26
4.11. Belastung eines Systems mit dynamischen Lastmanagement [8, S.152]	27
5.1. Aufbau der Sicherheitsabschaltung des Lademanagements[23]	29
5.2. Anschlussfälle des konduktiven Steckersystems nach IEC 61851-1 [8, S.119]	31
5.3. Überblick der normierten Steckersysteme für die AC-, DC- und kombinierte Ladung [27]	32
5.4. Pinbelegung des Typ 2 Steckersystems [27]	33
5.5. Pinbelegung des Combo 2 Steckersystems [32]	34
5.6. Schema der Messung bei der "Proximity PlugAbfrage [27]	36
5.7. Kodierung des zulässigen Stromes zum Widerstand nach IEC 61851-1 [27]	36
5.8. Pulsweitensignal der Kommunikation eines Ladevorganges [33]	38
5.9. Schaltplan einer Kopplung eines Elektromobils mit einer Ladestation nach IEC-61851 [27]	39
5.10. Tastverhältnis der Pulsweitenmodulation für die Ladestromvorgabe nach IEC-61851 [27]	40
6.1. Systematischer Aufbau des Strombaumes des Bestands-Gebäudes [38]	44

6.2. Systematischer Aufbau des Lademanagementsystems [23]	47
6.3. Pinbelegung der Verbindung des Konverters der RS-485 Schnittstelle mit einem RJ10-Stecker [53]	53
6.4. Verteilung des Ladestromes durch das Lademanagementsystem [23]	55
6.5. Verlauf des Testverfahrens zur Autocharakterisierung [23]	62
6.6. Erfassung der Stromänderungsrate der Elektrofahrzeuge [23]	66
7.1. Beispiel einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 1 des Programms zur Autoerkennung [23]	68
7.2. Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 2 mit einer fallenden Flanke des Programms zur Autoerkennung [23]	69
7.3. Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 2 mit einer steigenden Flanke des Programms zur Autoerkennung [23]	70
7.4. Unterbrechung des Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges in Abhängigkeit der Zeit [23]	71
7.5. Unterbrechung des Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges in Abhängigkeit des Ladestromes [23]	72
7.6. Teilausschnitt eines Beispiels einer dreiphasigen Ladung des Testbereiches 4 des Programms zur Autoerkennung [23]	73
7.7. Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schieflast am Hausanschluss [23]	75
7.8. Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schieflast an der Zähleranlage 1 [23]	76
7.9. Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit hoher Schieflast an der Zähleranlage 3 [23]	77
7.10. Stromsprung an der Niederspannungshauptverteilung durch Anschluss eines Elektrofahrzeuges [23]	78
7.11. Stromsprung am Hausanschluss durch Anschluss eines Elektrofahrzeuges [23]	78
7.12. Ausschnitt eines Lastganges des Wohngebäudes mit Regelung des Phasenstroms 1 durch das Lademanagementsystem [23]	79
7.13. Leistungsverteilung des Lastmanagements eines einphasigen Ladevorganges eines Elektrofahrzeuges [23]	81
7.14. Ausschnitt der Leistungsverteilung des einphasigen Ladevorganges [23]	82
7.15. Zusammenhang der Sicherungsebene, dem Strombezug, des Reststromes und der Reststromzuweisung der Wallboxen [23]	83
7.16. Zuteilung des Reststromes der Wallbox 1 durch das Lastmanagement bei einem dreiphasigen Strombezug bis 32 A [23]	84
7.17. Zuteilung des Reststromes der Wallbox 2 durch das Lastmanagement bei einem einphasigen Strombezug bis 20 A [23]	85

7.18. Dreiphasiger Ladestrombezug des Fahrzeugs an Wallbox 1 [23]	86
7.19. Einphasiger Ladestrombezug des Fahrzeugs an Wallbox 2 [23]	86

A. Anhang

