

DIPLOMARBEIT

# Status, Bedarf und Potentiale der Umstellung eines Fuhrparks auf Elektromobilität und deren Auswirkungen auf das elektrische Bestandsnetz

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom Ingenieurs

unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik  
und  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Dominik Fasthuber

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von  
Matthias Maldet, BSc  
Matr.-Nr. 01604874  
Birkengasse 11  
2624 Breitenau

Breitenau, 3. Februar 2021

---

Matthias Maldet



## Danksagung

Mit dieser Diplomarbeit geht für mich nach dem Bachelor- und Masterstudium an der Technischen Universität (TU) Wien ein langer Weg zu Ende. Gleichzeitig beginnt damit ein neuer Weg mit vielen zukünftigen Herausforderungen. Es ist deswegen an der Zeit, mich bei meinen wichtigsten Wegbegleitern zu bedanken.

Zu Beginn möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik bedanken, durch den mir die Durchführung der Diplomarbeit ermöglicht wurde. Ein weiterer besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Dominik Fasthuber und Christian Schirmer, welche mir durch umfangreiches Feedback und Hilfe bei aufkommenden Fragen eine problemlose Durchführung der Diplomarbeit ermöglicht haben. Zusätzlich möchte ich mich bei meinem Kollegen Andreas Kleinl bedanken, der immer für Fragen und fachliche Diskussionen zur Verfügung stand. Außerdem möchte ich mich bei meinem Studienkollegen Filip Milicevic bedanken, mit dem ich im Laufe meines Studiums zahlreiche Projektarbeiten durchführen konnte.

Ein weiterer Dank gilt meinen Eltern Thomas und Manuela Maldet, die mich während meiner gesamten Studienzzeit unterstützt haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Freundin Christina Schlögl. Die Liebe und der Rückhalt, die ich stets von ihr erfahren durfte, haben mir geholfen, meine Studienziele zu erreichen und diese Diplomarbeit fertig zu stellen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Notwendigkeit von Elektromobilität . . . . .	1
1.2	Projektziele . . . . .	2
1.3	Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Batteriespeicher . . . . .	5
2.1.1	Anforderungen an Batteriespeicher . . . . .	5
2.1.2	Lithium-Ionen-Batterie Aufbau . . . . .	9
2.1.3	Ladeverfahren von Elektroauto-Batterien . . . . .	12
2.2	Ladestandards in der Elektromobilität . . . . .	24
2.2.1	Ladegerät . . . . .	25
2.2.2	AC Laden einphasig . . . . .	26
2.2.3	AC Laden Dreiphasig . . . . .	30
2.2.4	AC Laden Zweiphasig . . . . .	33
2.2.5	Gleichstromladen . . . . .	33
2.2.6	Weitere nichtkabelgebundene Lademöglichkeiten . . . . .	37
2.2.7	Zusammenfassung der Technologien . . . . .	38
2.2.8	Modelle von Elektroautos . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Rahmenbedingungen</b>	<b>41</b>
3.1	Aufbau des SEM3-Messsystems . . . . .	41
3.1.1	Verbindung Schaltschrank - Garage . . . . .	43
3.1.2	Beschreibung der Module . . . . .	45
3.1.3	Weiterverarbeitung der Messdaten . . . . .	48
3.2	Power Quality Messung mit Haag Combi-Quant . . . . .	48
3.2.1	Netzurückwirkungen . . . . .	50
3.2.2	Durchführung der Power Quality Messung . . . . .	51
3.2.3	Ziele der Power Quality Messung . . . . .	52
3.3	Aviloo Messsystem . . . . .	56
3.3.1	Verwendung des Messsystems . . . . .	56
3.3.2	Darstellung der Daten . . . . .	57
3.4	Vorhandene Fahrzeuge . . . . .	59

3.5	Vorhandene Ladesäulen . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b>	<b>63</b>
4.1	Messung der Fahrprofile . . . . .	63
4.1.1	Fahrprofilmessung BMW i3 . . . . .	63
4.1.2	Fahrprofilmessung VW e-Golf . . . . .	69
4.1.3	Vergleich der Fahrprofile . . . . .	71
4.2	Messung der Ladevorgänge . . . . .	72
4.2.1	Ladevorgang BMW i3 . . . . .	72
4.2.2	Schnellladen BMW i3 . . . . .	75
4.2.3	Ladevorgang VW e-Golf . . . . .	77
4.2.4	Überprüfen der Annahme der Temperaturabhängigkeit . . . . .	82
4.2.5	Schnellladen VW e-Golf . . . . .	85
4.2.6	Laden an Schuko-Steckdose VW e-Golf . . . . .	87
4.2.7	Vergleich Ladekurven . . . . .	88
4.3	Datenerhebung aus den Messungen . . . . .	90
4.3.1	Erhebung der Fahrten . . . . .	90
4.3.2	Erhebung der Ladevorgänge . . . . .	96
4.3.3	Erhebung der Gleichzeitigkeiten . . . . .	106
4.4	Messung der Abgänge . . . . .	112
4.4.1	Spannung der Abgänge . . . . .	112
4.4.2	Ladevorgang VW e-Golf (einphasig) . . . . .	114
4.4.3	Ladevorgang VW e-Golf (dreiphasig) . . . . .	117
4.4.4	Ladevorgang VW e-Golf (Schnellladen) . . . . .	118
4.4.5	Ladevorgang BMW i3 (einphasig) . . . . .	124
4.4.6	Ladevorgang BMW i3 (dreiphasig) . . . . .	126
4.4.7	Ladevorgang BMW i3 (Schnellladen) . . . . .	131
<b>5</b>	<b>Auswertung der Messergebnisse</b>	<b>135</b>
5.1	Lademanagement . . . . .	135
5.1.1	Definition und Ziele von Lademanagement . . . . .	135
5.1.2	Betrachtung der Ladevorgänge . . . . .	137
5.1.3	Regeln für das Lademanagement im Fuhrpark . . . . .	138
5.1.4	Prüfung der Auswirkung von Lademanagement . . . . .	139
5.1.5	Betrachtung der Extremfälle . . . . .	140
5.1.6	Zusammenfassung Lademanagement . . . . .	141
5.2	Szenarienanalyse . . . . .	142
5.2.1	Umstellung auf 60 Prozent Elektromobilität . . . . .	143
5.2.2	Umstellung auf 90 Prozent Elektromobilität . . . . .	144
5.2.3	Optimierung des Fuhrparks . . . . .	145

5.3	Erweiterung der Messungen . . . . .	148
5.3.1	Erweiterung der aktuellen Messung . . . . .	148
5.3.2	Zusätzliche Messungen . . . . .	148
5.3.3	Erweiterung der Koordinierung . . . . .	149
5.3.4	Zusammenfassung Erweiterungen . . . . .	150
5.4	Auswirkung auf das Bestandsnetz . . . . .	151
5.4.1	Einführung . . . . .	151
5.4.2	Vorgehensweise . . . . .	152
5.4.3	Berechnung durchschnittlicher Tag . . . . .	155
5.4.4	Stark frequentierter Tag . . . . .	157
5.4.5	Extremfall - alle 11 Fahrzeuge laden gleichzeitig . . . . .	159
5.4.6	Vergleich Laden an 11 Kilowatt Ladepunkten . . . . .	164
5.4.7	Auswirkung Ladepunkte mit unterschiedlicher Nennleistung . . . . .	166
5.4.8	Auswirkung Schnelladesäule und Gleichzeitigkeiten . . . . .	170
5.4.9	Szenarienanalyse . . . . .	177
5.4.10	Ergänzung Ladesäulen extern . . . . .	187
5.4.11	Zusammenfassung Netzauswirkungen . . . . .	190
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>193</b>
6.1	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse . . . . .	193
6.2	Ausblick auf weitere Entwicklungen . . . . .	195
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>206</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>211</b>



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AC</b>	Wechselstrom
<b>BMS</b>	Batteriemanagement-System
<b>BMW</b>	Bayerische Motorenwerke
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CC</b>	Constant Current
<b>CCCV</b>	Constant Current Constant Voltage
<b>CCS</b>	Combined Charging System
<b>CHAdEMO</b>	Schnellladestandard, welcher in Japan entwickelt wurde
<b>CV</b>	Constant Voltage
<b>DC</b>	Gleichstrom
<b>DoD</b>	Depth of Discharge
<b>DSM</b>	Demand Side Management
<b>GLZ</b>	Gleichzeitigkeiten
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LS</b>	Ladesäule
<b>MSCC</b>	Multi Stage Constant Current
<b>NEFZ</b>	Neuer Europäischer Fahrzyklus
<b>NSHV</b>	Niederspannungs Hauptverteiler
<b>OBD</b>	On Board Diagnose
<b>OS</b>	Oberschwingungen

<b>RUL</b>	Remaining Use of Life
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition
<b>SOC</b>	State of Charge
<b>SOF</b>	State of Function
<b>SOH</b>	State of Health
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion
<b>TOR</b>	Technische und Organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen
<b>VW</b>	Volkswagen
<b>V2G</b>	Vehicle to Grid
<b>V2H</b>	Vehicle to Home
<b>WLTP</b>	Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Procedures

## Kurzzusammenfassung

Um den Anstieg der globalen Temperatur aufzuhalten ist es notwendig, die CO<sub>2</sub> Emissionen zu verringern. Dazu muss die Endnutzung der Energie in allen Sektoren komplett neu durchdacht werden. Der Transportsektor liefert dabei einen großen Beitrag zu den weltweit emittierten Emissionen. Elektromobilität gilt als mögliche Lösung, die Emissionen in diesem Sektor zu verringern.

In dieser Diplomarbeit wird beschrieben welche Auswirkung der Ausbau der Elektromobilität auf die elektrischen Energieversorgungsnetze hat. Es wird dabei erläutert, welcher Ausbau von Ladeinfrastruktur aus der Sicht der Netze möglich ist und wie sich unterschiedliche Ausbauszenarien auf das Stromnetz auswirken.

Um diese Fragestellungen beantworten zu können wird ein Fuhrpark, bestehend aus Elektrofahrzeugen und herkömmlichen Kraftfahrzeugen, untersucht. Es werden dabei Messungen bezüglich des Fahrverhaltens verschiedener Elektrofahrzeugmodelle, und Messungen bezüglich des Ladeverhaltens an Ladepunkten mit unterschiedlichen Nennleistungen durchgeführt. Aus diesen Messdaten werden Szenarien für die Erhöhung des Elektrofahrzeuganteils im betrachteten Fuhrpark abgeleitet. Um die Auswirkungen auf das Stromnetz zu untersuchen wird eine Lastflussrechnung durchgeführt.

Die Ergebnisse beinhalten die betrachteten Ausbauszenarien, eine Optimierung des betrachteten Fuhrparks, sowie deren Auswirkung auf das Stromnetz. Aus den Ergebnissen hat sich gezeigt, dass die Erhöhung des Elektrofahrzeuganteils und der Ausbau der Ladeinfrastruktur aus der Sicht des Netzes möglich sind. Welche Aspekte beim Ausbau berücksichtigt werden müssen, und wie stark die Auswirkungen der unterschiedlichen Szenarien auf das Stromnetz sind wird in dieser Arbeit beschrieben.

## Abstract

In order to halt the rise in global temperature, it is necessary to reduce CO<sub>2</sub> emissions. To achieve this, the energy end use in all energy sectors must be completely rethought. The transport sector is a major contributor to globally emitted emissions. Electromobility is considered as a possible solution to reduce emissions in this sector.

In this thesis, the impact of the electromobility expansion on the electrical energy networks is presented. It also describes, which extension of the charging infrastructure is possible from the point of view of the network, and how different extension scenarios affect the electrical energy grid.

In order to answer these questions, a vehicle fleet, consisting of electric vehicles and combustion engine vehicles, is examined. In doing so, measurements of the driving performance of different electric vehicle models, and measurements of the charging behavior at charging points with different charging powers are carried out. Different scenarios for increasing the electric vehicle share in the vehicle fleet are derived from these measured values. In order to investigate the impact on the electrical energy grid, a load flow calculation is performed.

The results include the considered extension scenarios, an optimization of the vehicle fleet, as well as their impact on the electricity grid. In the results, it can be seen that the increase of the electric vehicle share and the extension of the charging infrastructure is possible from the point of view of the electricity grid. The aspects that have to be considered in the extension as well as the impact level of the different scenarios on the electricity grid are described in this thesis.

# 1 Einleitung

## 1.1 Notwendigkeit von Elektromobilität

Elektromobilität hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen und es zeichnet sich ab, dass sich dieser Trend in den kommenden Jahren fortsetzt. Der Grund dafür ist, dass durch den Klimawandel alternative Mobilitätsmöglichkeiten notwendig sind. Um zu erklären, wie Elektromobilität dazu beitragen kann, dem Klimawandel entgegenzuwirken muss etwas ausgeholt werden.

Durch den Klimawandel steigt die globale Temperatur kontinuierlich, und es ist zu erwarten, dass der Temperaturanstieg durch die immer höheren Treibhausgasemissionen ohne Maßnahmen noch drastischer wird. Um dem entgegenzuwirken wurden von der Europäischen Kommission im Rahmen des Pariser Klimaabkommens Pläne geschaffen, durch die die Erderwärmung entschleunigt werden soll. Langfristig soll hierbei das Ziel sein, einen maximalen Temperaturanstieg von  $2^{\circ}\text{C}$  zu erreichen. Generell sollen sich die Staaten am Ziel eines maximalen Temperaturanstiegs von  $1,5^{\circ}\text{C}$  orientieren, da durch dieses Ziel die Auswirkungen des Klimawandels weiter verringert werden können. Aufgrund der momentanen Emissionen, und der dadurch notwendigen drastischen Emissionsverminderungen innerhalb kürzester Zeit gilt das  $2^{\circ}\text{C}$ -Ziel als das realistischere Ziel. Um diese Ziele zu erreichen ist es notwendig, die Emissionen so rasch wie möglich nicht mehr zu steigern, und sobald dies erreicht ist, eine rasche Reduktion der Emissionen einzuleiten [1].

Um schnell mit der Emissionsenkung beginnen zu können wurden von der Europäischen Kommission im September 2020 Rahmenbedingungen geschaffen, mit denen diese Reduktion gelingen soll. Zusätzlich zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger und zur Erhöhung der Energieeffizienz wurde ein Rahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen geschaffen. Das Ziel ist es, diese im Vergleich zu 1990 zu senken [2]. Um dieses Ziel zu erreichen sind alternative Transportmöglichkeiten notwendig. Der Anteil der weltweiten  $\text{CO}_2$  Emissionen im Transportsektor beträgt 18%. In vielen einzelnen Ländern ist dieser Anteil noch höher [3]. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen ist es dadurch notwendig, langfristig  $\text{CO}_2$  neutral zu fahren. Die zwei am häufigsten genannten Möglichkeiten dazu sind Elektroautos und Brennstoffzellen-Fahrzeuge, welche Wasserstoff für den Antrieb verwenden. Letztere sind im Vergleich zu Elektrofahrzeugen viel teurer und auch die notwendige Infrastruktur verursacht höhere Kosten.

Es gibt mittlerweile kaum noch Fahrzeughersteller, die nicht mindestens ein Elektroauto-modell anbieten. Die Forschung im Bereich Elektromobilität wird von vielen Universitäten und anderen Forschungsinstitutionen weltweit durchgeführt. Einerseits wird hier bezüglich Batterieeffizienz und Fahrverhalten des Fahrzeuges geforscht, was die Reichweite der Fahrzeuge erhöhen soll, da dies im Allgemeinen noch als großer Schwachpunkt der Elektroautos (gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen) gilt. Weiters wird viel in Richtung Ladetechnologien und Ausbau der Lademöglichkeiten geforscht. Für die Netzbetreiber stellt der verstärkte Anteil von Elektromobilität eine große Herausforderung dar. Laden von Elektroautos erfolgt in der Regel mit Leistungen von vielen Kilowatt. Da auch im Privatbereich vermehrt Ladesäulen oder Wallboxen zum Einsatz kommen steigt die Haushaltslast stark an. Die Energieversorgungsnetze waren ursprünglich nicht auf solch hohe Lasten im Privatbereich ausgelegt. Weiters steigt auch die Anzahl der Ladesäulen im öffentlichen Bereich, wobei hier die Leistungen der Ladesäulen in der Regel höher sind als im Privatbereich. Zusätzlich zu den Herausforderungen durch dezentrale Energieeinspeiser im Netz ergibt sich damit die Herausforderung der Laststeigerung durch Elektromobilität. Um diese Herausforderungen meistern zu können ist es notwendig, dass die Netzbetreiber ein Know-How im Bereich Elektromobilität erlangen. Dieses Know-How soll durch das Projekt „Lademanagement im Fuhrpark“ von Netz Niederösterreich, welches in dieser Diplomarbeit behandelt wird, erlangt werden.

### 1.2 Projektziele

Im betrachteten Fuhrpark sind bereits viele Elektrofahrzeuge vorhanden. Aus der Messung an diesen Fahrzeugen sollen grundlegende Erkenntnisse im Bereich der Elektromobilität erlangt werden. Das Ziel ist es, die Ladevorgänge der Fahrzeuge direkt an den Fahrzeugen und aus der Sicht des Netzes zu messen. Ersteres wird durch den Einbau eines Batteriediagnosegerätes direkt am Fahrzeug bewerkstelligt. Mit diesem werden zusätzlich die elektrischen Parameter während der Fahrt aufgezeichnet, sodass Erkenntnisse bezüglich Fahrverhalten von Elektrofahrzeugen erlangt werden können. Die Messung aus der Sicht des Netzes erfolgt an den Abgängen zu den einzelnen Ladesäulen. Im Fuhrpark sind zwei verschiedene Elektroautomodelle vorhanden, welche beide in diesem Projekt untersucht werden. Bezüglich Fahrverhalten geht es darum Erkenntnisse zu erlangen, wie effizient die Elektrofahrzeuge im Fuhrpark genutzt werden. Dazu werden die Fahrtendauer und die Fahrtenkilometer der Fahrten aller Elektrofahrzeuge aufgezeichnet. Zusätzlich werden diese Werte mit Fahrtenbüchern von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im Fuhrpark verglichen. Anhand dieser Parameter wird untersucht wie es möglich wäre, den Anteil der Elektrofahrzeuge im Fuhrpark zu erhöhen. Dazu werden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Elektroauto-Anteilen untersucht. Darauf aufbauend wird eine Fuhrpark

Optimierung durchgeführt, bei der der optimale Elektroautoanteil im Fuhrpark ermittelt wird. Für die Ladevorgänge ist es wichtig, die elektrischen Größen wie Ladeströme, Ladespannungen und (daraus abgeleitet) die Ladeleistungen zu messen. Weiters ist es notwendig, die Ladedauer bei verschiedenen Ladeleistungen zu ermitteln. Anhand dieser Größen kann die Ladeenergie bestimmt werden. Durch Messwertermittlung aller Fahrzeuge im Fuhrpark werden Gleichzeitigkeitsfaktoren im Bereich der Elektromobilität ermittelt. Bei allen Betrachtungen ist es wichtig, zwischen den unterschiedlichen Ladeleistungen zu unterscheiden. Mit den Erkenntnissen aus den Ladevorgängen wird eine Lastflussberechnung durchgeführt, anhand derer die Auswirkungen der Ladevorgänge auf das elektrische Verteilnetz untersucht werden. Es wird dabei überprüft, ob mögliche Grenzwertverletzungen auftreten und ob in weiterer Folge eine Netzverstärkung oder eine Verstärkung des Transformators notwendig ist.

All diese Erkenntnisse dienen dazu, ein Grundwissen für vergleichbare Aufgabenstellungen zu erlangen. Das Projekt „Lademanagement im Fuhrpark“ dient damit als Pilotprojekt, welches für ähnliche Projekte als Referenz herangezogen werden soll.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Die Kapitel dieser Diplomarbeit bauen teilweise aufeinander auf. Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen zum Thema Elektromobilität beschrieben. Diese vermitteln das notwendige Grundwissen, um die Messungen und Auswertungen zu verstehen. Im darauf folgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen der Messungen erläutert. Es wird dabei auf die verwendeten Messgeräte, sowie auf die Art der Messungen eingegangen. Weiters wird in diesem Kapitel auf die Infrastruktur (Fahrzeuge und Ladesäulen) im Fuhrpark eingegangen. Darauf aufbauend werden im folgenden Kapitel die Messergebnisse und die Messungen, welche diese Ergebnisse liefern, dargestellt. Es werden dabei auch die ersten Auswertungen, welche direkt aus den Messwerten ableitbar sind, präsentiert. Im nächsten Kapitel werden vertiefende Auswertungen durchgeführt, welche nicht unmittelbar aus den Messwerten ersichtlich sind, sondern für die eine vertiefende Auswertung notwendig ist. Es wird dabei auf die Methodik und die Ergebnisse dieser Auswertungen eingegangen. Im abschließenden Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick zu möglichen zukünftigen Szenarien im Zusammenhang mit Fuhrparkerweiterungen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 2 Theoretische Grundlagen

Elektrofahrzeuge sind ein alternatives Konzept zu den herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Die mechanisch umgesetzte Leistung unterscheidet sich zwischen den beiden Fahrzeugarten nicht. Der wesentliche Unterschied besteht hierbei bei der Art des Treibstoffes. Bei Verbrennungskraftfahrzeugen besteht der Treibstoff aus Mineralölen, wobei zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen unterschieden wird. Vergleichsweise kann bei Elektromotoren elektrischer Strom als Treibstoff gesehen werden. Dieser kann aus verschiedenen Primärenergieträgern gewonnen werden, und wird über Stromnetze zu den verschiedenen Ladesäulen übertragen. Nachdem ein Elektroauto eine mobile Anwendung ist, kann dieses während der Fahrt nicht ohne weiteres über Netze mit elektrischer Energie versorgt werden. Es ist deswegen notwendig, die Energie kompakt zwischenzuspeichern, und es muss möglich sein, den Energiespeicher während der Fahrt mitzuführen. Energiespeicher, welche diese Anforderungen erfüllen sind Batteriespeicher.

### 2.1 Batteriespeicher

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Anforderungen an Batteriespeicher charakterisiert. Darauf aufbauend wird der Aufbau von Lithium-Ionen-Akkumulatoren beschrieben, da diese Batterieart in den meisten Elektroautomodellen verwendet wird. In weiterer Folge davon werden das Ladeverhalten und die Ladearten dieser Akkus beschrieben.

#### 2.1.1 Anforderungen an Batteriespeicher

Die Anforderungen an Batteriespeicher unterscheiden sich nach der Art der Verwendung. Ein mobiler Batteriespeicher für ein Elektrofahrzeug muss anderen Anforderungen entsprechen, als ein stationärer Speicher für das Speichern der erzeugten Energie einer Photovoltaikanlage. In manchen Anwendungen werden eher kleine Energiemengen benötigt, die innerhalb kürzester Zeit abgerufen werden sollen. Andere Energiespeicher können große Energiemengen speichern, benötigen aber zum Teil mehrere Minuten um diese Energie abrufen zu können, wie dies z.B. bei Pumpspeicherkraftwerken der Fall ist [4]. Für Speicher gibt es mehrere charakteristische Eigenschaften, welche im Wesentlichen den Einsatzbereich bestimmen.

### Energiedichte

Die Energiedichte ist eine Eigenschaft die bestimmt, welche Energiemenge pro Volumen (bzw. Masse) der Batterie gespeichert werden kann (Einheit kWh/m<sup>3</sup> bzw. kWh/kg). Dieser Wert hat dahingehend große Bedeutung im Bereich der Elektromobilität, dass die maximale Reichweite der Fahrzeuge stark durch die Masse der Batterie begrenzt ist. Wichtig zu beachten bei dieser Größe ist, dass eine hohe Energiedichte nicht zwangsläufig mit einem hohen Wirkungsgrad in Verbindung steht [4], [5].

### Energieinhalt

Diese Größe beschreibt die gesamte mögliche gespeicherte Energiemenge im Speicher. Der Teil davon, der wirklich genutzt werden kann wird als Nutzinhalt bezeichnet. Dieser muss die Anforderungen des mit der Batterie zu versorgenden Systems erfüllen. Bei vielen Batterietechnologien ist es nicht möglich, die gesamte Kapazität der Batterie zu nutzen, da eine Tiefentladung nicht möglich ist, oder da diese die Lebensdauer der Batterie deutlich reduziert. Durch geeignete Auswahl der für die Batterie verwendeten Materialien kann der Nutzinhalt im Vergleich zum Energieinhalt erhöht werden [4], [5].

### Leistungsverhalten

Die Leistung, die vom Speicher abrufbar ist, ist jene Leistung, die dem Elektromotor zugeführt werden kann, weswegen die Leistung direkt das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeuges bestimmt. Auf der anderen Seite bestimmt die Ladeleistung, wie schnell die Batterie aufgeladen werden kann. In der Regel ist es nicht möglich, dass der Speicher gleichzeitig eine hohe Energiedichte und eine hohe Leistungsdichte besitzt. Je nach Anforderung an den Speicher des Elektrofahrzeuges muss entschieden werden, ob eine hohe Reichweite oder hohe Leistungen gewünscht sind [4]. Lithium-Ionen-Akkus liefern für beide Größen zufriedenstellende Werte (siehe Kapitel 2.1.2) [6].

Eine anschauliche Einteilung der verschiedenen Speichertechnologien anhand der Energiedichte und der Leistungsdichte stellt das Ragone-Diagramm dar. Auf der Abszisse ist hierbei die massenbezogene Leistung (entspricht der Leistungsdichte) und auf der Ordinate die massenbezogene Energie (entspricht der Energiedichte) aufgetragen. In Abbildung 2.1 ist solch ein Diagramm dargestellt. Es ist dabei ersichtlich, dass Li-Ionen-Batterien gute Werte für beide Größen liefern [7].

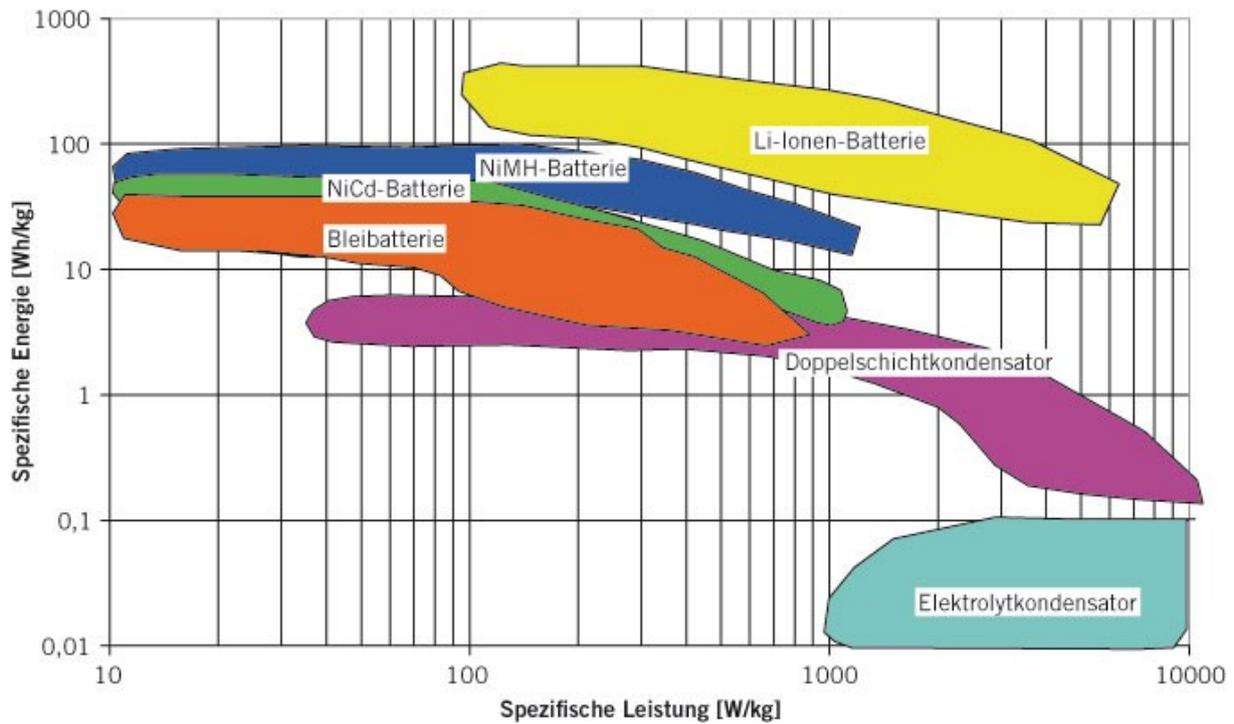


Abbildung 2.1: Ragone Diagramm [7]

## Lade- und Entladedauer

Die Zeit, in welcher der Speicher aktiv Energie aufnehmen oder Energie zur Verfügung stellen muss, wird als Einsatzdauer (oder Lade- und Entladedauer) bezeichnet. Je nach Art des Speichers nimmt diese unterschiedliche Wertebereiche an [5].

## Speicherdauer

Im Gegensatz zur Einsatzdauer beschreibt die Speicherdauer die Zeit, in der weder geladen, noch entladen wird, und die Energie unverändert (abzüglich Verlusten) gespeichert bleibt. Auch diese Dauer kann Werte von wenigen Sekunden bis zu mehreren Stunden annehmen [5].

## Wirkungsgrad

Bei Speichern wird zwischen Lade- und Entladewirkungsgrad unterschieden. Es treten bei beiden Vorgängen Verluste auf. Zusätzlich treten auch während der Speicherdauer Standby-Verluste durch Selbstentladung auf. Die Signifikanz der drei Verlustarten unterscheidet sich je nach Anwendungsfall [5].

### **Zyklenzahl**

Dieser Wert gibt an, wie oft der Speicher geladen und wieder entladen wird. In diesem Zusammenhang wird von Volllastzyklen gesprochen, auch wenn der Speicher meistens nicht komplett aufgeladen und wieder tiefentladen wird. Mit dieser Größe verknüpft ist die Lebensdauer des Speichers, die entweder in einer Zeitspanne oder in Zyklen angegeben werden kann. Eine höhere Entladetiefe belastet die Batterie stärker, weswegen die Lebensdauer dieser verringert wird. Es ist somit ein Batterie-Lademanagement für die Erhöhung der Lebensdauer notwendig [4], [5].

### **Zugriffszeit und Regelgeschwindigkeit**

Für Systeme, welche die Energie aus dem Speicher schnell abrufen müssen, sind diese beiden Parameter entscheidend. Nach Ablauf der Zugriffszeit kann die maximale Leistung vom Speicher abgerufen werden. Ändert sich die Belastung des Speichers, so gibt die Regelgeschwindigkeit an, wie schnell der Speicher auf solche Änderungen reagieren kann. Vor allem bei Elektrofahrzeugen muss dieser Parameter sehr hoch sein [5].

### **Ökonomische und Ökologische Parameter**

Ein wichtiger Aspekt bei der Speicherauswahl sind die Kosten des Speichers. Die Batterie macht je nach Modell des Fahrzeuges zwischen 10 % und 20 % des Anschaffungspreises des Fahrzeuges aus [8]. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren sind die Betriebskosten der Batterien aufgrund der geringeren Anzahl an notwendigen Wartungsarbeiten niedriger [4].

Weiters ist die Umweltverträglichkeit ein wichtiger Parameter. Nachdem Elektromobilität zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen soll ist es wichtig, dass die Herstellung und Entsorgung des Speichers nachhaltig ist. Vor allem bei der Entsorgung stellt die Möglichkeit der Second Life Technologien, bei denen Batterien für mobile Anwendungen nach altersbedingter Verringerung der Ladekapazität noch weiter für stationäre Anwendungen verwendet werden, einen nachhaltigen Weg dar [4].

### **Speichermöglichkeiten**

Grundsätzlich können Energiespeicher in mechanische, elektrische und elektrochemische Energiespeicher kategorisiert werden. Abbildung 2.2 zeigt Beispiele für Technologien der entsprechenden Kategorien.

Elektrische Energiespeicher verfügen nur über sehr geringe Energiedichten. Der Vorteil an elektrischen Speichern ist, dass sie sehr schnell abrufbar sind. Druckluftspeicher verfügen

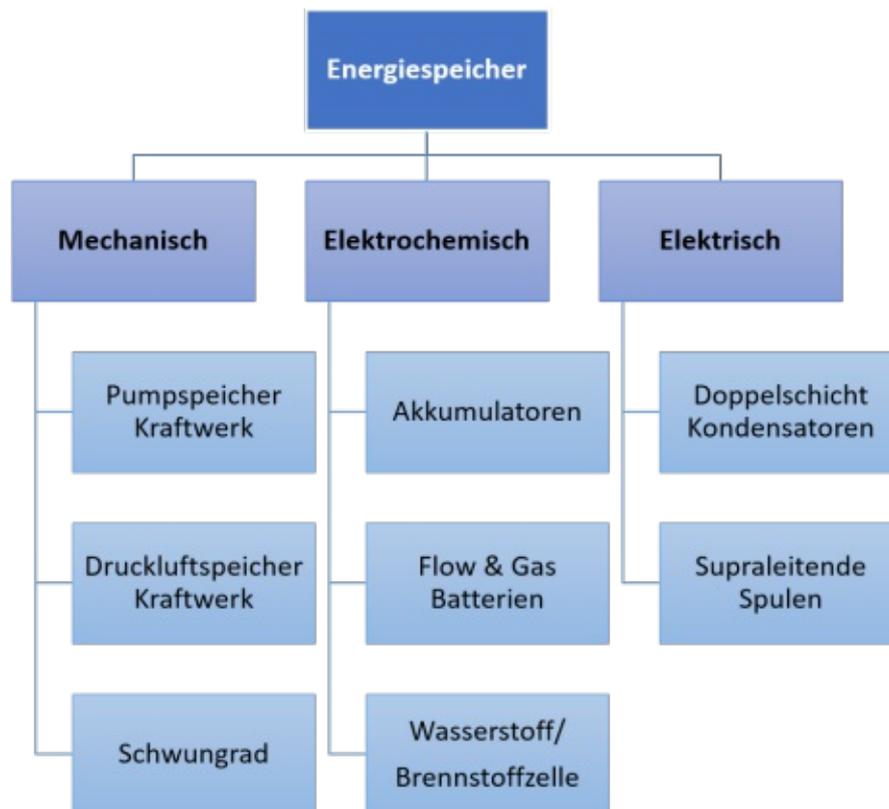


Abbildung 2.2: Kategorien Batteriespeicher [9]

über leicht höhere Energiedichten, können diese Energie jedoch über einen längeren Zeitraum speichern [5].

Die höchsten Energiedichten stellen die elektrochemischen Speichertechnologien zur Verfügung (bis auf Schwunmassenspeicher, wobei diese die Energie nur über einen kurzen Zeitraum speichern können) [5]. Aus diesem Grund, und weil in der Elektromobilität Batteriespeicher verwendet werden, werden im folgenden Abschnitt die Batteriespeicher genauer beschrieben. Der Hauptfokus liegt hierbei auf dem Li-Ionen-Akkumulator.

### 2.1.2 Lithium-Ionen-Batterie Aufbau

Bereits 1962 wurden Lithium-Ionen-Batterien das ersten Mal verwendet. Bei diesen Modellen handelte es sich noch um Primärzellen, welche nach einmaligem Entladen nicht mehr wieder aufgeladen werden konnten. Lithium wurde als Material für die negative Elektrode (Kathode) verwendet, und Mangandioxid für die positive Elektrode (Anode). 1985 wurde die erste Lithium-basierte Sekundärzelle entwickelt, bei der für die positive Elektrode Molybdänsulfid verwendet wurde. 1991 brachte Sony eine Lithium-Ionen-Batterie auf den Markt, bei der das Kathodenmaterial Kohlenstoff und das Anodenmaterial Lithium-Kobaltdioxid war. Diese Batterie war die erste Lithium-Ionen-Batterie, welche ohne Sicherheitsbedenken verwendet werden konnte.

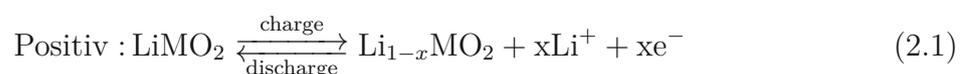
Heute zeichnen sich Lithium-Ionen-Akkus durch ihre guten Eigenschaften bezüglich Energiedichte, sowie Lade- und Entladeverhalten aus [10].

### Aufbau

Die Anode der Batterie besteht heutzutage meistens aus Lithium-Kobaltoxid ( $\text{LiCoO}_2$ ) oder Lithium-Manganoxid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ). Für die Kathode werden in der Regel Graphit basierte Materialien verwendet.  $\text{LiCoO}_2$  bietet gute elektrische Eigenschaften, und ist sicher und robust gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen. Durch Forschung und Weiterentwicklung der Batterietechnologien konnten Materialien mit geringeren Kosten für die Anode verwendet werden, wie z.B.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ . Um die Lithium-Ionen von einer Elektrode zur anderen leiten zu können, muss sich zwischen den beiden Elektroden ein leitfähiger Elektrolyt befinden, der dazu imstande ist, diese Li-Ionen zu leiten. Dieser besteht aus Lösungsmitteln und Leitsalzen [10], [11]. Weiters befindet sich zwischen den Elektroden der Separator, welcher die Elektroden gegeneinander isoliert und räumlich trennt. Die Anforderungen an den Separator sind, dass er gleichzeitig interne Kurzschlüsse vermeiden kann und durchlässig für Ionen sein muss. Um dies zu erreichen muss der Separator dünn sein, damit er einen niedrigen Innenwiderstand hat. Bei Lithium-Ionen-Batterien werden dünne Kunststoff-Membranen als Separatormaterialien eingesetzt [12].

### Funktion

Die Hauptfunktion der Lithium-Ionen-Akkus besteht darin, dass sich Lithium-Ionen zwischen den beiden Elektroden über den Elektrolyten und durch den Separator hin und her bewegen. Nach Abschluss der Bewegung in eine Richtung lagern sich diese in die Aktivmaterialien der Elektroden. Werden Lithium-Ionen aus dem Kathodenmaterial, bei dem Kupfer als Ableiter fungiert, ausgelagert, so werden Elektronen freigegeben. Dies geschieht beim Entladen der Batterie. Die ausgelagerten Lithium Ionen lagern sich dann in der Anode ein. Der Lithium-Ionen Transport findet somit von der Kathode zur Anode statt. Über die äußeren Leiteranschlüsse fließen Elektronen ab, die in großer Menge als Strom zur Versorgung des Elektromotors dienen können. Der Ladevorgang läuft genau in die umgekehrte Richtung ab. Durch Anlegen einer äußeren Spannung wandern die Li-Ionen von der Anode zur Kathode, und gleichzeitig werden Elektronen in die Kathode gepumpt. Der Ladevorgang ist abgeschlossen, wenn sich alle Lithium-Ionen in der Kathode befinden [10]. Die folgenden Reaktionsgleichungen zeigen die beschriebenen chemischen Reaktionen, während Abbildung 2.3 die beschriebenen Lade- und Entladevorgänge schematisch darstellt.



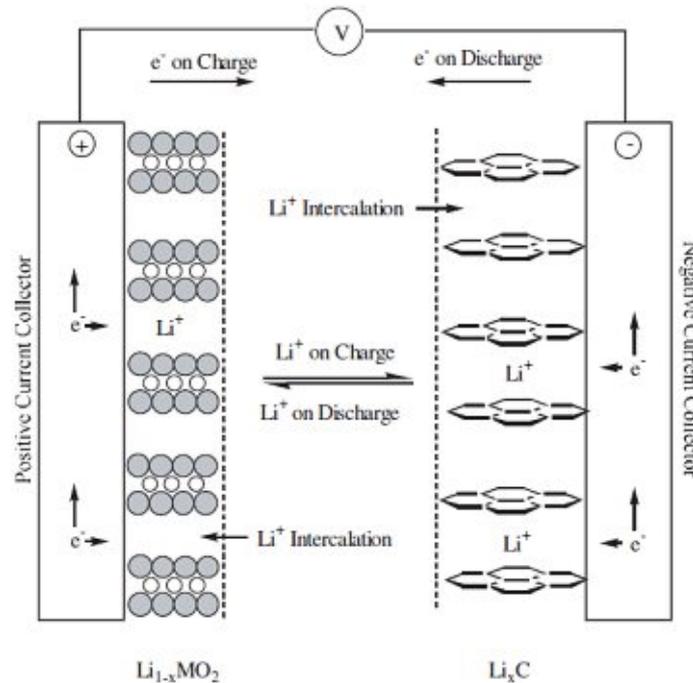
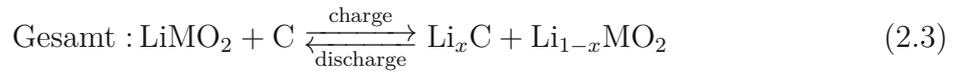
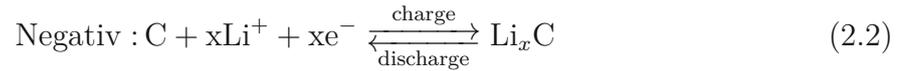


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau Li-Batterie [11]

Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich wie bereits erwähnt durch hohe Energie- und Leistungsdichten aus. Weiters erreichen sie im Normalbetrieb hohe Lebensdauern, haben hohe Wirkungsgrade und geringe Selbstentladung. Der Nachteil von Lithium-Ionen-Akkus ist deren Empfindlichkeit gegen Überladung und deren Empfindlichkeit gegen Temperatureinflüsse [6].

### Li-Ionen-Akkus in Elektroautos

Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge sind in der Regel aus Li-Ionen-Akkus aufgebaut. Die zu messenden Modelle der Marke Bayerische Motorenwerke (BMW) und von Volkswagen (VW) verfügen ebenfalls über diese Batterietechnologie. Es gibt die Möglichkeit von zylindrischen, prismatischen oder flachen Zellen. Bei der zylindrischen Zelle sind die Batteriematerialien aufgewickelt und abwechselnd geschichtet. Die Reihenfolge beträgt hierbei Anode, Separator, gefolgt von der Kathode und einer weiteren Separatorschicht. In

der prismatischen Zelle sind die Einheiten gestapelt und in einer Folie verpackt. Moderne Anwendungen verwenden häufig Flachzellen, sogenannte Pouch-Zellen. Die einzelnen Zellen werden über Reihen- und Parallelschaltung zu Modulen zusammengesetzt. Der gesamte Batteriespeicher besteht wiederum aus mehreren zusammenschalteten Modulen. Die Anzahl der Module bestimmt die Kapazität der Batterie. Beim VW e-Golf werden beispielsweise zwölf Module zusammenschaltet [13], [14].

Abbildung 2.4 zeigt verschiedene Ausführungsformen von Batteriezellen, wobei hier Bild a die Knopfzelle, Bild b die Flachzelle, Bild c die zylindrische Zelle und Bild d die prismatische Zelle darstellt [14].

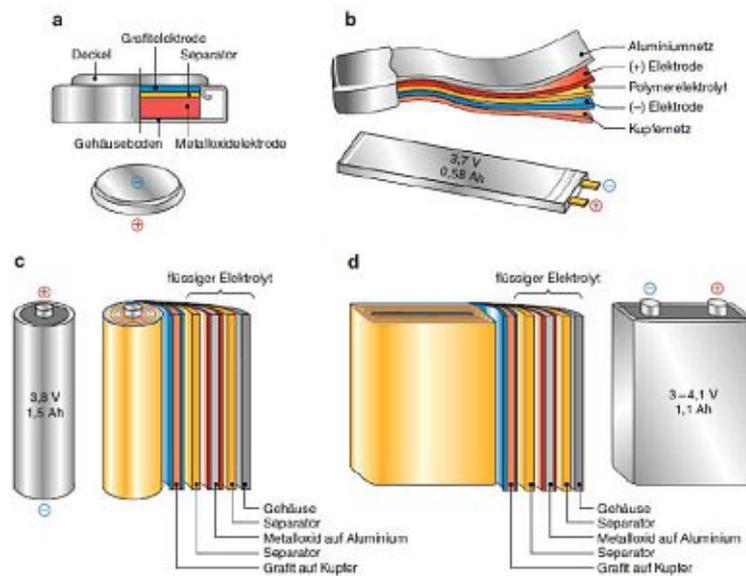


Abbildung 2.4: Batteriezellen [14]

In Abbildung 2.5 ist ein aus Zellmodulen zusammengesetztes Batteriemodul dargestellt.

### 2.1.3 Ladeverfahren von Elektroauto-Batterien

#### Ladezustandsgrößen von Batterien

Nachdem der Aufbau und die grundlegende Funktion von Li-Ionen-Akkus beschrieben wurden, wird nun genauer auf den Ladevorgang und das Lademanagement von Batterien eingegangen. Für die Beschreibung der Ladevorgänge von Batterien gibt es zwei wichtige Zustandsgrößen der Batterie, mit denen der Ladezustand beschrieben werden kann. Die erste dieser Größen ist der State of Charge (SOC) Wert, der angibt, welcher Anteil der gesamten Ladekapazität noch verfügbar ist, sprich welche Ladungsmenge noch in der Batterie vorhanden ist. Er wird in Prozent angegeben und kann z.B. durch Impedanzmessung ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung der Batteriespannung,

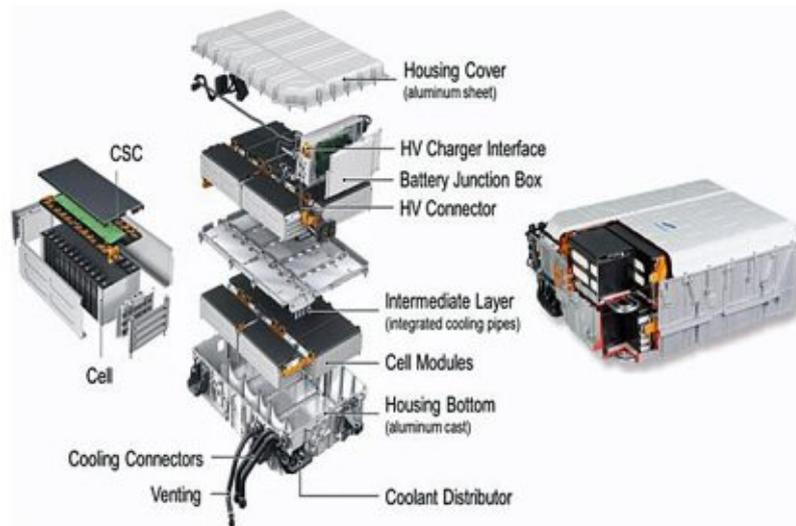


Abbildung 2.5: Batteriemodul [15]

mit welcher die Entladekurven, bei denen die Batteriespannung in Abhängigkeit der Batteriekapazität dargestellt ist, aufgenommen werden können. Die Spannung sinkt im Allgemeinen mit sinkendem SOC. Das Problem an der Spannungs-Methode ist die hohe Temperaturabhängigkeit dieser Messung. Ein Batteriemanagement-System wertet den SOC der Batterie aus und passt das Lademanagement entsprechend dem momentanen Wert an. Mit einer Ladungszustandsanzeige ist es bei modernen Batterien möglich, den SOC-Wert nach außen anzuzeigen [16].

Folgende Formel wird verwendet, um den momentanen SOC-Wert zu berechnen [17]:

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_N} \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_{HR} \cdot dt \quad (2.4)$$

Verbal ausgedrückt bedeutet die Formel, dass sich der aktuelle Ladezustand aus der Summe des vorherigen Ladezustands und des Ladevorgangs ergibt. Hierbei ist  $I_{HR}$  der Hauptreaktionsstrom, der sich aus der Differenz des Batteriestromes und des Nebenreaktionsstromes ergibt.

Der zweite charakteristische Wert der Batterie ist die Entladetiefe, die sogenannte Depth of Discharge (DoD). Dieser Werte kennzeichnet, welche Ladungsmenge aus der Batterie entnommen wurde. Er bestimmt auch wesentlich die Lebensdauer der Batterie. Ist der DoD-Wert höher, so sinkt die Lebensdauer der Batterie aufgrund der stärkeren mechanischen und chemischen Belastung der Batterie. Es ist somit möglich, die Lebensdauer der Batterie durch eine DoD-Beschränkung zu erhöhen.

Mit dem Batteriemanagementsystem ist es möglich, diesen Wert zu überwachen, und den Lade- und Entladevorgang entsprechend anzupassen [18]. Der DoD-Wert hängt unmittelbar mit dem SOC-Wert über folgende Formel zusammen:

$$DoD(t_0) = 1 - SOC(t_0) \quad (2.5)$$

Ein charakteristischer Wert für die Alterung der Batterie ist der State of Health (SOH) Wert. Dieser gibt an, wie groß das Verhältnis der momentanen maximalen Kapazität zur Nennkapazität ist. In der Regel wird dieser Wert in Prozent angegeben. Das Lebensende einer Batterie tritt je nach Anwendungsfall bei unterschiedlichen SOH-Werten auf. Bei mobilen Anwendungen wie Elektroautobatterien liegt dieser Wert zwischen 70 % und 80 %. Dies wird als „first life“ der Batterie bezeichnet. Für weniger speicherkritische Anwendungen, wie stationäre Anwendungen können auch Batterien mit einem niedrigeren SOH-Wert verwendet werden. Diese Weiterverwendung von Batterien wird als „second life“ bezeichnet. Aus dem SOH-Wert folgt unmittelbar die restliche Lebensdauer der Batterie, die als Remaining Use of Life (RUL) bezeichnet wird. Beide Werte sind wichtig, um den Gesundheitszustand der Batterie abzuschätzen und deren weitere Verwendung zu planen. Da es nicht möglich ist, direkt die maximal verfügbare Kapazität der Batterie zu messen werden in Zukunft noch Forschungsarbeiten notwendig sein, um diese Größen im Betrieb messen zu können und diese in weiterer Folge für das Lademanagement heranziehen zu können [19].

### Elektrische Größen für das Laden von Batterien

Für das Laden einer Batterie sind nicht nur die Zustandsgrößen des Akkus wichtig, sondern auch die elektrischen Parameter, welche den Ladevorgang bestimmen. Die hierbei zu betrachtenden Größen sind der Ladestrom, die Ladespannung und die daraus resultierende Ladeleistung. Bei Lithium-Ionen-Akkus beträgt die Spannung einer Zelle abhängig vom Elektrodenmaterial zwischen 3,6 V und 3,7 V. Je nach Modell können die Nennspannungen von Elektroautoakkus über 500 V betragen, weswegen eine Reihenschaltung vieler Lithium-Zellen notwendig ist [20]. Die Ladespannung unterscheidet sich je nach Ladetechnologie und ist abhängig von der gewünschten Ladeleistung und dem erlaubten Ladestrom. Die Ladeleistung, bzw. der Ladestrom, bestimmen wie schnell eine Batterie aufgeladen wird, bzw. beim Entladen, wie lange die Batterie den Strom, bzw. die Leistung, zur Versorgung des Verbrauchers liefern kann. Zur Demonstration der Auswirkung des Ladestroms sei folgende Situation gegeben: Die Batterie hat eine Nennkapazität von 180 Ah. Sie wird mit einem einphasigen Ladestrom von 16 A geladen (die einphasige Ladespannung beträgt 230 V). Damit ergibt sich eine Ladezeit von:

$$\text{Ladezeit} = \frac{\text{Nennkapazität}}{\text{Ladestrom}} = \frac{180 \text{ Ah}}{16 \text{ A}} \approx 2,2 \text{ h} \quad (2.6)$$

Bei einem Ladestrom von 16 A ist die Batterie somit nach etwa 2 Stunden und 12 Minuten aufgeladen. Die Berechnung kann äquivalent mit der Ladeleistung durchgeführt werden, wenn die Batteriekapazität in Wh (bzw. kWh) angegeben ist. Unterschiedliche Elektroautomodelle verfügen über unterschiedliche Batteriekapazitäten, wobei es Modelle mit Batteriekapazitäten von wenigen kWh und Modelle mit bis zu 100 kWh gibt. Lithium-Ionen-Akkus zeichnen sich dadurch aus, dass sie robust gegen hohe Ladeströme sind. Der maximale Ladestrom, mit dem die Batterie belastet werden sollte, wird in der Regel vom Hersteller der Batterie angegeben und sollte eingehalten werden, da bei geringer Überschreitung die Lebensdauer verringert wird, und es bei deutlicher Überschreitung zu einer Zerstörung der Batterie kommen kann.

### Ladeverfahren von Elektroautobatterien

Nachdem die wichtigen Parameter für das Laden einer Batterie beschrieben wurden, wird in den folgenden Absätzen auf die verschiedenen Ladeverfahren von Batterien, die in der Elektromobilität verwendet werden, eingegangen. Ziel des Ladeverfahrens ist es, die Batterie in möglichst kurzer Zeit aufzuladen und die Batterie dabei nicht unzulässig zu belasten. Auf die wichtigsten Ladeverfahren, welche in [21] und [22] beschrieben sind, wird in den folgenden Teilpunkten eingegangen.

#### Konstantspannungs-Ladeverfahren (U-Verfahren)

Bedingt durch den Innenwiderstand der Batterie muss das Ladegerät der Batterie stets eine höhere Spannung liefern, als die Zellenspannung der Batteriezelle. Leere Zellen verfügen über niedrige Zellspannungen. Zu Beginn des Ladevorganges ist somit ein hoher Ladestrom notwendig. Für den Strom ergibt sich ein exponentiell abklingender Verlauf. Durch die konstante Ladespannung ist es möglich, die Spannungsgrenzwerte zu erfüllen. Gleichzeitig ergeben sich jedoch erhöhte Belastungen der Batterie durch den hohen Ladestrom zu Beginn des Ladens. Abbildung 2.6 zeigt den Verlauf von Strom- und Spannung beim Konstantspannungs-Ladeverfahren.

#### Konstantstrom-Ladeverfahren (I-Verfahren)

Bei diesem wird der Ladestrom, anstatt der Ladespannung konstant gehalten. Damit ist es möglich, den maximalen Ladestrom nicht zu überschreiten und die Batterie nicht unzulässig hoch zu belasten. Der Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass die Ladespannung exponentiell ansteigt. Bei einem hohen Ladestrom wird die Ladeschlussspannung sehr

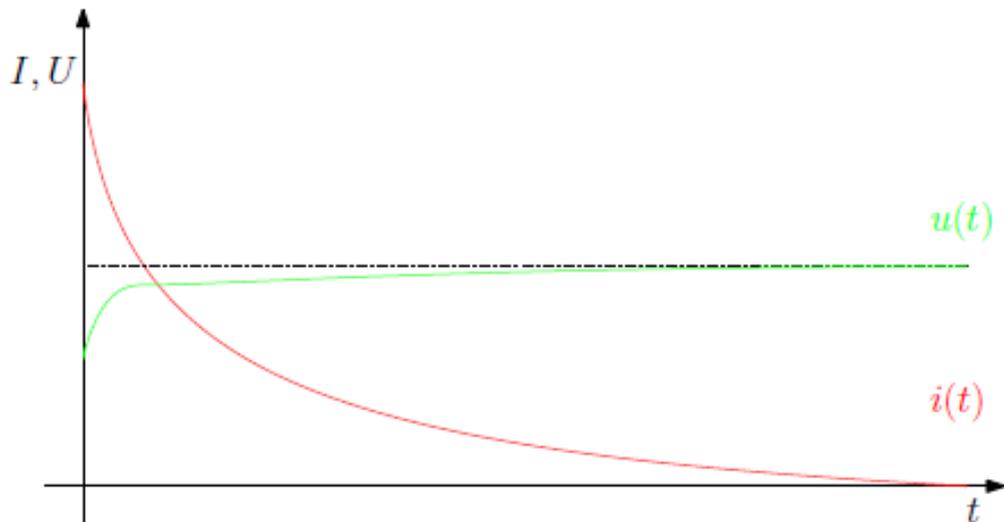


Abbildung 2.6: Constant Voltage (CV) Ladeverfahren [6]

schnell erreicht. Dies ist die maximal mögliche Spannung mit welcher die Batterie ohne Überladung geladen werden darf. Ab Erreichen dieser Spannung ist es nicht mehr möglich, den Ladestrom konstant zu halten, und dieser muss reduziert werden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

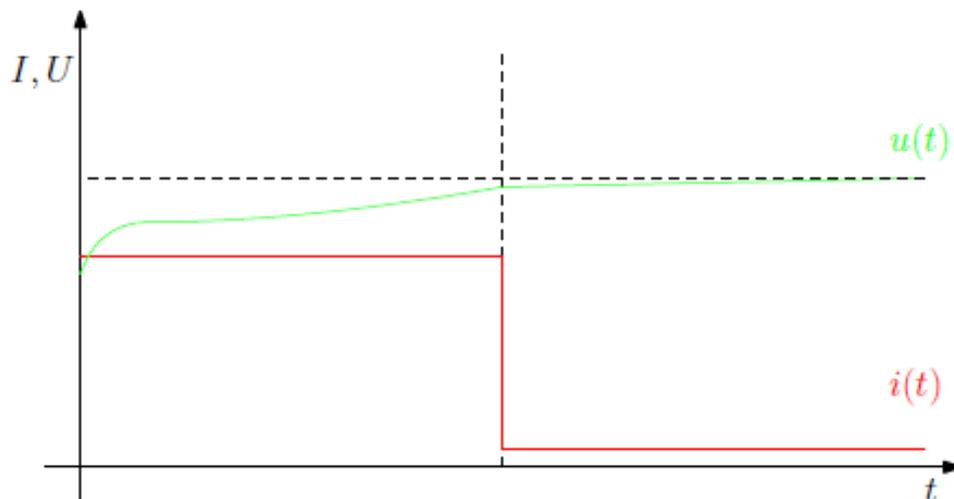


Abbildung 2.7: Constant Current (CC) Ladeverfahren [6]

### CCCV-Ladeverfahren (IU-Ladeverfahren)

CCCV steht für „Constant Current Constant Voltage“. Dieses Verfahren kombiniert das U- und I-Verfahren miteinander, um deren Nachteile auszugleichen. Zu Beginn des Ladevorganges wird der Ladestrom konstant gehalten, um die Batterie nicht zu überlasten. Die Ladespannung steigt so lange an, bis die Ladeschlussspannung erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt wird die Ladespannung konstant gehalten und der Strom sinkt exponentiell

ab. Durch diese Umschaltung wird eine Überladung der Batterie verhindert. Sobald der Ladestrom minimal klein ist, kann die Batterie als vollständig geladen betrachtet werden und der Ladevorgang kann beendet werden [23]. Das CCCV-Ladeverfahren gilt als das Standard-Ladeverfahren für Elektroautos. Abbildung 2.8 zeigt, wie das CCCV-Ladeverfahren funktioniert.

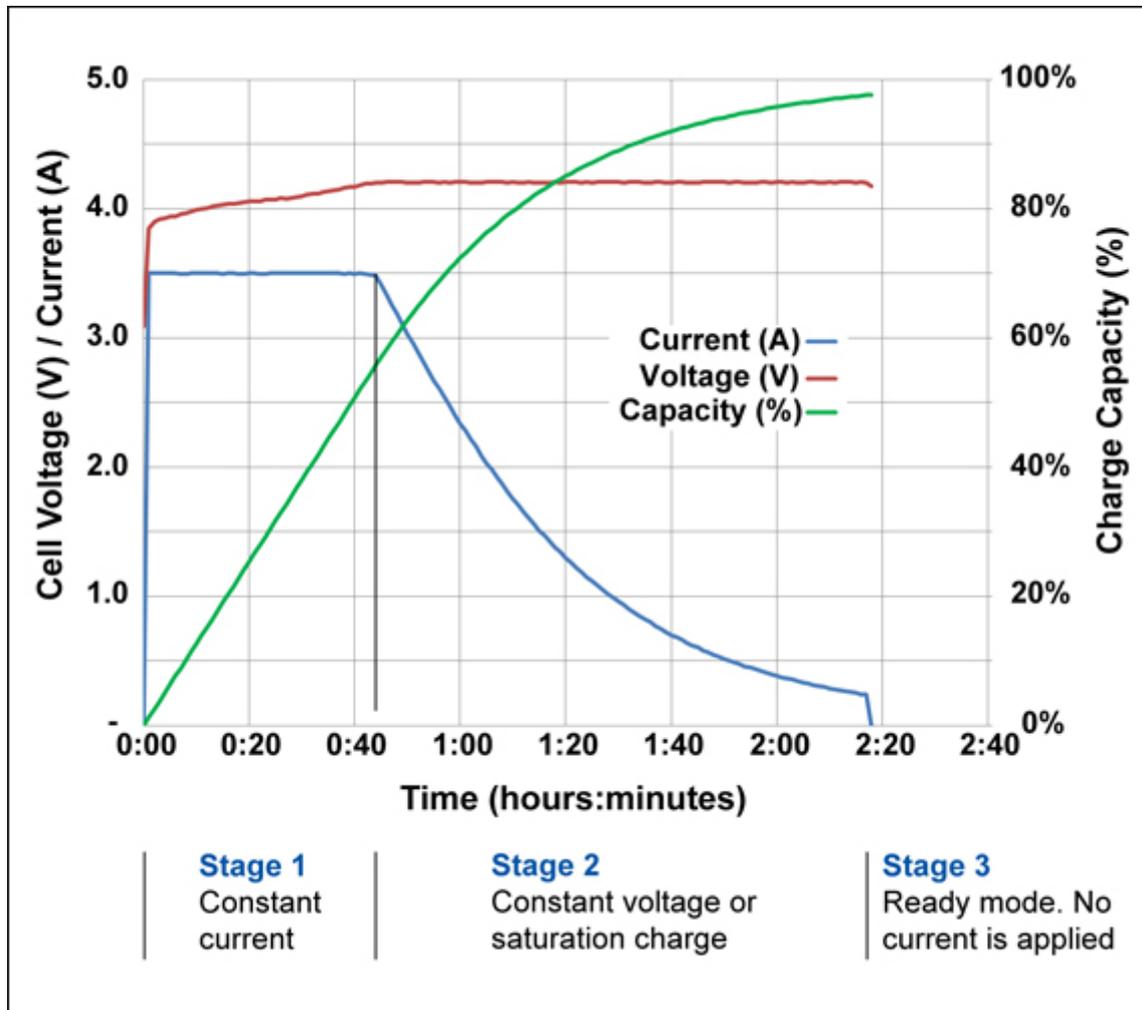


Abbildung 2.8: Constant Current Constant Voltage (CCCV) Ladeverfahren [24]

In Abbildung 2.8 ist weiters ersichtlich, dass in der Konstantstromphase mehr als die Hälfte der Batteriekapazität in verhältnismäßig kurzer Zeit aufgeladen wird. Für die Vollladung der Batterie bei konstanter Spannung wird eine längere Ladezeit benötigt. Dies ist laut Gleichung 2.6 durch den geringeren Ladestrom bedingt.

### Pulsladeverfahren und Reflexladen

Diese Verfahren basieren auf dem Konstantstromverfahren, wobei bei dieser Variante periodische kurze Unterbrechungen erfolgen, um die Ladeschlussspannung erst später zu erreichen. Während dieser Stromunterbrechungsintervalle ist es möglich, Parameter

der Ladung (wie z.B. die Ruhespannung) zu messen. Abbildung 2.9 zeigt den Strom- und Spannungsverlauf beim Pulsladeverfahren. Wird die Ladeschlussspannung erreicht ist es auch möglich, die stromlosen Intervalle zu verlängern und die Ladeintervalle zu verkürzen.

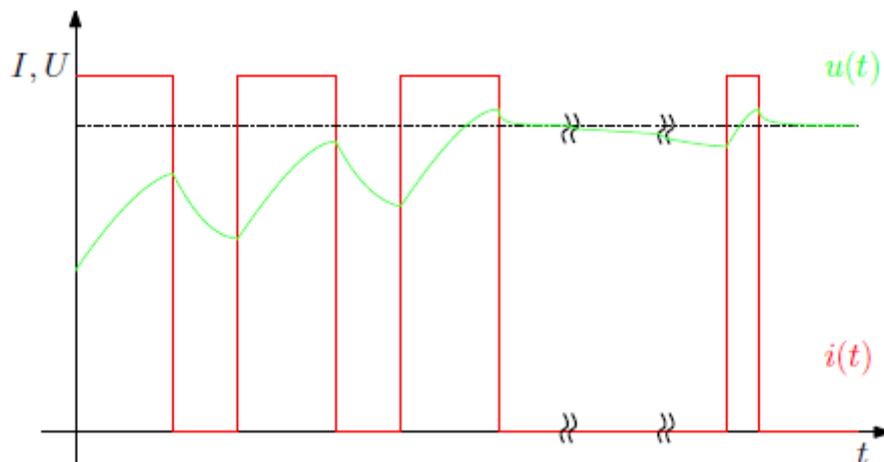


Abbildung 2.9: Pulsladeverfahren [6]

Ein Spezialfall des Pulsladeverfahrens ist das Reflexladen, auch Rückstromladen genannt. Bei diesem werden zusätzlich auch negative Entladeimpulse eingepreßt, welche Gasungsprozesse mindern und Selbstentladungsprozesse ausgleichen sollen. Abbildung 2.10 zeigt das Prinzip von Reflexladen.

### Multi Stage Constant Current (MSCC) Ladeverfahren

Bei diesem Ladeverfahren wird zu Beginn mit dem (laut Fahrzeug vorgegebenem) maximalen Ladestrom geladen. Dieser wird stufenweise monoton gesenkt, wobei der Ladestrom in den einzelnen Stufen konstant ist. Durch diese geringe Verringerung des Ladestromes kommt es zu einer leichten Entlastung der Batterie bei höheren SOC-Werten, was die Lebensdauer dieser erhöhen kann. In Abbildung 2.11 ist solch ein Ladevorgang dargestellt, wobei der Ladevorgang beim sprunghaftigen Abfall des Ladestromes auf 0 A abgeschlossen ist [6].

### Batteriemanagement-System (BMS)

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben ist das CCCV-Ladeverfahren das gängigste Ladeverfahren bei Lithium-Ionen-Batterien. Damit das Ladeverfahren an die Ladeparameter angepasst werden kann ist ein Batteriemanagement-System notwendig. In diesem Unterabschnitt wird die Funktion dieses Systems beschrieben.

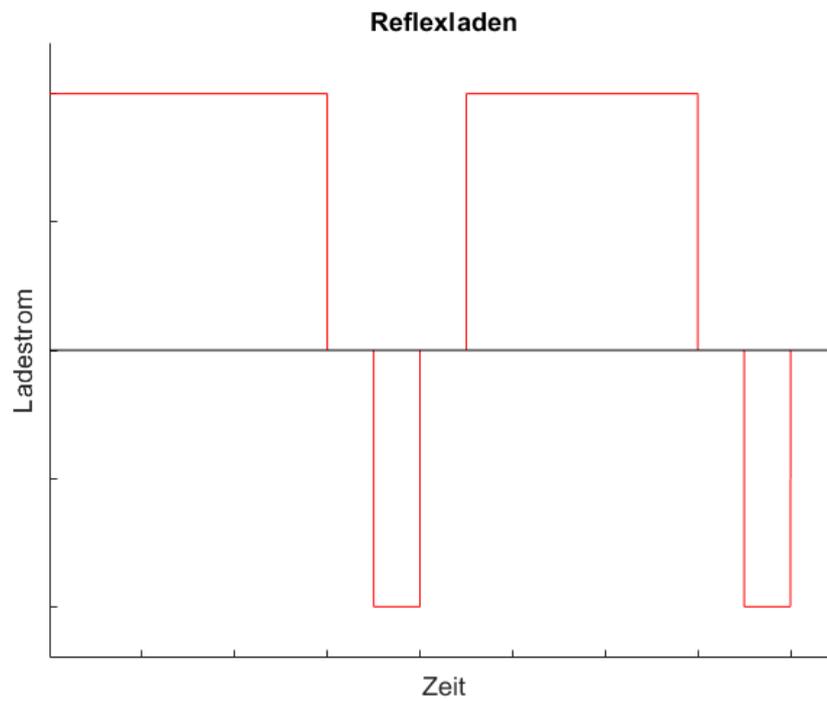


Abbildung 2.10: Reflexladen

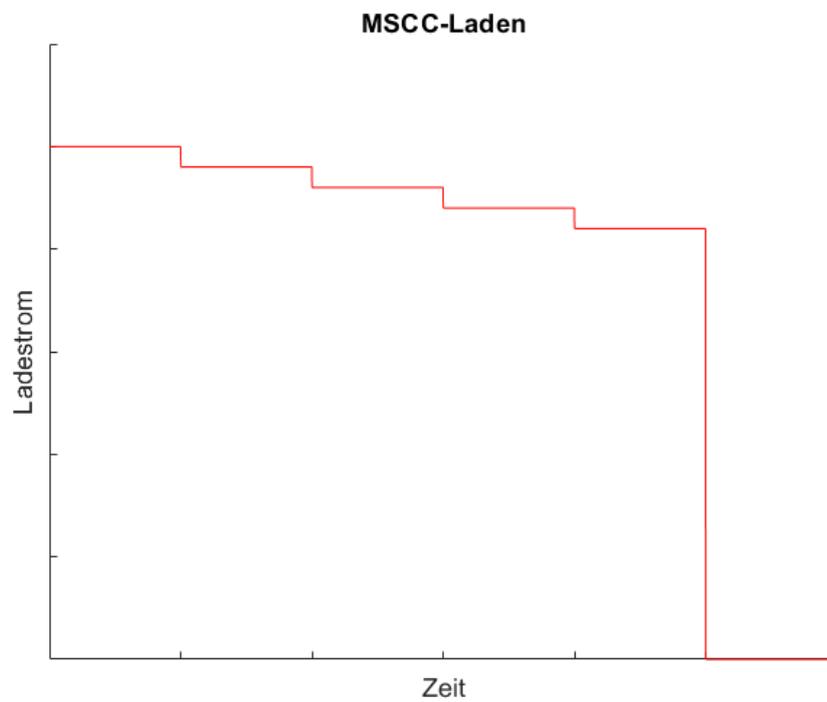


Abbildung 2.11: MSCC-Laden

Die Hauptaufgabe des BMS ist es, einzelne Zellen des Lithium-Ionen-Akkus vor Überladung zu schützen. Damit soll es möglich sein, die Zyklenzahl und die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen. Weiters überwacht das BMS die Zelltemperatur und schützt somit die Zelle vor Überhitzung [10].

Um diesen Schutz zu gewährleisten werden die Zellspannung, die Zelltemperatur und der Strom der Batterie gemessen. Wie bereits erwähnt beträgt die Spannung einer Li-Zelle in etwa 3,6 V. Der Spannungsbereich der Zelle darf sich zwischen 2,5 V und 4,2 V bewegen. Werden diese Grenzwerte über- bzw. unterschritten, so kann dies der Batterie dauerhaft schaden [10].

Ein BMS besteht in der Regel aus fünf einzelnen Komponenten, die in Abbildung 2.12 dargestellt sind.

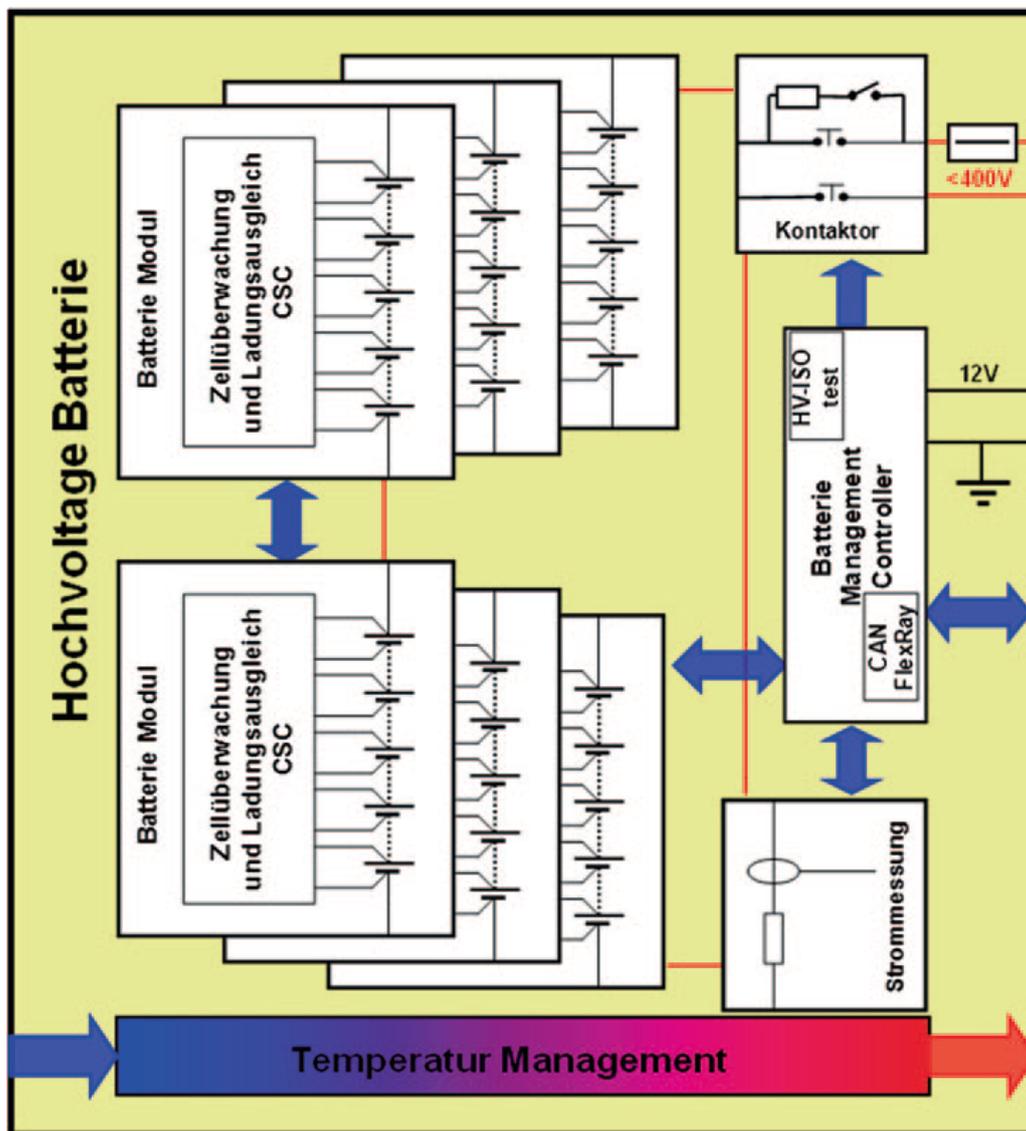


Abbildung 2.12: Batterie Management System [10]

**Batteriemodule:** Die Batteriemodule bestehen aus einzelnen Li-Zellen. Um höhere Spannungen für die Versorgung des Elektroauto-Antriebes zu erreichen ist es notwendig, die einzelnen Zellen in Serie zu schalten. Die Zellspannung und die Zelltemperatur einzelner Zellen werden überwacht, um auf entsprechende Grenzwertverletzungen reagieren zu können [10].

Ebenfalls besteht die Möglichkeit eines Ladungsausgleichs, wobei zwischen aktivem und passivem Ladungsausgleich unterschieden wird. Einzelne Zellen weisen eine unterschiedliche Selbstentladung auf, wodurch es zu Beginn des Ladevorganges zu unterschiedlichen Zellspannungen in den Modulen kommen kann. Ohne einen Ladungsausgleich könnte es bei Zellen mit geringerer Selbstentladung früher zu einer hohen Spannung und somit zu einer Überladung kommen. Mit einem passiven Ladungsausgleich ist es möglich, den Strom über einen Bypass-Widerstand an der Zelle vorbeizuleiten und somit wird die überschüssige Energie über den Widerstand in Wärme umgewandelt. Es ergibt sich damit unmittelbar das Problem, dass bei passivem Ladungsausgleich zusätzliche Verluste in Kauf genommen werden müssen. Beim Entladevorgang ist es nur so lange möglich, Leistung aus der Batterie zu beziehen, so lange alle Zellspannungen höher als die Minimalspannung sind. Dadurch ist es nicht möglich, die volle Kapazität der Batterie zu nutzen, und es kommt zu Effizienzeinbußen [25].

Eine Alternative zu Bypass-Widerständen ist das Zusammenschalten von Zellen mit gleichen, bzw. ähnlichen Parametern. Dieser Schritt erfolgt unmittelbar nach der Produktion und ist sehr zeitaufwändig, weswegen die Kosten für die Batterie steigen. Die Gleichheit der Zellen ist weiters nur zu Beginn der Lebensdauer der Batterie gegeben [25].

Mit aktivem Ladungsausgleich ist es möglich, die Überschussladung einer Zelle mittels Gleichstromsteller auf eine andere Zelle zu übertragen. Es erfolgen nur Verluste durch einen Ausgleichsstrom zwischen den Zellen. Aktiver Ladungsausgleich lässt somit einen Betrieb der Batterie mit höherer Effizienz zu [25].

Abbildung 2.13 zeigt den Unterschied zwischen passiven und aktiven Ladungsausgleich.

**Kontrolleinheit:** Diese ist für die Überwachung des SOC und des SOH Wertes zuständig. Weiters übernimmt sie die Steuerung des vorhin beschriebenen Ladungsausgleichs. Um den State of Function (SOF) Wert zu ermitteln, wird über ein Bussystem (in der Regel Controller Area Network (CAN)) mit den restlichen Komponenten des Fahrzeuges kommuniziert. Eine weitere Aufgabe der Kontrolleinheit ist die Kontrolle des Ladens über das Netz, womit die Kontrolleinheit auch für das Leistungsmanagement innerhalb der Batterie verantwortlich ist [10].

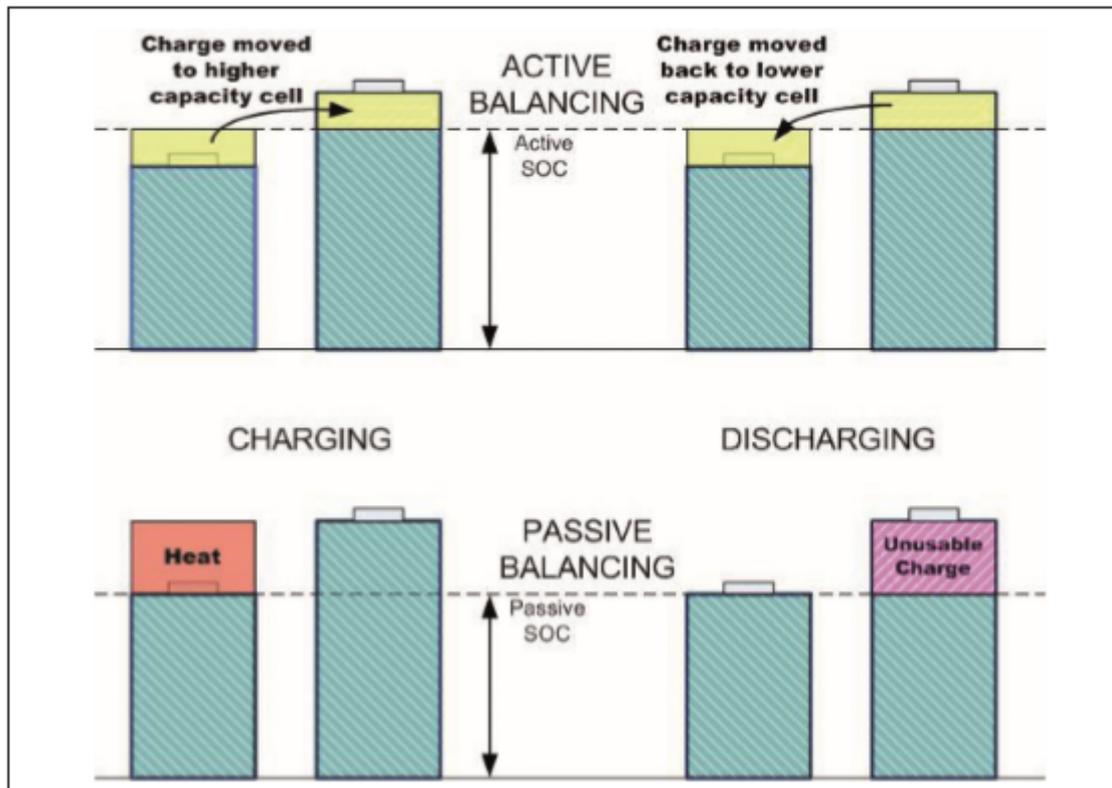


Abbildung 2.13: Ladungsausgleich [25]

**HS-Kontaktor:** Im Ruhezustand müssen die Batteriezellen vom Netz getrennt werden, um Verluste zu verringern und das Gefahrenpotenzial zu senken. Weiters bietet der Kontaktor die Freischaltung des Fahrzeuges vom Netz im Falle eines Kurzschlusses oder einer Überlastung. Als Zusatzschutz für den Kurzschlussfall ist des Weiteren eine Schmelzsicherung vorhanden [10].

**Strommessung:** Die Messung des Batteriestromes wird in der Regel direkt an der Batterie durchgeführt. Es kann hierbei zwischen Messung über einen Messwiderstand und Messung über das elektromagnetische Feld unterschieden werden [10].

**Thermomanagement:** Wie bereits erwähnt wird die Temperatur der Batterie überwacht. Einerseits muss die Batterie vor zu hohen Temperaturen geschützt werden, und andererseits muss die Betriebstemperatur optimiert werden, damit die Alterung der einzelnen Zellen gleichmäßig erfolgt. Die Zelltemperatur ist ein entscheidender Parameter für die Lebensdauer, die Sicherheit und die Verfügbarkeit von Batteriesystemen [10].

**Fazit:** Das BMS ist für den optimalen Betrieb der Batterie notwendig. Um das zu gewährleisten müssen die Messungen sehr präzise erfolgen (mV- und mA-Bereich) und die

Messwerte müssen vom BMS auf Gültigkeit beurteilt werden können. Weiters muss es für das Batteriemangement-System möglich sein, mit anderen Komponenten im Fahrzeug zu kommunizieren, was in der Regel mittels CAN-Bus realisiert wird [26].

### Batteriekontrolleinheit

Nachdem nun klar ist, mit welchen Verfahren die Batterie geladen werden kann, und wie die internen Werte der Batterie ermittelt werden können, muss noch beschrieben werden, wie das Laden der Batterie anhand der Messwerte kontrolliert werden kann. Mit der Batteriekontrolleinheit ist es möglich, die Informationen aus dem BMS auszuwerten und an die restlichen Komponenten des Fahrzeuges, sowie an das Ladegerät weiterzugeben. Die Steuerung kann dabei entweder über CAN-Bus oder über die FlexRay<sup>1</sup>-Schnittstelle erfolgen. Das Batteriesystem wird über einen zentralen Rechner überwacht, welcher als Mikrocontroller ausgeführt ist. Über einen System-Schaltkreis wird die ordnungsgemäße Funktion des Hauptrechners überwacht, wobei im Fehlerfall Maßnahmen zur Abschaltung der Batterie eingeleitet werden. Dieser Schaltkreis wird üblicherweise als Watchdog bezeichnet. Eine weitere Funktion des Mikrocomputers ist die Berechnung des SOC- und SOH-Wertes aus dem Batteriemodell. Dazu werden die Strom- Spannungs- und Temperaturmessdaten aus dem BMS herangezogen. In Abbildung 2.14 ist eine Batteriekontrolleinheit dargestellt, in welcher die eben beschriebenen Funktionen und Kommunikationsmöglichkeiten ersichtlich sind [10].

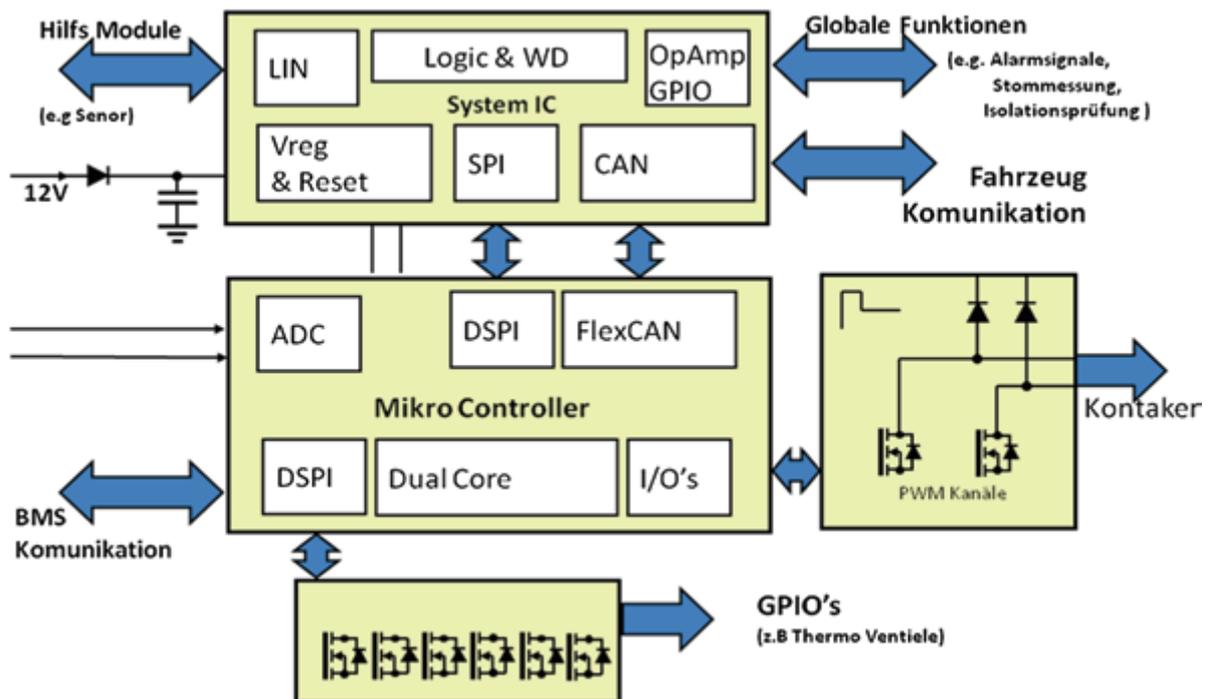


Abbildung 2.14: Batteriekontrolleinheit [10]

<sup>1</sup>Kommunikationsbus mit höherer Übertragungsrage als CAN für vermehrte Sensorik im Automobil [27]

Mit diesen Komponenten wurden nun die wichtigsten Komponenten für die Ladung und Energieversorgung des Elektrofahrzeuges auf der Seite des Fahrzeuges beschrieben. Im folgenden Kapitel wird näher auf die Ladestandards und die Ladung bezüglich der Netzseite eingegangen.

## 2.2 Ladestandards in der Elektromobilität

Ein bedeutender Aspekt in der Elektromobilität ist das Laden der Fahrzeuge. Im Laufe der Jahre wurden neue Möglichkeiten und Technologien geschaffen, mit der ein Elektroauto aufgeladen werden kann. Der wichtigste Parameter für die Elektroautoladung ist die Ladeleistung (welche sich unmittelbar aus dem Ladestrom ergibt), da diese bestimmt, wie schnell das Fahrzeug geladen werden kann. Für die Lademöglichkeiten gibt es nicht nur Restriktionen bezüglich der Batterie, sondern auch Restriktionen auf der Seite des Versorgungsnetzes. Je nach Ladetechnologie sind unterschiedliche Ladeleistungen möglich. Elektroautos zählen zu Verbrauchern mit hoher Leistung, weswegen sie hohe Anforderungen an das Netz stellen. Abbildung 2.15 zeigt, welche verschiedenen Möglichkeiten es gibt, ein Elektrofahrzeug aufzuladen [28].

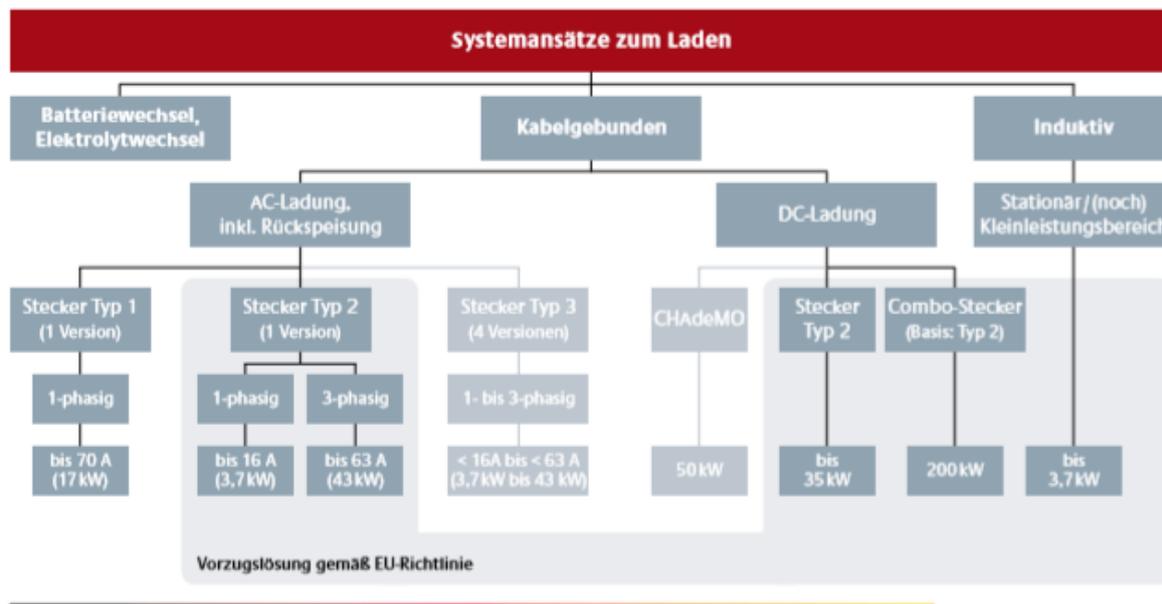


Abbildung 2.15: Lademöglichkeiten Elektroautos [28]

Bei den Messungen, welche in dieser Diplomarbeit durchgeführt werden, werden ausschließlich kabelgebundene Ladevorgänge untersucht, weswegen das Hauptaugenmerk auf die Technologien dieser Kategorie gelegt wird. Das kabelgebundene Laden erfolgt in der Regel über Ladesäulen oder über eine Wallbox. Letztere ermöglicht es, andere Lademöglichkeiten als Schutzkontakt (Schuko) Steckdosen als Ladeanschluss im Privatbereich zu verwenden. Ladesäulen werden in erster Linie im öffentlichen und im industriellen Bereich verwendet.

Auf die Ladestandards wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen. Zuvor wird noch kurz auf das Ladegerät im Elektroauto eingegangen.

### 2.2.1 Ladegerät

Das Ladegerät ist ein Interface zwischen 3 phasigem Wechselstrom (AC) und Gleichstrom (DC). Abbildung 2.16 zeigt ein solches Interface. Es ist dabei notwendig, die Anforderungen im Automotive Bereich mit den Anforderungen der Netze in Einklang zu bringen. Das Ladesystem besteht aus Netz, Filter, Leistungselektronik und Nebenverbrauchern [22].

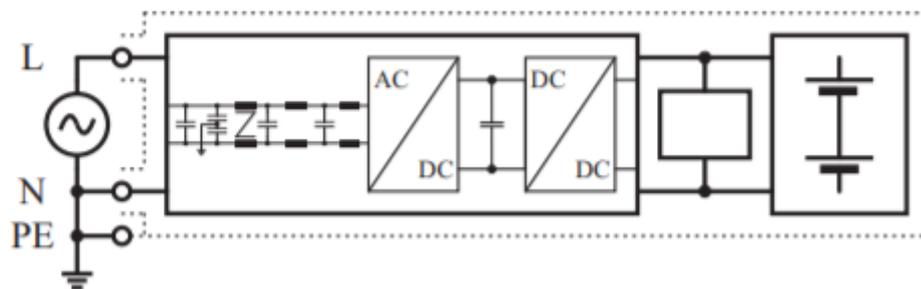


Abbildung 2.16: Interface Wechselstrom Ladegleichstrom [29]

Folgende Punkte müssen beim Ladegerät beachtet werden. Es liegen niedrige Harmonische (kleiner als 40. Ordnung) vor. Da diese nicht ins Netz eingespeist werden dürfen, ist ein Power Factor Corrector oder ein Active Frontend notwendig. Im hochfrequenten Bereich ist ein Gleich- und Gegentakt Filter notwendig. Der Umrichter wird bei Nennleistung betrieben. Bei Erreichen der Ladeendspannung wird die Leistung reduziert. Der Antriebsumrichter hat höhere Spitzenleistungen und besitzt 10.000 Betriebsstunden (Vergleich Ladeumrichter 30.000 Betriebsstunden).

Durch den bidirektionalen Leistungsfluss ist ein aktives Frontend notwendig. Außerdem müssen zusätzliche Sicherheitsaspekte beachtet werden, da die Gefahr ungewollter Spannungen am Ausgang besteht. Ebenso muss der Umrichter über eine Inselfunktion verfügen, bei der das Ladegerät einen Netzausfall erkennt. Die Verbindung des Fahrzeugs mit dem Netz erfolgt mittels berührungsgeschützten Schaltern, um das versehentliche Berühren spannungsführender Teile zu verhindern. Die Rückeinspeisung erfolgt erst bei sicherer Verbindung, wobei eine feste Verbindung zwischen Ladestation und Netz bestehen muss. Abbildung 2.17 zeigt die vollständige Anordnung der Schaltung des Ladegeräts [29].

Bei Elektroautos gibt es zwei Möglichkeiten, wo sich das Ladegerät befinden kann. Der vom Netz gelieferte Wechselstrom kann einerseits auf der Seite des Fahrzeuges für das Laden der Batterie gleichgerichtet werden, wie es beim AC-Laden erfolgt, und andererseits direkt

an der Ladesäule (LS), was bei DC-Schnellladen der Fall ist. Abbildung 2.18 verdeutlicht diese Unterschiede.

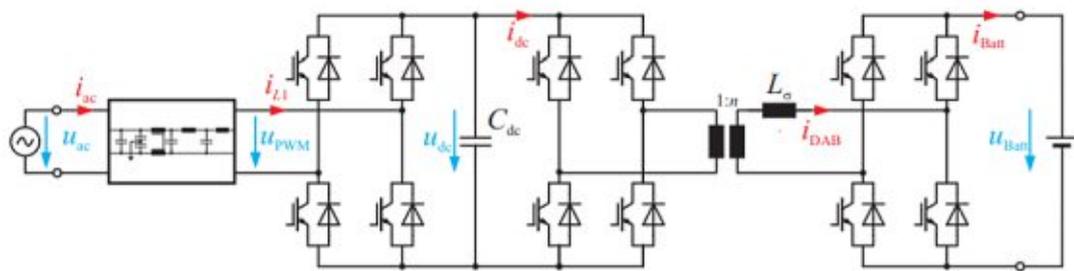


Abbildung 2.17: Vollständiges Ladegerät [29]

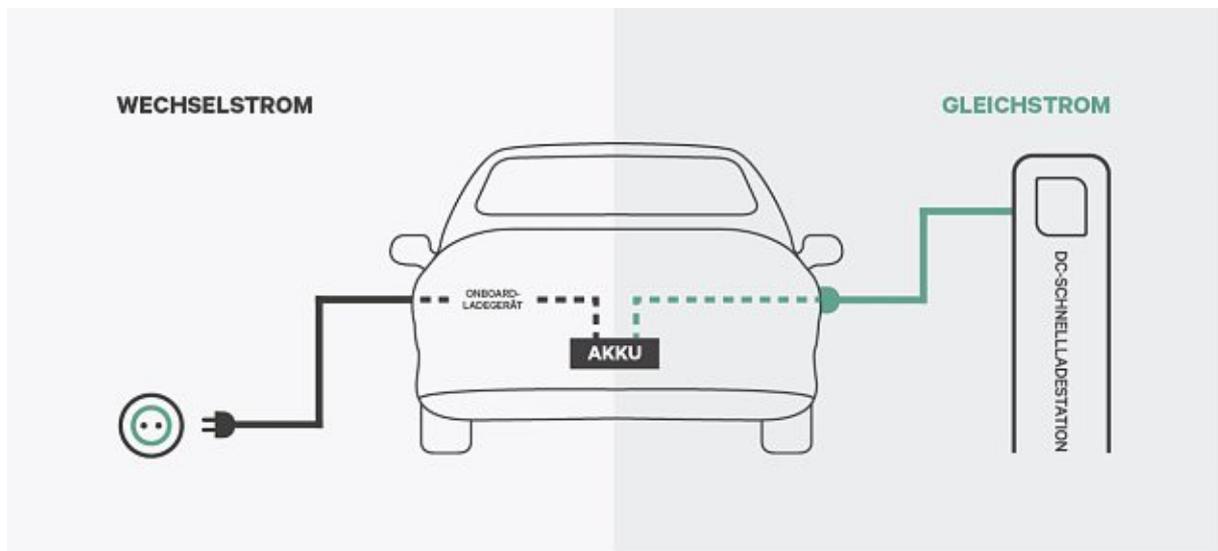


Abbildung 2.18: Vergleich DC-AC-Laden [30]

Damit wurde der Umrichter zum Laden des Fahrzeuges vollständig beschrieben, wodurch auf die Ladestandards übergegangen werden kann.

### 2.2.2 AC Laden einphasig

Von den verschiedenen Ladearten wird bei der einphasigen AC-Ladung mit der geringsten Ladeleistung geladen. Der Grund warum diese immer noch häufig verwendet wird ist der, dass in Wohngebäuden oft keine dreiphasige Anschlusssteckdose vorliegt. Weiters sind die On-Board Ladegeräte bei einphasigem System günstiger als bei dreiphasigem System.

Das Problem bei einphasigen Lasten ist, dass die Anschlussleistung von einphasigen Verbrauchern laut den Technische und Organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) auf 3,7kVA beschränkt ist, um Schiefasten zu vermeiden. Diese

Schieflastgrenze beträgt in Deutschland 4,6 kVA [31]. Die Nennspannung  $U_{N0}$  (Leiter gegen Neutralleiter) beträgt sowohl in Österreich, als auch in Deutschland 230 V [32]. Damit kann der Ladestrom bei einphasiger Last (von 4,6 kVA folgendermaßen berechnet werden:

$$I = \frac{P}{U_{N0_{DE}}} = \frac{4,6 \text{ kW}}{230 \text{ V}} = 20 \text{ A} \quad (2.7)$$

Wird der Ladestrom für die Schieflastgrenze in Österreich berechnet, so ergibt ein Wert für diesen nach folgender Gleichung.

$$I = \frac{P}{U_{N0_{AT}}} = \frac{3,7 \text{ kW}}{230 \text{ V}} = 16 \text{ A} \quad (2.8)$$

In Österreich und Deutschland sind damit unterschiedliche einphasige Ströme zulässig. Viele Elektroautohersteller legen die einphasigen Ladeströme der Fahrzeuge so fest, dass diese in Deutschland zulässig sind. Es kann jedoch vorkommen, dass diese den zulässigen Grenzwert von 16 A in Österreich überschreiten. Aus diesem Grund ist es wichtig, den einphasigen Ladestrom auf der Seite der Ladesäule zu begrenzen, um die notwendigen Grenzwerte einzuhalten.

Bezüglich der Unsymmetrie stellt die einphasige Ladung dann höhere Anforderungen an das Netz, wenn die Ladung aller einphasigen Ladesäulen im Netz nicht gleichmäßig auf die Phasen L1, L2 und L3 aufgeteilt wird. In der Regel ist es nicht realisierbar, zu jedem Zeitpunkt eine gleichmäßige Lastaufteilung auf die drei Phasen zu gewährleisten, weswegen mit Unsymmetrien gerechnet werden muss [33]. Die einphasige AC-Ladung wird trotzdem von vielen Verbrauchern verwendet. Ebenso werden im Zuge der Diplomarbeit Messungen an einphasigen Ladesäulen durchgeführt, weswegen noch detaillierter auf die verschiedenen Möglichkeiten der einphasigen Ladung eingegangen wird.

### Schutzkontakt-Steckdose

Die einfachste Art, das Elektroauto zu laden ist an einer herkömmlichen Schuko-Steckdose, welche in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Diese sind in der Regel in einem Haus ausreichend vorhanden, weswegen in diesem Fall die Anschaffungskosten wegfallen. Das Problem an der Schuko Steckdose ist, dass der Strom auf 10A begrenzt werden muss, wodurch sich mit Gleichung 2.7 eine maximale Ladeleistung von 2,3 kW ergibt. Diese Leistung reicht in den meisten Fällen nicht aus, um das Fahrzeug über Nacht vollständig zu laden [32].

Eine Strombegrenzung ist dadurch bedingt, dass es sonst zu einer Überhitzung der Kontakte oder der Leitungen kommen kann und somit auch Brandgefahr besteht. Die Leiterbelegung einer Schuko-Steckdose besteht aus den Anschlüssen L, N und PE. L ist hierbei der



Abbildung 2.19: Schuko Steckdose Ladegerät [32]

stromführende Leiter, N der Neutralleiter, der als Rückleiter dient und ohne Anschluss eines Verbrauchers Stromlos ist. PE ist der Erdverbindungsleiter zum Erden von metallischen (leitenden) Elementen des Verbrauchers [34].

### **Camping Stecker CEE16**

Eine weitere Option für einphasiges Laden ist das Laden mit einem Camping Stecker. Dieser Stecker ist auf einen Ladestrom von 16A ausgelegt, weshalb eine Ladeleistung von 3,68 kW erreicht werden kann. Die Anschaffungskosten beschränken sich hierbei auf den neuen Stecker und den eventuell nötigen Austausch der Versorgungsleitung gegen eine Leitung mit höherem Querschnitt [35]. In Abbildung 2.20 ist solch ein Camping Stecker dargestellt. Er besitzt die gleichen Anschlüsse wie ein Schuko-Stecker. Durch eine Kunststoffkonstruktion (auch Nase genannt) ist es nicht möglich, den Stecker falsch anzustecken. Aus diesem Grund können beim Campingstecker, im Gegensatz zur Schuko-Steckdose, Leiter und Neutralleiter nicht vertauscht werden.

### **Einphasige Wallbox**

Die am häufigsten empfohlene Technologie für das Laden im Heimbereich ist eine sogenannte Wallbox. Die Ladeleistung ist wieder abhängig vom maximal möglichen Ladestrom. Falls die Versorgungsleitung einen ausreichend hohen Querschnitt hat, können somit in Deutschland auch Ladeströme bis zu 20 A vorliegen, wodurch die Schiefkast maximal ausgenutzt werden kann. In Ländern ohne Schiefkastgrenze kann mit einer Wallbox eine Ladeleistung von bis zu 7,2 kW erreicht werden [32].

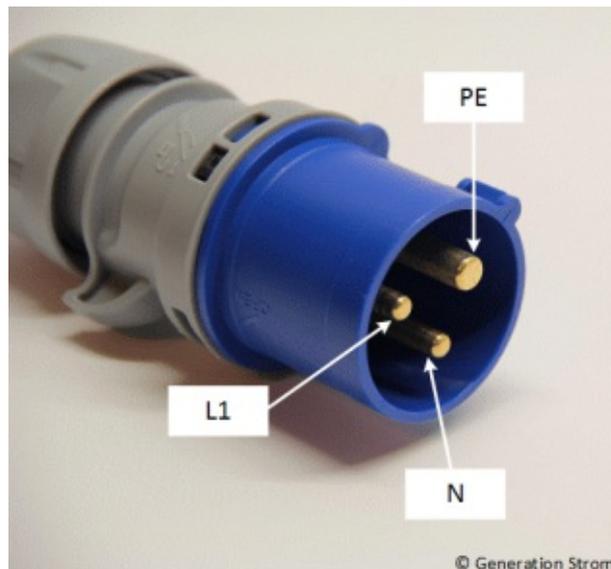


Abbildung 2.20: Camping Stecker [32]

In der Regel bietet eine Wallbox auch noch einen zusätzlichen Schutz gegen Überströme, welcher bei den beiden vorherigen Technologien entfällt. Abbildung 2.21 zeigt ein Modell einer einphasigen Wallbox.



Abbildung 2.21: Wallbox einphasig [32]

Das größte Problem an einer Wallbox ist, dass sie vergleichsweise teuer gegenüber anderen Technologien ist. Zusätzliche Kosten können durch den Austausch der Leitungen erfolgen [32].

Im Jahr 2019 wurde die Anschaffung einer Wallbox im Privatbereich dahingehend vereinfacht, dass es durch ein Urteil vom obersten Gerichtshof möglich ist, eine einphasige Wallbox ohne Nachweis des dringenden Interesses der Installation installieren zu lassen. In einem Mehrparteienhaus ist es damit auch nicht mehr notwendig, das Einverständnis der anderen Miteigentümer beim Bau einer 3,7 kW Ladesäule einzuholen. Dies gilt nur für einphasige, und nicht für dreiphasige Wallboxen, weswegen die Beantragung einer dreiphasigen Wallbox einen höheren bürokratischen Aufwand mit sich bringt [36].

### Zusammenfassung einphasiges Laden

Die drei gängigsten Technologien wurden im Laufe des letzten Kapitels vorgestellt. Es gibt jedoch auch noch eine Menge weiterer (zum Teil sehr produktspezifischer) Technologien. Generell gilt, dass einphasige Ladetechnologien zwar die kostengünstigsten sind, doch ihre Ladeleistung ist durch die Schiefastgrenze so gering, dass ein Ladevorgang für einen normalen Betrieb des Elektroautos nicht vollständig erfolgen kann.

#### 2.2.3 AC Laden Dreiphasig

Beim dreiphasigen Laden gibt es keine Schiefastbegrenzung wie beim einphasigen Laden, weshalb eine höhere Ladeleistung möglich ist. Dadurch sind auch die Ladeströme höher. In Europa sind dreiphasige Stecker der Standard [35]. Der Ladestrom bei dreiphasigem Laden errechnet sich folgendermaßen:

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_{Str}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{AL}} \quad (2.9)$$

Wobei die Strangspannung mit der Außenleiter laut der folgenden Gleichung zusammenhängt.

$$U_{Str} = \frac{U_{AL}}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Im privaten Wohnbereich sind Leistungen von bis zu 11 kW möglich. Bei einer höheren Ladeleistung (von z.B. 22 kW) ist eine Absprache mit dem Netzbetreiber notwendig, da dadurch Adaptionen im Netz notwendig sein können. Die Netzspannung im Niederspannungsnetz beträgt 400 V (Außenleiterspannung). Dadurch ergibt sich mit Gleichung 2.9 ein Ladestrom von 32 A.

Im öffentlichen Bereich ist eine Ladeleistung von 43 kW, und somit ein Ladestrom von 63 A, möglich [35].

Bei Ladeleistungen über 11 kW muss vom Netzbetreiber überprüft werden, ob diese Leistung am entsprechenden Anschlusspunkt möglich ist. Dabei kann die Notwendigkeit bestehen, einen speziellen Überstromschutz zu installieren [37]. Zusätzlich ist noch zu beachten, dass der Stecker gegen ein Abziehen im Ladezustand gesichert sein muss, da ansonsten durch die plötzliche Stromunterbrechung Lichtbögen entstehen. All diese zusätzlichen Anforderungen verursachen zusätzliche Kosten.

Bei dreiphasigem Laden sind die Unsymmetrien geringer, da es sich um keine Schiefast handelt. Dadurch, dass ein Elektroauto kein perfekt symmetrischer Verbraucher ist und dadurch, dass die Ladung kein perfekt symmetrischer Vorgang ist treten weiterhin nicht vernachlässigbare Unsymmetrien im Netz auf [33].

Bei der dreiphasigen Ladung ist die Leistung ausreichend hoch, um das Fahrzeug vollständig zu laden. Anschließend werden der Ladestecker für dreiphasiges Laden und dessen mögliche Implementierung im Haushalt vorgestellt.

### Typ 2 - Stecker

Dieser dreiphasige Stecker wurde als Standard in Europa festgelegt. Für Ladeströme von 16 A, 32 A und 63 A ist die Steckertechnologie gleich. Die einphasige – und dreiphasige Ladung erfolgt mit demselben Stecker [35].

Abbildung 2.22 zeigt diesen Stecker mit Belegung der Kontakte. Dabei sind L1, L2 und L3 die stromführenden Leiter, deren Spannungen jeweils  $120^\circ$  zueinander phasenverschoben sind, *neutral* der Neutraleiter, der im symmetrischen Fall stromlos ist, *earth* die Erdverbindungsleitung und *proximity* und *control pilot* notwendige Anschlüsse für die Kommunikation.



Abbildung 2.22: Typ 2 Ladestecker [35]

Ein Typ 2 Stecker kann je nach Modell des Elektroautos mit unterschiedlichen Stromstärken betrieben werden. Es muss somit für das Elektroauto möglich sein, der Ladesäule den gewünschten Wert zu kommunizieren. Das vorhin beschriebene Sichern gegen Rausziehen des Steckers ist bei diesem Standardstecker gegeben. Für die Kommunikationsmöglichkeiten verfügt dieser Stecker über zwei zusätzliche Kontakte, welche der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule dienen (Control Pilot CP und Proximity PP). Zusätzlich gibt es eine Kupplung um ein Wegfahren bei eingestecktem Stecker zu verhindern. Sobald die Ladesäule erkennt, dass der Stecker angesteckt wurde wird dieser verriegelt und das Laden des Autos wird gestartet. Dies geschieht mit Hilfe des PP-Anschlusses, welcher über einen ohmschen Widerstand  $R_{pp}$  angeschlossen ist. Nach Beendigung des Ladevorganges muss die Ladesäule über das Ladeende informiert werden. Dies erfolgt durch eine Unterbrechung der CP-Leitung. Beim Typ 2 Stecker erfolgt die Ansteuerung der CP-Leitung direkt über das Ladegerät. Alternativ dazu kann die CP-Leitung manuell durch einen Schalter unterbrochen werden, was z.B. über einen Reed Kontakt der einen magnetischen Schalter betätigt, realisiert werden kann. Die Unterbrechung der Control Pilot Leitung führt auch bei Abziehen des Steckers im Ladezustand zu einer Beendigung des Ladevorganges, und somit zu einer Unterbindung von Lichtbögen [35], [38]. Eine weitere Funktion der CP-Leitung ist, dass die Ladesäule dem Elektroauto über diese den maximal möglichen Ladestrom mitteilt. Über die PP-Leitung ist es für Ladesäule und Fahrzeug möglich zu erkennen, welche maximale Belastung das Ladekabel aushält [39].

In Abbildung 2.23 ist die Verbindung der Ladesäule mit dem Fahrzeug dargestellt, wobei in dieser Abbildung nur L1 dargestellt ist. Die Phasen L2 und L3 können äquivalent dazu ergänzt werden.

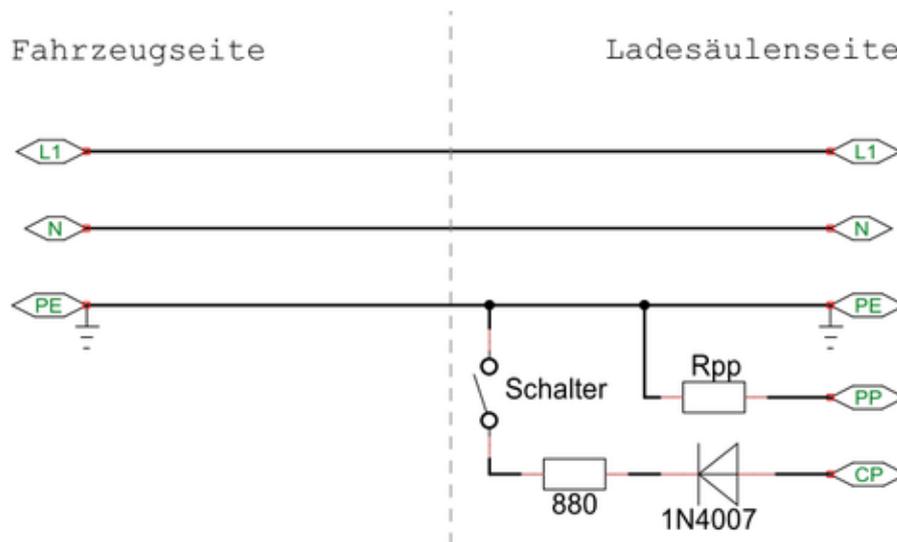


Abbildung 2.23: Kommunikation Typ 2 - Stecker [38]

Im Haushalt wird das Laden über einen Typ 2-Stecker mit einer Wallbox implementiert.

Genau wie bei einphasigem Laden verursacht diese zusätzliche Kosten. Weiters ergibt sich ein erhöhter bürokratischer Aufwand bei Mehrparteienhäusern, da im Gegensatz zu einphasigem Laden beim Einbau die Interessen des Antragsstellers dargelegt werden müssen [36].

### **Zusammenfassung dreiphasiges Laden**

Mit dreiphasigem Laden sind ausreichend hohe Ladeleistungen möglich, weswegen diese Technologie gegenüber der einphasigen zu bevorzugen ist. Demgegenüber stehen sehr hohe Anschaffungs- und Installationskosten. Für eine effiziente Nutzung des Elektroautos ist es aber zwingend notwendig, eine ausreichende Ladung der Batterie gewährleisten zu können.

#### **2.2.4 AC Laden Zweiphasig**

Manche Elektroautovarianten bieten zweiphasige Ladung der Elektroautos mit einem Ladestrom von 16 A an. Durch die zwei aktiven Leiter ist somit eine Ladeleistung von etwa 7,4 kW möglich. Das Auto wird dabei dreiphasig angeschlossen, wobei nur zwei der drei Phasen am Ladevorgang beteiligt sind. Bei zweiphasigem Laden kommt es (wie bei einphasigem Laden) zu Schiefasten im Verteilernetz und somit zu Unsymmetrien [6].

#### **2.2.5 Gleichstromladen**

Bei den vorhergehenden Technologien war es notwendig, dass sich der Umrichter auf der Elektroautoseite befindet. Für die Ladung der Batterie ist Gleichstrom notwendig, weswegen ein etwaiger Wechselstrom gleichgerichtet werden muss.

Gleichstromladung ermöglicht noch höhere Ladeleistungen als bei dreiphasigem Laden. Die Ladeleistung liegt im Moment zwischen 6 kW und 400 kW. In Zukunft sollen bis zu 900 kW Ladeleistung möglich sein. Da der Effektivwert eines Wechselstroms der Wert ist, welcher die gleiche Leistung erzeugt, die ein äquivalenter Gleichstromwert erzeugen würde, errechnet sich der Ladestrom ebenfalls aus Gleichung 2.7.

Die Ladespannung ist höher als bei Wechselspannung, und kann zwischen 500 V und 800 V DC betragen. Somit ergibt sich bei einer Spannung von 800 V und einer Leistung von 400 kW ein Ladestrom von 500 A. Daraus folgt, dass auch hier ein Schutz gegen Überlast und ein Schutz gegen Ausstecken im Ladebetrieb notwendig sind.

Durch die hohen Ladeleistungen werden DC Ladestationen als Schnellladestationen bezeichnet. DC Technologien sind weiters für die bidirektionale Ladung geeignet, welche für

zukünftige (und zum Teil bereits vorhandene) Konzepte wie Vehicle to Grid (V2G) und Vehicle to Home (V2H) notwendig sind.

Da die Gleichstromladung viele Vorteile bietet, wird diese Technologie laufend weiterentwickelt. In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die beiden vorherrschenden Standards eingegangen.

### Combined Charging System (CCS)

Die Ausführung dieses Steckers basiert auf dem Typ 2 Stecker, wobei zwischen CCS1 und CCS2 Stecker unterschieden wird. Wird der CCS2-Stecker betrachtet, so verfügt dieser über zwei Kommunikationskontakte (CP und PP), einen Schutzkontakt (PE), und zwei Leistungsanschlüsse (DC+ und DC-) für die Gleichstromladung, welche in Abbildung 2.24 dargestellt sind [40]. Der CCS1-Stecker verfügt über die gleiche Art von Anschlüssen, weswegen ein Tausch von Typ1 zu Typ2 Stecker ohne großen Aufwand möglich ist [41].

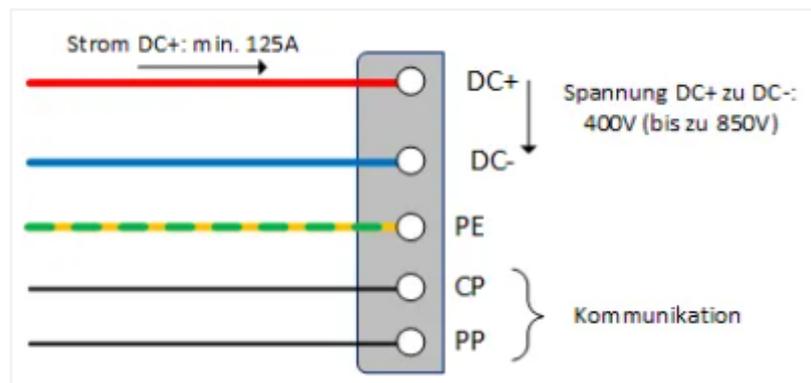


Abbildung 2.24: CCS Belegung [40]

Abbildung 2.25 zeigt den Aufbau von CCS-Steckern.

In Abbildung 2.25 ist ersichtlich, dass mit einer CCS2-Steckdose sowohl AC- als auch DC-geladen werden kann, da es auf dieser möglich ist, auch einen reinen Typ 2 – Stecker für die AC-Ladung anzuschließen. Typische Leistungen sind 50 kW. Das ergibt eine Spannung von 400 V und einen Strom von 125 A. Eine Leistung von 350 kW wäre möglich. Die maximalen Dauerströme liegen bei 200 A (ungekühlt) und 500 A (gekühlt). Um mit 350 kW laden zu können, wird nicht nur eine Ladesäule benötigt, welche das Kabel kühlt, sondern auch Fahrzeuge mit 800 V Architektur. Das bedeutet, dass die Akkus eine Systemspannung von 800 V haben. Hierfür ist der Porsche Taycan ein Beispiel. CCS1 ist eher im amerikanischen und asiatischen Raum verbreitet, CCS2 im europäischen Raum [42]. CCS-Stecker bieten durch ihre Bauart den Vorteil, dass auch Elektroautos ohne Schnellademöglichkeit an die Ladesäulen angeschlossen werden können.



Abbildung 2.25: CCS-Stecker [41]

## CHAdEMO

Dieser Schnellladestandard, welcher in Japan entwickelt wurde (CHAdEMO) wird von der Chademo Association laufend weiterentwickelt. Er ist im Moment im asiatischen Raum weitgehend verbreitet. Damit ein Auto mittels CHAdEMO-Standard laden kann, muss ein CHAdEMO Anschluss am Auto existieren, denn CHAdEMO ist nicht mit Typ-1 oder Typ-2 kompatibel. Bei CHAdEMO ist bei der Ladung an öffentlichen Ladesäulen kein selbst mitgeführtes Ladekabel notwendig, da an den Ladesäulen immer ein Kabel fest verbaut ist. Die maximalen Dauerströme sind auf 125 A begrenzt, wobei an einer Begrenzung bis 400 A gearbeitet wird. Somit ist bei 400 V und 125 A eine Ladeleistung bis 50 kW möglich. Im Moment wird an Ladestationen mit bis zu 400 kW Ladeleistung gearbeitet und zukünftig soll die Ladeleistung auf bis zu 900 kW gesteigert werden [43], [44].

Der Unterschied zum CCS-Standard ist die Kommunikation. Hierfür gibt es 7 Pins, was in Abbildung 26 ersichtlich ist. Die Kommunikation beim CHAdEMO-Standard läuft über CAN-Bus, womit bidirektionales Laden einfacher zu realisieren ist, da die Kommunikation der Sensoren untereinander und mit dem Boardcomputer im Automobil mit CAN erfolgt. In Abbildung 2.26 und Abbildung 2.27 ist der Aufbau eines CHAdEMO-Steckers abgebildet [43].

Abbildung 2.27 zeigt den inneren Aufbau und die Steckerbelegung des CHAdEMO-Standards. Die Leistungsanschlüsse sind dabei die Anschlüsse 5 und 6 (DC- und DC+).

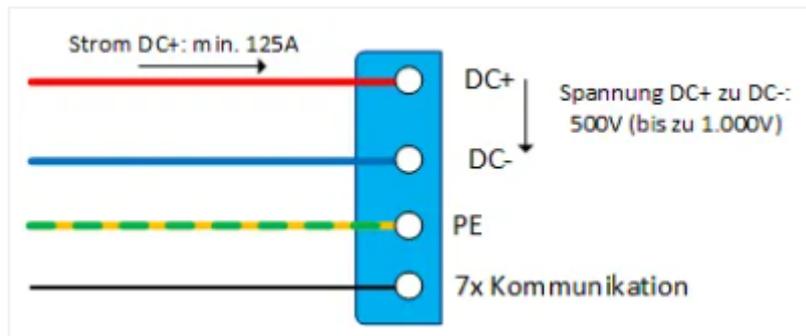


Abbildung 2.26: Aufbau CHAdeMO-Stecker [44]

Für die Kommunikation werden analoge und digitale Signale verwendet. Die Anschlüsse 2 und 10 dienen dazu, mit der Ladung zu beginnen, bzw. diese zu beenden. Diese sind redundant ausgeführt. Anschluss 7 ist für das Verriegeln des angesteckten Fahrzeuges notwendig (vergleichsweise PP bei Typ2-Stecker). Das Signal, mit dem das Laden erlaubt wird, wird über Anschluss 4 übertragen. Dieser Anschluss entspricht dem Anschluss CP beim Typ2-Stecker. Alle diese Anschlüsse übertragen analoge Signale. Für die digitale Übertragung sind die Anschlüsse 8 (CAN-High) und 9 (CAN-Low) zuständig. Die Elemente, die miteinander kommunizieren sind dabei als Knoten zwischen CAN-H und CAN-L angeschlossen [43], [45].

Weiters gibt es den Anschluss 1, welcher für die Erdverbindung verantwortlich ist. Dieser dient in erster Linie Schutzzwecken, kann aber auch für die CAN-Kommunikation genutzt werden, wenn eine der beiden Leitungen ausfällt.

CHAdeMO zeichnet sich durch seine hohen Ladeleistungen aus, wodurch es möglich ist, das Fahrzeug in vergleichsweise kurzer Zeit vollständig aufzuladen. CHAdeMO bietet durch die Umsetzung mit CAN den Vorteil, dass eine etwaige Umsetzung der bidirektionalen Kommunikation in Zukunft erleichtert werden kann [43].

### Tesla Supercharger

Eine Sonderform des Gleichstromladens stellt der Tesla Supercharger dar, da dieser rein für Fahrzeugmodelle der Marke Tesla verwendet werden kann. Erste Modelle der Supercharger-Ladestation waren in der Lage dazu, eine Ladeleistung von bis zu 120 kW zu liefern. Aktuelle Entwicklungen erlauben für das Tesla Modell 3 in Kombination mit einem Supercharger Ladeleistungen von bis zu 250 kW. Eine Möglichkeit dabei, die Effizienz des Ladevorganges zu erhöhen ist, dass der Nutzer via Navigationssystem angibt, zu welcher Supercharger-Ladestation er fährt. Dadurch wird die Batterie vorerwärmt und auf die optimale Ladetemperatur gebracht, was die Ladezeit um bis zu 25 % verkürzen kann. Als Steckerart wird eine Abwandlung des Typ2-Steckers verwendet. Für die Ladung mit einem

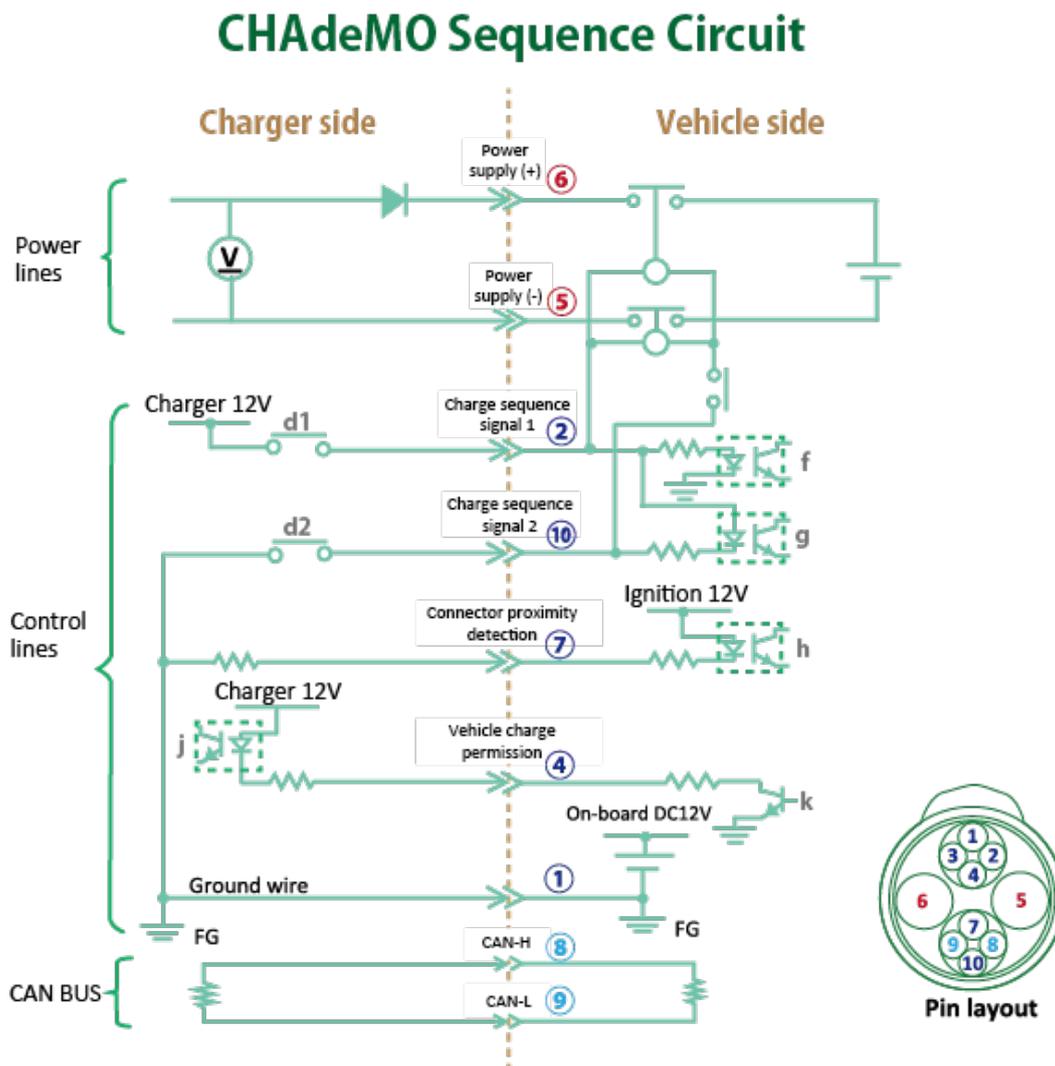


Abbildung 2.27: Innerer Aufbau des CHAdeMO-Standards [43]

Supercharger ist jedoch eine bestimmte Software-Konfiguration des Elektroautos notwendig, weswegen diese nur für Autos der Marke Tesla verwendet werden kann [46], [47].

### Zusammenfassung Gleichstromladen

Mit Gleichstromladestationen sind aufgrund der nicht vorhandenen Begrenzung der Ladeströme auf der Seite des Netzes höhere Ladeleistungen möglich. Je nach geographischer Lage sind unterschiedliche Standards weitgehend implementiert.

#### 2.2.6 Weitere nichtkabelgebundene Lademöglichkeiten

Um das Kapitel abzuschließen werden noch kurz zwei andere Möglichkeiten vorgestellt, welche zur Ladung von Fahrzeugen herangezogen werden. Beide Varianten wurden bereits in Abbildung 2.15 vorgestellt.

Die erste Möglichkeit ist eine induktive Ladung. Der Vorteil besteht darin, dass keine direkte elektrische Verbindung zwischen Ladesäule und Fahrzeug vorliegt, wodurch gefährliche Fehlerströme vermieden werden können. Die beiden Systeme sind (vergleichbar mit einem Transformator) galvanisch getrennt. Eine Umsetzung dieser Technologie wird durch Notwendigkeit der zusätzlichen Ladeinfrastruktur behindert [6].

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, einen Batteriewechsel durchzuführen. Die entladene Batterie wird dann stationär neu aufgeladen, während mit dem Fahrzeug problemlos mit der neuen Batterie weitergefahren werden kann. Das Problem bei dieser Batterielademöglichkeit besteht darin, dass kaum Fahrzeughersteller solche Wechselsysteme anbieten, und damit noch keine flächendeckende Umsetzung vorhanden ist [48].

### 2.2.7 Zusammenfassung der Technologien

In diesem Kapitel wurden die drei grundsätzlich verschiedenen Technologien zusammengefasst. Am einfachsten und kostengünstigsten wäre eine einphasige Wechselstromladung. Die Ladeleistung ist hierbei jedoch für die meisten Anwendungsfälle zu gering. Besser ist in dem Fall die dreiphasige Wechselstromladung, mit der höhere Ladeleistungen möglich sind. Ein Schnellladen, sowie bidirektionale Kommunikation ist nur mit Gleichstrom möglich, doch diese Technologie ist die teuerste Alternative von allen, weswegen sie mehr im öffentlichen Bereich als im Privatbereich verwendet wird. Für jede der Technologien gibt es eine Vielzahl von Ausführungsarten, welche immer weiterentwickelt werden.

Die abschließende Tabelle fasst nochmal alle zuvor ermittelten Daten zu den Technologien kurz zusammen. Zweiphasiges Laden wird hierbei nicht berücksichtigt, da dieses nur vom Elektroauto gesteuert wird, und keine eigene Technologie ist. Die Preise beziehen sich auf die Kosten einer Wallbox im Privatbereich. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass mit einer Wallbox beim Gleichstromladen nicht dieselben Ladeleistungen möglich sind wie bei öffentlichen Ladesäulen.

Tabelle 2.1: Vergleich Ladetechnologien [49], [50], [51]

Technologie	Ladeleistung	Ladestrom	Preis
1ph AC-Laden	3,68 kW	16 A	etwa 500€
3ph AC-Laden	Bis zu 22 kW	32 A	etwa 1000€
DC-Laden	Bis zu 400 kW	500 A	über 15000€

### 2.2.8 Modelle von Elektroautos

Zum Abschluss dieses Kapitels werden die am weitesten verbreiteten Modelle von Elektroautos kurz vorgestellt. Es wird dabei auf die Unterschiede zwischen Batteriekapazität, Reichweite und Ladestandard eingegangen. Bei den Tests der Reichweite wird zwischen Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Procedures (WLTP) und Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) unterschieden. Beim NEFZ beträgt die Maximalgeschwindigkeit 120 km/h, wohingegen beim WLTP auch mit Geschwindigkeiten über 130 km/h gefahren wird. Es wird in vier Phasen gemessen, bei denen jeweils Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h und 130 km/h gefahren werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt in etwa 47 km/h. Der Vorteil des WLTP gegenüber dem NEFZ ist, dass dieser mit 23 km mehr als doppelt so lang ist (NEFZ 11 km) und mit einer Dauer von 30 min auch 10 Minuten länger durchgeführt wird. Mit dem WLTP werden die Bedingungen in der Realität besser nachgebildet als beim NEFZ, weswegen dieser neu zugelassene Fahrzeuge verpflichtend ist [52], [53].

Tabelle 2.2 zeigt den Modellvergleich der Elektroautos. Die angegebene Reichweite wird für die WLTP Testwerte angegeben.

Mit den Beschreibungen in Kapitel 2 wurden die Grundlagen für die Messung und Auswertung der Ladevorgänge geschaffen.

Tabelle 2.2: Vergleich Ladetechnologien [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62]

Modell	Motorleistung	Batteriekapazität	Reichweite	Ladetechnologie
VW e-Golf	85 kW	24,2 kWh	145 km	AC bis 7,2 kW, DC bis 50 kW
VW ID.3	150 kW	45,0 kWh	330 km	AC bis 11 kW, DC bis 50 kW
BMW i3	125 kW	42,2 kWh	260 km	AC bis 11 kW, DC bis 50 kW
Mini Cooper SE	135 kW	32,6 kWh	270 km	AC bis 11 kW, DC bis 50 kW
Smart EQ Fortwo	60 kW	17,6 kWh	159 km	4,6 kW AC
Opel Corsa-e	100 kW	50,0 kWh	337 km	7,4 kW AC, 100 kW DC
Renault Zoe	80 kW	41,0 kWh	316 km	AC bis 22 kW, DC bis 50 kW
Nissan Leaf	110 kW	40,0 kWh	270 km	AC bis 6,6 kW, DC bis 50 kW
Nissan Leaf e+	160 kW	62,0 kWh	385 km	AC bis 6,6 kW, DC bis 50 kW
Tesla Modell 3 Standard	225 kW	53,0 kWh	409 km	AC bis 16,5 kW, DC bis 200 kW
Audi e-tron	300 kW	95,0 kWh	400 km	AC bis 22 kW, DC bis 150 kW
Mercedes EQC	300 kW	80,0 kWh	400 km	AC bis 7,4 kW, DC bis 110 kW

## 3 Beschreibung der Rahmenbedingungen

Ziel der Diplomarbeit ist es, einen Elektroautofuhrpark zu untersuchen, und anhand der ausgewerteten Daten die Auswirkungen auf das Verteilnetz zu bestimmen. Dazu werden Ladevorgänge mit verschiedenen Ladeleistungen, sowie unterschiedliche Fahrzeugtypen betrachtet. Es ist dabei wichtig, die Ladevorgänge direkt an den Fahrzeugen und an den Ladesäulen zu messen. Um alle notwendigen Daten für die Analyse ermitteln zu können, sind Messungen mit verschiedenen Messsystemen notwendig.

In diesem Kapitel wird der grundsätzliche Aufbau der Messungen beschrieben. Die Messsysteme dienen dazu, die Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge an den Ladesäulen zu messen. Als Messsystem wird dabei das Siemens Embedded Micro Metering Module (SEM3) in Verbindung mit einem On Board Diagnose (OBD) Messsystem der Firma Aviloo (welches an den OBD2-Anschluss der Fahrzeuge angesteckt wird) verwendet. Weiters wird das Power Quality Messgerät Combi Quant der Firma Haag für Messungen der Ladesäulen Abgänge verwendet. Die gemessenen Daten der Ladevorgänge werden zur weiteren Bearbeitung und Visualisierung in ein Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) System übertragen und von dort in DataLab (Datenbank) exportiert und gespeichert. Für weitere Analysen ist solch eine strukturierte Datenbank notwendig, in der die Daten eindeutig gespeichert sind und von welcher aus diese weiterverarbeitet werden können. Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des SEM3-Messsystems und wie die einzelnen Module verschaltet sind. Abbildung 3.2 zeigt das auf der Seite des Fahrzeugs verwendete Messsystem der Firma Aviloo.

### 3.1 Aufbau des SEM3-Messsystems

Aufbauend auf Abbildung 3.1 wird nun auf die verschiedenen Module des Messsystems eingegangen, und darauf wie diese konkret bei der Messung der Ladevorgänge verwendet werden. Mit dem SEM3-Messsystem ist es möglich, den Strom, die Spannung und den Energieverbrauch von bis zu 45 Stromkreisen zu messen. Im Fall der Ladevorgangsmessung werden zehn Niederspannungsabzweige gemessen, welchen elf verschiedenen Ladesäulen zugeordnet sind.

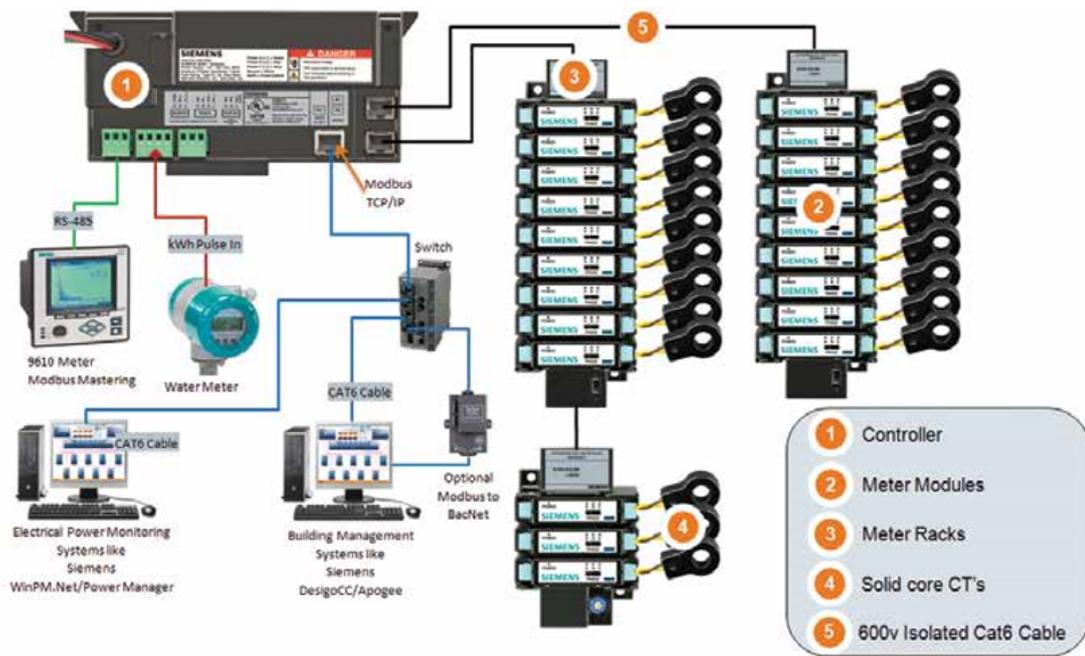


Abbildung 3.1: Modularer Aufbau SEM 3 [63]



Abbildung 3.2: Aviloo-Messsystem

### 3.1.1 Verbindung Schaltschrank - Garage

Im Niederspannungs Hauptverteiler (NSHV) 2 am Betriebsgelände gibt es zwei Schaltfelder, von deren Abgängen aus die Ladesäulen gespeist werden. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungen der Abgänge sind die Leitungen zu den Ladesäulen mit unterschiedlichen Querschnitten ausgeführt. Zum Erfassen der Ströme werden Stromwandler in den einzelnen Abgängen verwendet. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 zeigen eine Übersicht über die Ladesäulen mit deren zugeordnetem Abgang, die Ladepunkte der jeweiligen Ladesäule und die verwendeten Versorgungsleitungen, sowie deren Längen.

Abbildung 3.3 zeigt, wie die einzelnen Abgänge im Verteiler ausgeführt sind. Weiters zeigt Abbildung 3.4 die Lage der verschiedenen Ladesäulen in und vor der Garage.



Abbildung 3.3: Abgänge Schaltschrank

Tabelle 3.1: Ladesäulenaufflistung Garage

Ladesäule	Verteiler	Feld	Abgang	Ladepunkte	Steckerart	Kabel	Länge	Wandlertyp
LS 1	NSHV2	F01	Q12	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	65 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 2	NSHV2	F01	Q11	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	65 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 3	NSHV2	F01	Q08	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	57 m	3 x 250 A/0,1 A
LS 4	NSHV2	F03	Q10	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	57 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 5	NSHV2	F03	Q08	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	50 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 6	NSHV2	F03	Q09	2 x 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	50 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 7	NSHV2	F03	Q11	max. 11 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	50 m	3 x 400 A/0,1 A

Tabelle 3.2: Ladesäulenaufflistung Außen

Ladesäule	Verteiler	Feld	Abgang	Ladepunkte	Steckerart	Kabel	Länge	Wandlertyp
LS 8	NSHV2	F01	Q03	150 kW	CCS	NYY-O 4 x 2 x 95 mm <sup>2</sup>	50 m	3 x 400 A/0,1 A
LS 9	NSHV2	F01	Q09	1 x 11 kW, 2 x 3,7 kW	Typ2	NYY-J 5 x 1 x 25 mm <sup>2</sup>	50 m	3 x 250 A/0,1 A
Nord 1	NSHV2	F01	Q01	2 x 3,7 kW	Typ2	NYY-O 4 x 1 x 240 mm <sup>2</sup>	120 m	3 x 400 A/0,1 A
Nord 2	NSHV2	F01	Q01	2 x 3,7 kW	Typ2	NYY-O 4 x 1 x 240 mm <sup>2</sup>	120 m	3 x 400 A/0,1 A



ist [63]. Über den Controller ist es jedoch möglich, diese Einzelmessungen zur Messung eines Dreiphasensystems zu kombinieren [64].

#### Messgestell

Dabei handelt es sich um eine Schiene, an welche die Messmodule befestigt werden. Diese dient zur kompakten Aneinanderreihung und sicheren Befestigung der Messmodule im Schaltschrank [63]. Weiters werden die Messwerte der Messmodule über das Messgestell gebündelt, und mittels Ethernet Kabel an den Controller weitergegeben [64].

#### Stromwandler

Für die Messung der Ladevorgänge ist es notwendig, die Ladeströme der einzelnen Abzweige zu kennen. Die Ermittlung dieser Messwerte erfolgt mit Hilfe von Stromwandlern, welche als Stromzangen ausgeführt sind, und somit ohne Auftrennung des Stromkreises in diesen eingefügt werden können. Je nach zu messendem Strom gibt es Stromwandler mit Maximalströmen von 50 A bis 1200 A [63].

Der Abgang Q3 von F01 muss für eine Ladeleistung von bis zu 150 kW ausgelegt sein. Für die Leistung einer Gleichstromladung

$$I_{Q3} = \frac{P_{Q3}}{U} = \frac{150 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 217 \text{ A} \quad (3.1)$$

ergibt sich ein maximal zu erwartender Strom über den Abgang Q3 von 217 A, weswegen für diesen Abgang ein 400 A Stromwandler ausgewählt wird.

Die maximale Ladeleistung über eine Phase von Q9 (im Feld) F01 ist die Summe aus 11 kW (dreiphasig) und zweimal 3,7 kW (einphasig), womit sich der maximal zu messende Strom zu

$$I_{Q8,9} = \frac{11 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} + 2 \cdot \frac{3,7 \text{ kW}}{230 \text{ V}} = 48 \text{ A} \quad (3.2)$$

ergibt. Aufgrund eventuell späterer Erweiterung der Ladestationen werden Stromwandler mit einem Strom von 250 A verwendet. Des Weiteren wurden in einem vorhergehenden Versuch die Genauigkeit der 125 A und 250 A Stromwandler miteinander verglichen. Da sich dabei die Genauigkeit der beiden Wandler nur geringfügig voneinander unterschieden haben, kann aufgrund der Möglichkeit der Erweiterung problemlos der 250 A-Wandler verwendet werden.

Q11 aus F01 führt zu einer Ladesäule mit zwei dreiphasigen Ladepunkten. Diese sind auf eine maximale Ladeleistung von jeweils 11 kW ausgelegt. Pro Ladepunkt können damit Ströme von bis zu 16 A fließen, womit der Stromwandler und die Leitung auf einen Strom von 32 A ausgelegt werden müssen. Stromwandler mit 125 A Nennstrom könnten somit durchaus verwendet werden. Aus denselben Gründen wie für Q9 wird in dem Fall jedoch auf 250 A Wandler zurückgegriffen.

Abbildung 3.5 zeigt, wie die Wandler im Schaltschrank eingebaut sind (hier exemplarisch für Abgang Q3 von F01). In diesem Abgang sind die einzelnen Phasen doppelt ausgeführt, was auch in Abbildung 3.5 ersichtlich ist.



Abbildung 3.5: Stromwandler Abgang

#### Kommunikationskabel

Für die Verbindung der Messmodule mit dem Controller werden Kommunikationskabel benötigt. Diese sind paarweise und verdreht ausgeführt (vergleichsweise Twisted Pair Kabel für Local Area Network (LAN) Verbindung), wobei deren Isolierungen für Spannungen von bis zu 600 V ausgelegt sind. Die Kommunikationskabel der SEM3 Messeinrichtung sind weiters auf Bidirektionalität ausgelegt, was bedeutet, dass eine Kommunikation von den Messmodulen zum Controller, und auch vom Controller zu den Messmodulen möglich ist [63].

#### 3.1.3 Weiterverarbeitung der Messdaten

Die Messdaten liegen nach der Messung im Controller vor. Mittels Webbrowser ist es möglich, aus der Ferne auf diese Daten zuzugreifen. Es besteht die Möglichkeit, die Daten im Browser einzusehen und das Messsystem zu konfigurieren. Unter anderem können dabei die Übertragungseinstellungen konfiguriert und Alarmwerte für Überschreitung von Grenzwerten eingestellt werden. Das vorhin beschriebene Kombinieren von Messwerten einzelner Phasen zu einem Dreiphasensystem, was beim Siemens SEM3 als Multi-Pol Konfiguration bezeichnet wird, erfolgt ebenfalls über den Webbrowser.

Über die Diagnose-Konfiguration ist es möglich, die Modbus Register-Adresse zu erfahren, und in weiterer Folge die Messwerte an das SCADA System zu übertragen. Für diese Übertragung werden die Daten aus dem SEM3-Controller über Lichtwellenleiter an das Siemens SICAM A8000 Fernwirkgerät übertragen. Zu Beginn der Messungen erfolgt die Übertragung über den Global System for Mobile Communication (GSM) Standard. Zukünftig ist geplant, Lichtwellenleiter als Übertragungsmedium einzusetzen. Das SICAM A8000 Fernwirkgerät ermöglicht es, die Anlage zu überwachen, zu automatisieren und zu optimieren. Weiters ist es für die Erfassung und Auswertung von Daten zuständig. Der Vorteil dieses Geräts ist, dass Hardware in Form von zusätzlichen Prozessoren und Übertragungsleitungen eingespart werden kann. Es ist somit möglich, mit einem Gerät das SEM3 Messsystem mit dem SCADA System zu verbinden [65]. In Abbildung 3.6 ist ersichtlich, wie es mit dem Fernwirkgerät realisiert werden kann, verschiedene Informationssysteme zu verbinden.

Das Fernwirkgerät SICAM A8000 und das Messsystem SEM3 benötigen eine Gleichspannungsversorgung. Aus diesem Grund wird zusätzlich ein Netzgerät zur Versorgung im Schaltschrank installiert. Abbildung 3.7 zeigt den Schaltschrank mit allen beschriebenen Geräten.

In der oberen Reihe sind von links nach rechts das Fernwirkgerät, das GSM Modem und das Netzgerät zu sehen. In der unteren Reihe befindet sich links der Controller des Messsystems und rechts davon das Messgestell mit den Messmodulen.

## 3.2 Power Quality Messung mit Haag Combi-Quant

Zusätzlich zu den Abgangsmessungen mit dem Siemens Messsystem werden Power Quality Messungen durchgeführt um die Auswirkung der Ladevorgänge auf der Seite des Netzes vollständig analysieren zu können. Dazu werden Power Quality Messgeräte der Firma Haag (Modell Combi-Quant) im Niederspannungsverteiler für einen Zeitraum von etwa einem Monat eingebaut. Die gemessenen Ladevorgänge aus der Sicht der Verteiler Abgänge

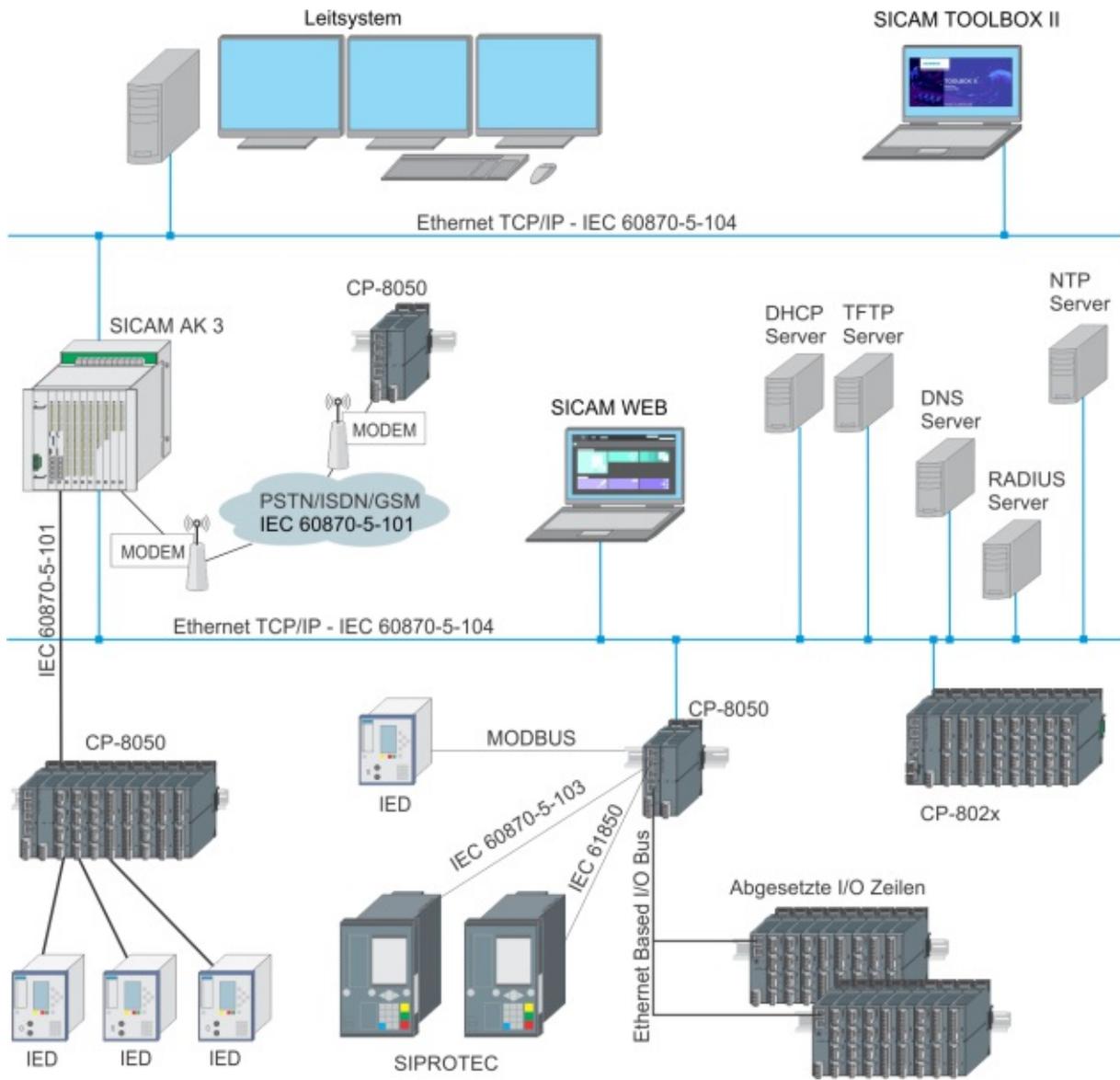


Abbildung 3.6: Siemens A8000 [66]

entsprechen damit den Messwerten der Combi-Quant Messgeräte. Bei der Power Quality Messung gilt ebenfalls die Zuordnung der Ladepunkte zu den Abgängen nach Tabelle 3.1 und 3.2. Zu beachten ist dabei, dass nur acht Power Quality Messgeräte für die Messung eingebaut wurden, weswegen die Abgänge Q8 in Feld 01 sowie Q11 in Feld 03 nicht gemessen wurden. Die Ladepunkte an den beiden Abgängen sind alle 11 kW Ladepunkte, welche auch bei anderen Abgängen zu finden sind. Dadurch können auch ohne Messungen an beiden genannten Abgängen ausreichend Messwerte für die notwendigen Auswertungen aufgenommen werden. In den folgenden Unterpunkten wird beschrieben, wie diese Messung durchgeführt wird, und was bei einer Power Quality Messung zu beachten ist.



Abbildung 3.7: Schaltschrank Messsystem

#### 3.2.1 Netzurückwirkungen

Im ersten Teilabschnitt wird beschrieben, warum es zu einer Verringerung der Qualität der Versorgungsspannung kommt. Eine Qualitätsverminderung bedeutet, dass die Versorgungsspannung nicht mehr ideal sinusförmig ist. Dieses Problem hat durch den vermehrten Ausbau an Leistungselektronik in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Leistungselektronische Schaltungen bewirken überschwingungsbehaftete Ströme (durch Gleichrichtung, Phasenanschnittsteuerung oder Kommutierungseinbrüche) im Netz, welche durch die nicht unendlich kleine Netzimpedanz eine überschwingungsbehaftete Versorgungsspannung bewirken. Selbst wenn in einzelnen Abzweigen keine Verbraucher vorhanden sind, welche Oberschwingungen (OS) bewirken, so ist die Versorgungsspannung an diesen Abzweigen durch die hohe Anzahl an leistungselektronischen Verbrauchern in anderen Netzabschnitten trotzdem überschwingungsbehaftet.

Aus diesem Grund wird in diesem Zusammenhang von Netzurückwirkungen gesprochen [67].

Durch Netzurückwirkungen können verschiedenen Arten von Problemen auftreten. Der Hauptfokus bei der durchgeführten Power Quality Messung liegt auf der Betrachtung der Unsymmetrien im Netz, welche durch die (teilweise unsymmetrischen) Ladevorgänge auftreten. Unsymmetrie bedeutet, dass die Summe der Phasenspannungen oder der Phasenströme nicht null ist. Spannungsunsymmetrien bewirken eine Verlagerungsspannung (Sternpunktverlagerung), während Stromunsymmetrien einen Strom über den Neutralleiter hervorrufen, welcher diesen unzulässig erwärmen kann.

Da für das Laden der Elektroauto-Batterien Gleichrichter notwendig sind bewirken auch Ladevorgänge Netzurückwirkungen, welche ebenfalls untersucht werden. Je nach Art des Gleichrichters sind Oberschwingungen verschiedener Ordnungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Oberschwingungen deren Ordnung durch drei teilbar ist bilden ein Nullsystem, da die Oberschwingungen dieser Ordnungen auf allen drei Phasen gleichphasig stattfinden, und sich somit nicht zu null summieren. Der Neutralleiterstrom ist der dreifache Nullsystemstrom, weswegen durch Oberschwingungen dieser Ordnungen eine erhöhte Neutralleiterbeanspruchung auftreten kann.

Durch Oberschwingungen steigt die Blindleistung im Netz, da zusätzlich zur Verschiebungsblindleistung, welche durch die Phasenverschiebung zwischen Spannungen und Strömen gleicher Ordnung auftritt, auch Verzerrungsblindleistung vorhanden ist. Diese wird durch die Kreuzprodukte zwischen Strom- und Spannungsoberschwingungen unterschiedlicher Ordnung hervorgerufen. Eine genaue Untersuchung der Blindleistung wird im Rahmen der Messung nicht durchgeführt [67].

#### 3.2.2 Durchführung der Power Quality Messung

Nachdem im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde, warum Power Quality Messungen im Netz notwendig sind gilt es noch zu klären, wie diese Messungen durchgeführt werden. Es werden dabei genormte Parameter zur Beurteilung der Netzqualität herangezogen, welche in diesem Abschnitt kurz beschrieben werden. Power Quality Messungen ermöglichen die Beschreibung der Netzqualität in den einzelnen Netzabschnitten. Ein essenzieller Aspekt hierbei ist, die Messpunkte so auszuwählen, dass eine Aussage für jeden Netzabschnitt möglich ist [68].

Abbildung 3.8 zeigt eine optimale Anordnung der Messgeräte. Es ist dabei wichtig, bei einer Netzeinspeisung (Position 1), bei dezentralen Einspeisern (Position 2), bei Weiterleitung und Verteilung der Energie (Position 3 bis 6), an der Verteilung zu Verbrauchern mit großer

Leistung in der Mittelspannungsebene (Position 7), direkt an der Niederspannungsversorgung (Position 8) und möglichst nahe an den Niederspannungsverbrauchern der Kunden (Position 9) zu messen [68].

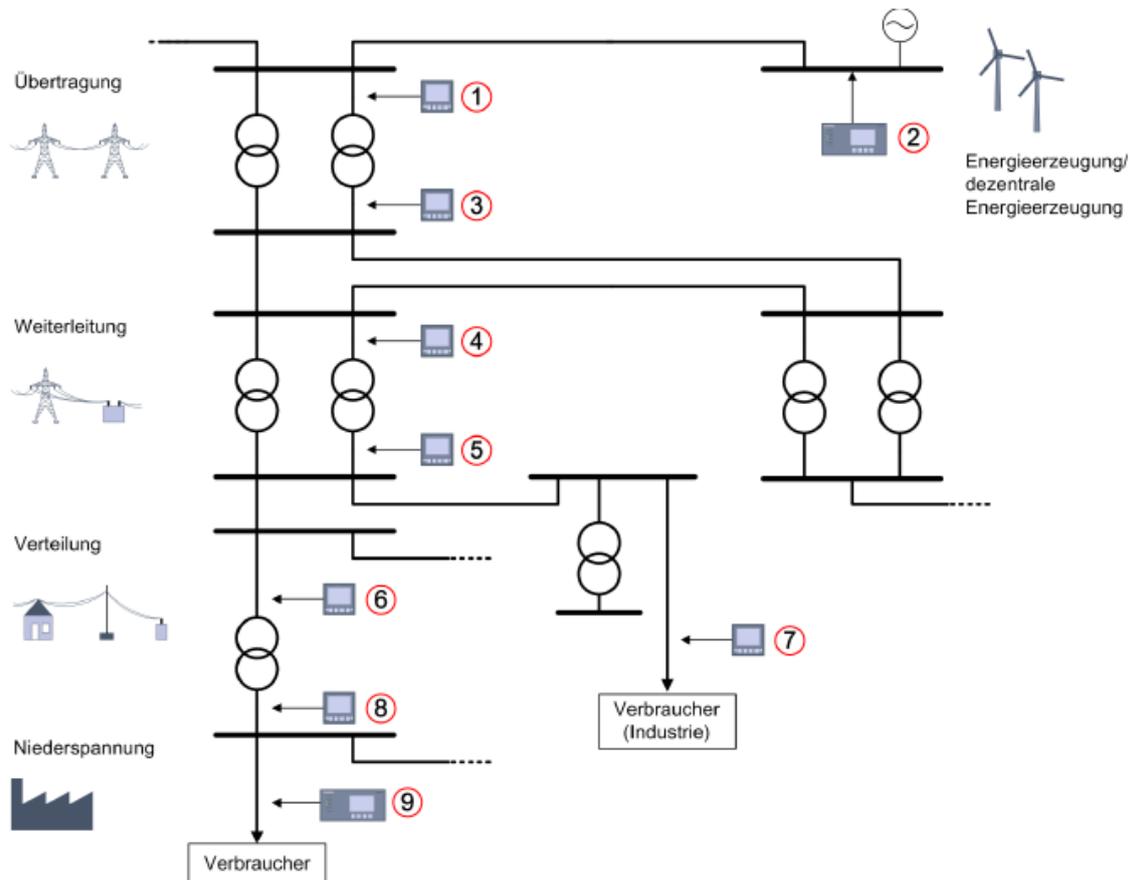


Abbildung 3.8: Anordnung Power Quality Messgeräte [68]

Bei der durchgeführten Power Quality Messung im Niederspannungsverteiler wird direkt an den Abgängen zu den Ladesäulen gemessen, was Position 9 entspricht. Eine Bestimmung der Rückwirkungen auf andere Netzabschnitte kann damit nicht durch Messung bestimmt werden. Diese Auswirkungen werden durch eine PSS Sincal Berechnung simuliert. Das ist eine Software, mit welcher Energieversorgungsnetze simuliert und analysiert werden. Mit dieser ist es möglich, Erkenntnisse über Power Quality, Lastflüsse und Stabilität im Netz zu erlangen [69]. Die Simulation wird in Abschnitt 5.4 durchgeführt.

#### 3.2.3 Ziele der Power Quality Messung

Durch die Messung der Ladesäulen Abgänge und die Berechnung der Auswirkung mit PSS Sincal sollen Aussagen über die Netzzrückwirkungen, welche durch die Ladevorgänge hervorgerufen werden, möglich sein, Wie bereits erwähnt liegt der Hauptfokus auf Unsymmetrien. Zusätzlich werden Oberschwingungen betrachtet.

Die Qualitätsmerkmale für elektrische Netze werden in der Norm EN 50160 festgelegt. Diese legt Anforderungen an die Versorgungsspannung hinsichtlich der Effektivwerte der Phasenspannungen, der Symmetrie, der Frequenz und der Kurvenform (Oberschwingungsgehalt) fest. Die wichtigsten zu beachtenden Anforderungen werden in diesem Abschnitt kurz zusammengefasst.

**Frequenz:** In einem Verbundnetz muss die Frequenz zu 99,5 % des Jahres zwischen 49,5 Hz und 50,5 Hz betragen. Abweichungen unterhalb von 47 Hz und oberhalb von 52 Hz sind vollkommen unzulässig. Der Beobachtungszeitraum für die Betrachtung beträgt laut EN 50160 ein Jahr, wobei hier zehn Sekunden Mittelwerte der Frequenz verwendet werden [70]. Ist der Verbrauch im Netz größer als die Erzeugung sinkt die Netzfrequenz, während diese wiederum steigt, wenn die Erzeugung größer als der Verbrauch ist. Trotz der hohen möglichen Summenleistung der Ladevorgänge sind diese nur ein vergleichsweise geringer Anteil der gesamten Netzlast, weswegen nicht von Frequenzabweichungen auszugehen ist.

**Spannungseffektivwerte:** Bezüglich der Spannungseffektivwerte dürfen Abweichungen von 10 % (positiv oder negativ) während 95 % des Betrachtungszeitraums (eine Woche) auftreten. Die einphasige Versorgungsspannung darf hierbei 195,5 V nie unterschreiten und 253 V nie überschreiten. Es ist somit ersichtlich, dass die untere Grenze zeitweise unterschritten werden darf, und die obere Grenze strikt eingehalten werden muss, da es sonst zur Zerstörung elektrischer Betriebsmittel kommen kann. Für die Betrachtung werden zehn Minuten Mittelwerte verwendet, die über einen Zeitraum einer Woche betrachtet werden. Verteilnetzbetreibern ist es frei, die Aufteilung des Spannungsbands von der Einspeisung des übergeordneten Hochspannungsnetzes (Netzebene 3) bis zur Niederspannungsversorgung (Netzebene 7) frei zu wählen, solange die Abweichung von 10 % der Versorgungsspannung beim Kunden eingehalten wird. Eine genauere Beschreibung der einzuhaltenden (und betrachteten) Grenzwerte von Netz Niederösterreich wird in Abschnitt 5.4 beschrieben. Die Betrachtung der Spannungseinbrüche ist ein wichtiger Aspekt bei Lastflussrechnungen [68].

**Spannungssymmetrie:** Für die Spannungssymmetrie gilt der Unsymmetriegrad als Qualitätsmerkmal. Dieser ist als das Verhältnis von Gegensystem zu Mitsystem definiert. Mit dem Haag Combi Quant ist es möglich, die symmetrischen Komponenten direkt aus der Messung zu ermitteln, womit der Unsymmetriegrad bestimmt werden kann. Dieser muss zu 95 % des betrachteten Zeitraums von einer Woche kleiner als 2 % sein, wobei auch hier zehn minütige Mittelwerte betrachtet werden [68].

**Oberschwingungen der Spannung:** Die maximal zulässigen Oberschwingungsspannungen werden durch den Total Harmonic Distortion (THD) Wert der Spannung  $THD_U$  bestimmt. Dieser Wert gibt das Verhältnis des Gesamteffektivwertes der Oberschwingungsspannung zum Effektivwert der Grundschiwingungsspannung an. Bei der durchgeführten Messung werden Oberschwingungen bis zur 25. Ordnung untersucht. Der  $THD_U$  (zehn Minuten Mittelwert) muss zu 95 % des betrachteten Zeitraumes von einer Woche kleiner als 8 % sein [70]. Da für Ladevorgänge Ladeumrichter verwendet werden muss dieser Grenzwert ebenfalls überprüft werden.

**Messung nach Norm:** Aus den definierten Grenzwerten laut EN 50160 ist erkennbar, dass die Power Quality Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen müssen. Dazu müssen die entsprechenden Messgeräte permanent über ein längeres Intervall eingebaut sein. Bei der Messung der Ladesäulen Abgänge wird nur eine Momentaufnahme der Messwerte aufgenommen, da es nicht das primäre Ziel ist, die Messung nach EN 50160 durchzuführen, sondern mögliche Auswirkungen auf das Verteilnetz durch Messung der Abgänge und Simulation des Netzes zu bestimmen.

**Stromüberschwingungen:** Um die Stromüberschwingungen beurteilen zu können muss die Norm EN 61000 als Referenz verwendet werden. In dieser sind Grenzwerte für Verbraucher unterschiedlicher Klassen und Ströme festgelegt. Ladesäulen für Elektrofahrzeuge gelten als Verbraucher der Klasse A. In der EN 61000 wird bezüglich des Stromes zwischen Geräten mit Nennströmen bis zu 16 A und Geräten mit Nennströmen über 16 A bis 75 A unterschieden. Für die Beurteilung der Oberschwingungen der Ladevorgänge ist es damit wichtig zu wissen, mit welchen Strömen geladen wird [6].

Tabelle 3.3 zeigt die Oberschwingungsgrenzwerte für Verbraucher der Klasse A mit Nennströmen von bis zu 16 A.

Anhand dieser Grenzwerte wird die Beurteilung der Ladevorgänge mit Ladeströmen bis zu 16 A durchgeführt. Für die Beurteilung von Ladevorgängen mit höheren Ladeströmen sind andere Grenzwerte zu berücksichtigen. Die hierbei geltenden Grenzwerte sind abhängig vom Kurzschlussleistungsverhältnis  $R_{SCE}$ , welches definiert ist als das Verhältnis zwischen Kurzschlussleistung und Scheinleistung des betrachteten Geräts. Weiters wird unterschieden zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Verbrauchern. Die Grenzwerte für symmetrische Verbraucher werden in Tabelle 3.4 dargestellt. Die zulässigen Grenzwerte werden als Verhältnis zwischen Oberschwingungsstrom der jeweiligen Ordnung  $I_{OS}$  und dem Grundschiwingungsstrom  $I_{GS}$  angegeben [6].

Bei symmetrischen Verbrauchern werden in dem Fall keine Grenzwerte für die Oberschwingungen dritter und neunter Ordnung angegeben. Für eine Oberschwingungsbetrachtung

Tabelle 3.3: OS-Grenzwerte Geräte Klasse A bis 16 A laut EN 61000-3-2:2015

Ordnung der OS $n$	Maximal zulässiger OS-Strom
OS ungeradzahliger Ordnung	
3	2,30 A
5	1,14 A
7	0,77 A
9	0,40 A
11	0,33 A
13	0,21 A
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 0,15/n$
OS geradzahliger Ordnung	
2	1,08 A
4	0,43 A
6	0,30 A
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Tabelle 3.4: OS-Grenzwerte symmetrische Verbraucher ab 16 A laut EN 61000-3-12:2012

Mindestwert $R_{SCE}$	Maximal zulässiges Verhältnis $I_{OS}/I_{GS}$				
	$I_2$	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
33	8 %	10,7 %	7,2 %	3,1 %	2 %
66	8 %	14 %	9 %	5 %	3 %
120	8 %	19 %	12 %	7 %	4 %
250	8 %	31 %	20 %	12 %	7 %
$\geq 350$	8 %	40 %	25 %	15 %	10 %

nach EN 61000 müssen die Stromüberschwingungen bis zur 40. Ordnung aufgenommen werden. Im Falle der durchgeführten Messung werden nur Stromüberschwingungen bis zur elften Ordnung aufgenommen. Das Ziel der Messung ist es, grundlegende Aussagen über Stromüberschwingungen bei den Ladevorgängen treffen zu können, und etwaige Grenzwertverletzungen zu erkennen.

Die Erhebung der Power Quality Messwerte in Abschnitt 4.4 und die Bestimmung der Auswirkungen auf das Verteilnetz in Abschnitt 5.4 werden auf den in diesem Abschnitt beschriebenen Grundlagen aufgebaut. Um die Messwerte aus der Sicht der Fahrzeuge zu ermitteln wird das folgende Messsystem verwendet.

## 3.3 Aviloo Messsystem

In diesem Abschnitt wird kurz das Aviloo Messsystem aus Abbildung 3.2 vorgestellt.

### 3.3.1 Verwendung des Messsystems

Bei diesem handelt es sich um einen Messstecker, der eine On-Board Diagnose über den OBD2-Anschluss der im Fuhrpark vorhandenen Fahrzeuge durchführt. Dieses Messsystem wird verwendet, da es im Vergleich zu herkömmlichen OBD2-Diagnosesteckern imstande dazu ist, mehr batteriespezifische Informationen der Fahrzeuge zu erhalten. Weiters ist es für die genaue Auswertung der Ladevorgänge wichtig, die elektrischen Größen direkt an der Batterie zu messen. Da das Aviloo Messsystem ein Batterie Diagnosegerät ist können die Parameter damit ermittelt werden.

Um diese Informationen zu erhalten wird die über den OBD2-Anschluss ausgegebene Information mit den Aviloo-Messgeräten decodiert. Bei Elektroautos gestaltet sich diese Decodierung sehr schwierig, weswegen es mit herkömmlichen OBD2-Steckern nicht möglich ist, genauere batteriespezifische Informationen zu erhalten (Messungen mit einem herkömmlichen Stecker wurden durchgeführt - mit diesem war es nicht möglich, alle elektrischen Größen der Batterie auszulesen).

Mit dem Aviloo Messsystem ist es möglich, die elektrischen Größen Strom und Spannung, sowie die SOC-Werte der Batterie in Echtzeit anzuzeigen. Beim SOC wird weiters zwischen dem auf der Anzeige (meistens in Form einer Akkustandsanzeige) ausgegebenen SOC (*SOC-Display*) und dem wahren SOC (*SOC-Real*) unterschieden. Diese Unterscheidung kann für spezielle Untersuchungen bezüglich Fahrverhalten und für die Messung der Ladevorgänge herangezogen werden. Wann immer es möglich ist wird der reale SOC-Wert verwendet. Die gemessenen Werte werden über GSM an Aviloo gesendet.

### 3.3.2 Darstellung der Daten

Aviloo bietet als Projektpartner eine Verwaltung der gemessenen Daten an. Für die Darstellung der Daten gibt es zwei Möglichkeiten, die beide bei den Messungen verwendet werden.

#### Darstellung mit dem Aviloo-Onlineportal

Mit dem Online Portal kann direkt auf die gemessenen Daten zugegriffen werden. Die Darstellung der Daten kann individuell angepasst werden. Abbildung 3.9 zeigt die Darstellung über das Aviloo-Onlineportal.

Auf der linken Seite in der Abbildung befindet sich eine Liste mit allen Mess-Steckern, welche für die Darstellung der jeweils gemessenen Größen ausgewählt werden können.

In der Mitte ist eine Liste aller mit dem Messsystem aufgenommenen Sessions. Damit ist es möglich, die Messung auf die mit dem Fahrzeug durchgeführte Aktivität (Fahrt oder Ladevorgang) zurückzuverfolgen. Unter dieser Liste ist die gefahrene Strecke während einer Session mittels Global Positioning System (GPS) mitdokumentiert. Im Falle eines Ladevorganges befindet sich das Fahrzeug immer am gleichen Standort, was auch mittels GPS aufgenommen wird.

Rechts oben in Abbildung 3.9 sind die Verläufe der ausgewählten Messgrößen dargestellt. Aviloo bietet eine Liste mit allen möglichen Messgrößen der verschiedenen Fahrzeugmodelle an. Für die durchgeführten Messungen sind in erster Linie Spannung, Strom und SOC relevant. Für spezielle Untersuchungen kann auch eine Betrachtung der Außentemperatur, Zelltemperatur und Zellspannung relevant werden. Um genaue Werte der Messgrößen dokumentieren zu können befindet sich unter der graphischen Darstellung eine tabellarische Darstellung mit allen aufgenommenen Werten. Größen wie Strom und Spannung werden mehrmals pro Sekunde vom Fahrzeug ausgegeben, während der SOC nur alle paar Sekunden ausgegeben wird. Bei der graphischen Darstellung kann es damit zu einem treppenartigen Verlauf kommen. Dieser ist nur durch die längeren Ausgabeintervalle bedingt - in der Realität ist dieser Verlauf kontinuierlich [71].

Der große Vorteil der Darstellung über das Online Portal ist, dass die Daten in diesem schnell, einfach und individuell gestaltbar dargestellt werden können. Das einzige Problem das mit dem Portal einhergeht ist, dass ab und zu Ausfälle des Portals auftreten, und die Daten während dieser Ausfälle nicht dargestellt werden können (jedoch werden diese trotzdem aufgenommen).

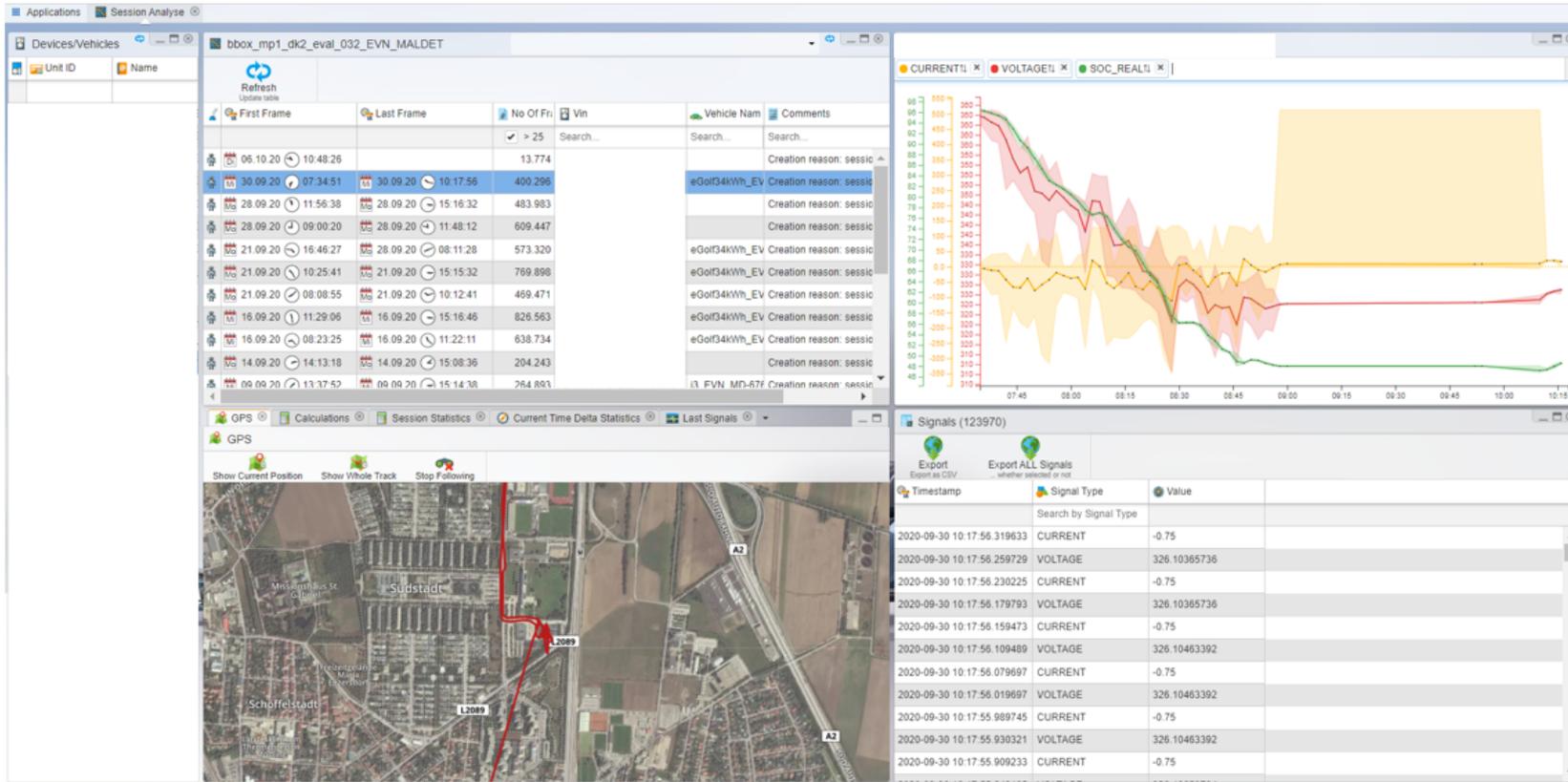


Abbildung 3.9: Aviloo Online Portal [71]

## Datenverarbeitung über die Aviloo-Schnittstelle

Aviloo bietet zusätzlich zum Online Portal eine Schnittstelle, über welche die aufgenommenen Daten mit Hilfe eines Python Skriptes weiterverarbeitet werden können. Im Projekt wird diese Möglichkeit dazu genutzt, die vom Messsystem aufgenommenen Daten ins Datalab zu exportieren und dort zu speichern. Datalab dient zur Datenarchivierung, und es kann damit unabhängig vom Aviloo Portal auf die Daten zugegriffen werden.

Nachdem die verwendeten Messsysteme beschrieben wurden wird nun auf die vorhandenen Fahrzeuge im Fuhrpark eingegangen.

## 3.4 Vorhandene Fahrzeuge

In den letzten Abschnitten wurden die verwendeten Messsysteme beschrieben. Generell ist es noch notwendig zu beschreiben, an welchen Fahrzeugen gemessen wird. Der betrachtete Fuhrpark ist ständig im Wandel, weswegen die Automodelle im Fuhrpark nur zum genauen Zeitpunkt der Messung angegeben werden können. Als Referenz für eine genaue Untersuchung der Fahrzeuge wird Tabelle 2.2 herangezogen. Anhand dieser groben Auflistung können Annahmen getroffen werden, die im Laufe der Messung nachvollzogen werden sollen.

Der Fuhrpark bestand zu Beginn der Messung aus sieben VW e-Golf und vier BMW i3. Beim VW e-Golf handelt es sich um ein Elektrofahrzeug mit einer Batteriekapazität von 35,8 kWh, mit der eine Reichweite von etwa 200 km möglich ist. Der Motor des Fahrzeuges hat eine Leistung von 100 kW (136 PS), wobei mit diesem eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h bei einem Eigengewicht von 1580 kg erreichbar ist. Beim VW e-Golf wird ein Verbrauch von 15,8 kWh/100km angegeben [72]. Mit dem BMW i3 sind Reichweiten von 200 km bis 220 km möglich. Die Batteriekapazität der vorhandenen Modelle beträgt 33,2 kWh (94 Ah). Der BMW i3 hat eine Leistung von 125 kW (170 PS) und ein Eigengewicht von 1245 kg. Laut Herstellerangaben beträgt der Energieverbrauch beim BMW i3 12,6 kWh/100km. Dieser ist etwas geringer als beim VW e-Golf, was auch die etwa gleiche nominelle Reichweite trotz geringerer Batteriekapazität erklärt [73]. Die Verbrauchswerte der Fahrzeugmodelle im Fuhrpark werden bei den durchzuführenden Messungen ausgewertet.

Bei der Messung der Fahrzeuge geht es in erster Linie darum, die elektrischen Größen bei den Ladevorgängen zu ermitteln. Dabei sollen die theoretischen Werte aus Tabelle 2.2 anhand real gemessener Werte überprüft werden. Primär sind in dem Kontext der Ladestrom und damit zusammenhängend die Ladeleistung zu ermitteln, um die Auswirkung eines Ladevorganges auf das Verteilnetz zu ermitteln. Durch Messung der Abgänge laut Tabelle 3.3 kann ermittelt werden, über wie viele Phasen der Ladevorgang des jeweiligen

Fahrzeuges erfolgt. Dies ist einerseits notwendig um zu überprüfen, ob die laut TOR vorgeschriebenen Schiefastbegrenzungen eingehalten werden, und andererseits notwendig, um zu überprüfen, wie stark sich die Unsymmetrien aller Ladevorgänge auf das Verteilnetz auswirken. Die Messung der Ladevorgänge der Fahrzeuge dient somit als Basis für weitere Untersuchungen aus der Sicht des Netzes.

Zusätzlich zur Messung der Ladevorgänge wird die Messung der Fahrprofile der verschiedenen Fahrzeugmodelle durchgeführt. Bei dieser Messung geht es darum, die elektrischen Größen während der Fahrt zu messen und die Größen der verschiedenen Modelle miteinander zu vergleichen. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die SOC-Werte und die zurückgelegte Strecke gelegt. Die Reichweite und der Verbrauch der Fahrzeuge werden für eine Fuhrparkoptimierung herangezogen. Weiters dient die Messung der Fahrprofile zur Testung des Aviloo Messsystems nach Abschnitt 3.3.

## 3.5 Vorhandene Ladesäulen

Ladesäulen in der Garage besitzen zwei Ladepunkte mit einer Ladeleistung von 11 kW. Diese sind in Abbildung 3.10 dargestellt.



Abbildung 3.10: Ladesäulen Innen

Die Ladesäulen 1 bis 6 sind alle gleich aufgebaut, wohingegen Ladesäule 7 nur einen 11 kW Ladepunkt hat. Der Aufbau dieser unterscheidet sich sonst nicht von den restlichen

Ladesäulen. Die Ladesäulen Nord 1 und Nord 2 sind öffentliche Ladesäulen, an denen auch externe Fahrzeuge geladen werden können. Aus diesem Grund ist eine Authentifizierung mit einer Stromtankkarte an diesen notwendig. Da deren Abgänge ebenfalls gemessen werden sind diese Teil der Dokumentation. Abbildung 3.11 zeigt eine öffentliche Ladesäule (welche auch bei LS Nord 1 und Nord 2 verwendet wird).



Abbildung 3.11: Ladesäulen Nord [74]

Ladesäule 9 befindet sich ebenfalls außen. Diese besitzt drei Ladepunkte und ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Diese dient dazu, später zurückkehrenden Fahrzeugen (nach Dienstende des Fuhparkmanagements) das Laden zu ermöglichen.

Für Schnellladevorgänge von bis zu 150 kW wird Ladesäule 8 verwendet. Diese Schnellladesäule ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

Nachdem alle verwendeten Messsysteme, die vorhandenen Ladesäulen und die zu messenden Fahrzeuge beschrieben wurden wird im nächsten Abschnitt auf die Durchführung der Messungen eingegangen. Diese entsprechen den Ladesäulen laut Tabelle 3.1 und 3.2.



Abbildung 3.12: Ladesäulen Außen



Abbildung 3.13: Schnellladesäule

## 4 Messungen und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen, sowie erste Ergebnisse der Messungen, welche unmittelbar aus den Messwerten abgeleitet werden können, beschrieben. Die in diesem Kapitel ermittelten Messergebnisse dienen als Grundlage für die Auswertung in Kapitel 5. Wie schon in Abschnitt 3.4 erläutert kann die Messung in Messung der Fahrprofile und Messung der Ladevorgänge aufgeteilt werden. Die Messung der Ladevorgänge erfolgt hierbei sowohl aus der Sicht der Fahrzeuge, als auch aus der Sicht des Netzes.

### 4.1 Messung der Fahrprofile

In diesem Abschnitt werden die Fahrprofile der Fahrzeuge gemessen. Direkt nach den durchgeführten Fahrten werden erste Messungen der Ladevorgänge durchgeführt. Abbildung 4.1 zeigt die betrachteten Fahrzeuge (VW e-Golf und BMW i3).

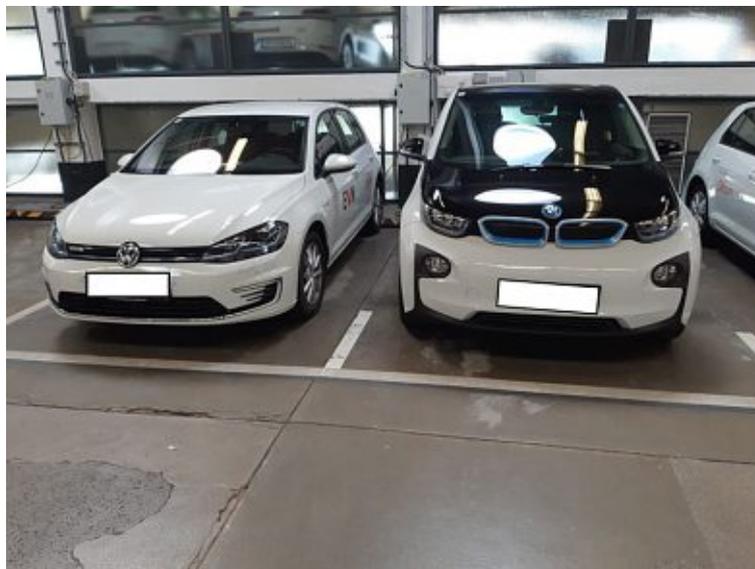


Abbildung 4.1: Fahrzeuge Fuhrpark

#### 4.1.1 Fahprofilmessung BMW i3

Im Rahmen der Testung des Aviloo Messsystems wird eine Fahrt mit einem BMW i3 durchgeführt. Bei dieser wird die Fahrweise so angepasst, dass verschiedene Extremfälle

wie bergauf beschleunigen und bergab bremsen untersucht werden können. In der folgenden Dokumentation wird auf die Ergebnisse der Messungen eingegangen.

### Fahrt Abschnitt 1

Folgendes Fahrprofil wurde im ersten Abschnitt der Fahrt gemessen.



Abbildung 4.2: Fahrtabschnitt 1 - BMW i3

Bei diesem ist der Batteriestrom in Rot, die Batteriespannung in Orange und der (vom Display angezeigte) SOC-Wert in Grün dargestellt. Bei diesem Abschnitt der Fahrt wurde auf einer hügeligen und kurvenreichen Autobahn gefahren. Der Stromverlauf und der Spannungsverlauf sind hierbei proportional, wobei sich die Spannung nur um wenige Volt ändert. Am Verlauf des SOC-Wertes ist erkennbar, dass die Batterie zu Beginn der Fahrt vollständig geladen war.

### Fahrt Abschnitt 2

Die Fahrt wurde nach einer zwischenzeitlichen Pause fortgesetzt. Durch die Pause erfolgt eine Aufteilung in mehrere Fahrtabschnitte.

In diesem Abschnitt wurden viele verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Um die Phasen in Abschnitt 2 eingehender zu beschreiben wird die Aufzeichnung genauer betrachtet. Um die Werte aus der Darstellung nachvollziehen zu können muss beachtet werden, dass die durchgehenden Linien die Durchschnittswerte der Messwerte im betrachteten Zeitraum

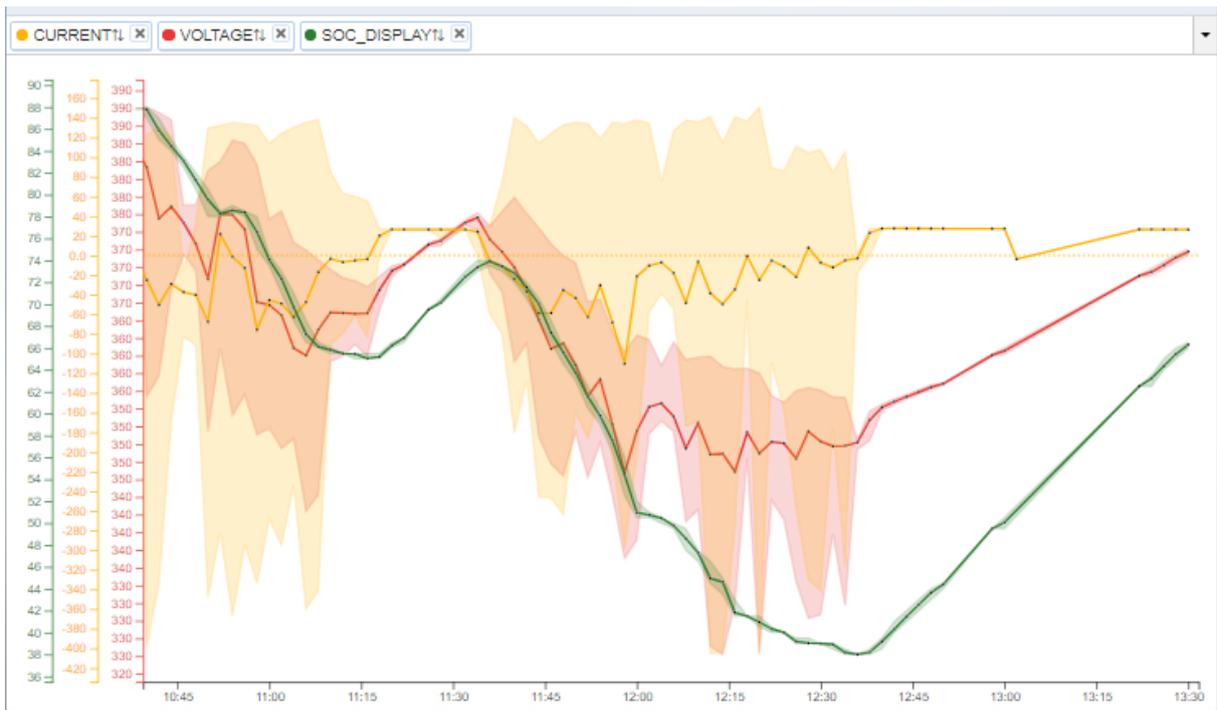


Abbildung 4.3: Fahrabschnitt 2 - BMW i3

darstellen. Die transparenten Flächen beschreiben die Maximalwerte der Messung, welche im jeweiligen Zeitraum auftreten. Diese Darstellung erfolgt durch die hohe Anzahl an Messwerte in kurzer Zeit, welche über ein vergleichsweise langes Zeitintervall dargestellt werden müssen. Um trotzdem eine vernünftige Darstellung zu erhalten werden deswegen Mittelwerte verwendet, und die Maximalwerte werden zusätzlich hervorgehoben. Für die Auswertung sind diese Flächen in der Regel nicht zu berücksichtigen.

**Abschnitt 2.1: Fahrt auf Autobahn** Im ersten Teilabschnitt wird die Fahrt auf einer Autobahn fortgesetzt.

Aus den positiven Stromwerten und der teilweise steigenden SOC-Kurve ist erkennbar, dass es oft möglich war, Energie beim Bremsen zurück in die Batterie einzuspeisen. Durch die hügelige Strecke war es kaum möglich, den Strom über einen längeren Zeitraum annähernd konstant zu halten (dies wäre vergleichbar mit längerem Fahren auf einer Geraden mit konstanter Geschwindigkeit). Der Strom weist kurzzeitige Spitzenwerte von bis zu 300 A auf, wobei diese beim bergauf beschleunigen auftreten. Rekuperation war in diesem Abschnitt mit maximal 140 A möglich. Zu Beginn dieses Teilabschnittes ging es längere Zeit bergab, weswegen hier reiner Rekuperationsbetrieb stattfand, und keine Energie aus der Batterie entnommen werden musste.



Abbildung 4.4: Fahrtabschnitt 2.1 - BMW i3

**Abschnitt 2.2: Zwischenzeitlicher Ladevorgang:** Um einen Ladevorgang zu messen wird zwischenzeitlich eine kurze Pause eingelegt, in der das Auto geladen wird. Da dieser Ladevorgang Teil der Fahrt und relevant für die weitere Fahrt ist, wird er in diesem Abschnitt kurz beschrieben. Genauere Untersuchungen bezüglich des Ladevorgangs erfolgen im nächsten Unterkapitel.

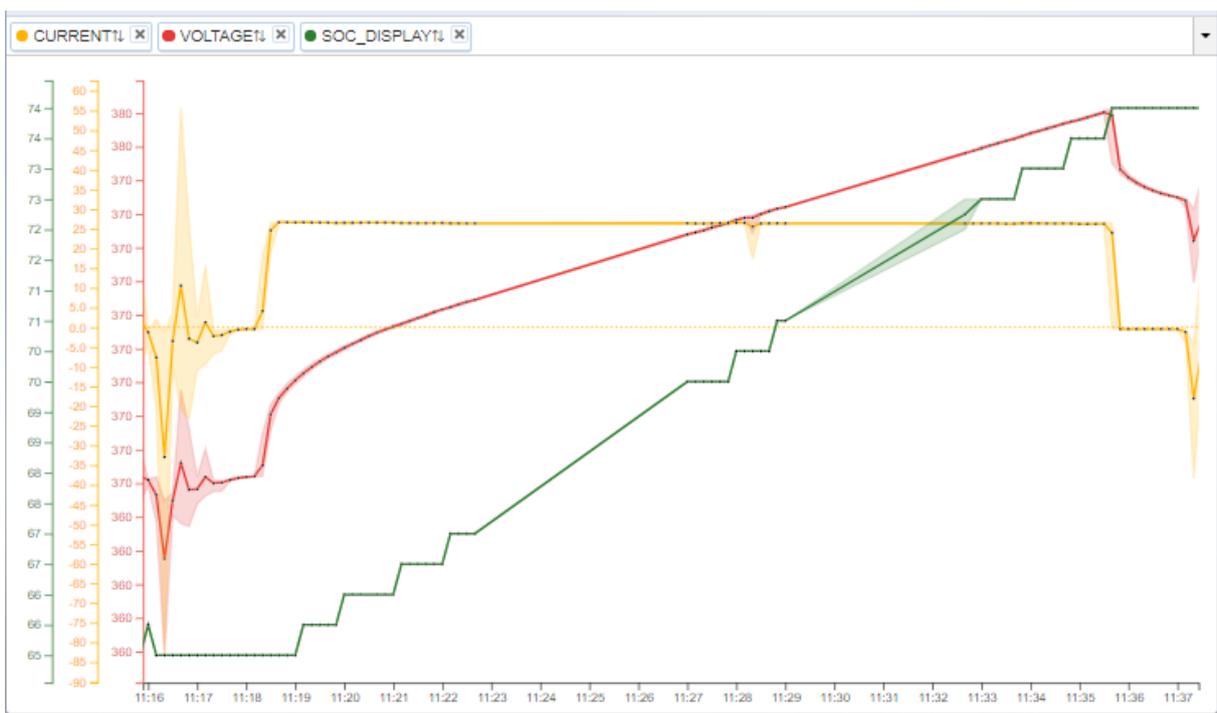


Abbildung 4.5: Fahrtabschnitt 2.2 - BMW i3

In den 20 Minuten, in denen das Auto am 11 kW Ladepunkt geladen wurde, konnte der SOC von 65 % auf 74 % erhöht werden. Der Ladestrom war in diesem Abschnitt mit etwa 26,5 A konstant. Bei einer gemessenen Ladespannung an der Batterie von etwa 368 V ergibt das eine Ladeleistung von 9,8 kW. Nach Beenden des Ladevorganges wurde die Fahrt fortgesetzt.

**Abschnitt 2.3: Rückfahrt:** In diesem Teilabschnitt geht es darum, die Batterie so weit wie möglich zu entleeren, und nur dann zu rekuperieren, wenn es nicht anders möglich ist.



Abbildung 4.6: Fahrtabschnitt 2.3 - BMW i3

Zu Beginn der Weiterfahrt war es möglich, die Batterie nur zu entladen, ohne sie zwischendurch wiederaufzuladen. Bei einem Großteil der Strecke wurde bergab gefahren, wodurch es nur zu geringem Entladen der Batterie kam. Um die Batterie weiter zu entladen wurde ein Teil der Fahrt auf einer Landstraße durchgeführt. Durch eine entsprechende Fahrweise gelang es, kaum zu rekuperieren. Erneut können die deutlich höheren negativen Stromspitzen (gegenüber den positiven Stromspitzen) erkannt werden. Nach Beenden der Fahrt wurde das Auto an einem 11 kW Ladepunkt in der Garage angesteckt.

Die auf die Fahrt folgenden Ladevorgänge werden in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

## SOC-Vergleich Fahrt BMW i3

Zum Abschluss der Messung des Fahrprofils wird der angezeigte SOC (*SOC-Display*) mit dem wahren SOC (*SOC-Real*) verglichen. Dies dient zur Überprüfung, welche Abweichungen zwischen diesen beiden Größen im Laufe der Fahrt auftreten.

In Abbildung 4.7 sind die beiden SOC-Werte des zweiten Fahrtabschnittes dargestellt.

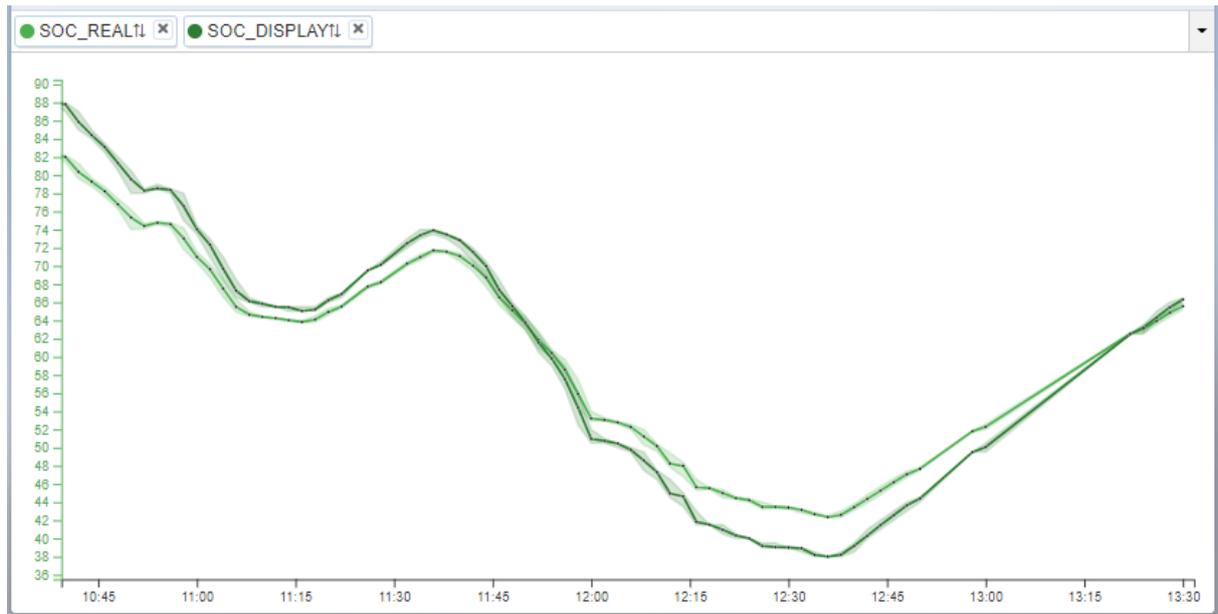


Abbildung 4.7: SOC-Vergleich - BMW i3

Bei einem höheren Ladezustand wird ein höherer SOC-Wert angezeigt ( $SOC-DISPLAY > SOC-REAL$ ). Ab etwa 60 % ist der reale SOC-Wert höher als der angezeigte, was bedeutet, dass die Batterie nie komplett entladen wird. Dies dient ebenfalls dazu, die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen, da eine Tiefentladung die Lebensdauer einer Batterie verringert.

### Zusammenfassung der Messung

Bei der Messung konnte festgestellt werden, dass die Entladeströme beim Beschleunigen deutlich höher sind, als die Ladeströme beim Rekuperieren. Ebenso wurde festgestellt, dass die Reichweite durch ökonomisches Fahren etwas erhöht werden kann. Dies wurde dadurch gezeigt, dass die Reichweite zu Beginn der Fahrt mit 200 km vorausgesagt wurde, und nach einer Fahrt von etwa 130 km noch eine Restweite von 100 km angezeigt wurde. Durch den zwischenzeitlichen Ladevorgang konnte die Reichweite um etwa 20 km erhöht werden, was einen Reichweitengewinn von 10 km durch ökonomisches Fahren bedeutet.

### 4.1.2 Fahrprofilmessung VW e-Golf

Eine ähnliche Messung wie in Abschnitt 4.1.1 wird mit dem VW e-Golf durchgeführt. Anhand dieser Messung werden die elektrischen Größen während der Fahrt mit dem eGolf gemessen.

Die Fahrt wird dabei auf einer ähnlichen Strecke wie beim BMW i3 durchgeführt, um die beiden Messungen möglichst gut vergleichen zu können.

Abbildung 4.8 zeigt die elektrischen Größen Strom und Spannung, sowie den SOC der Batterie. Es wird hierbei der *SOC-DISPLAY* verwendet, welcher am Display des Fahrzeuges angezeigt wird.

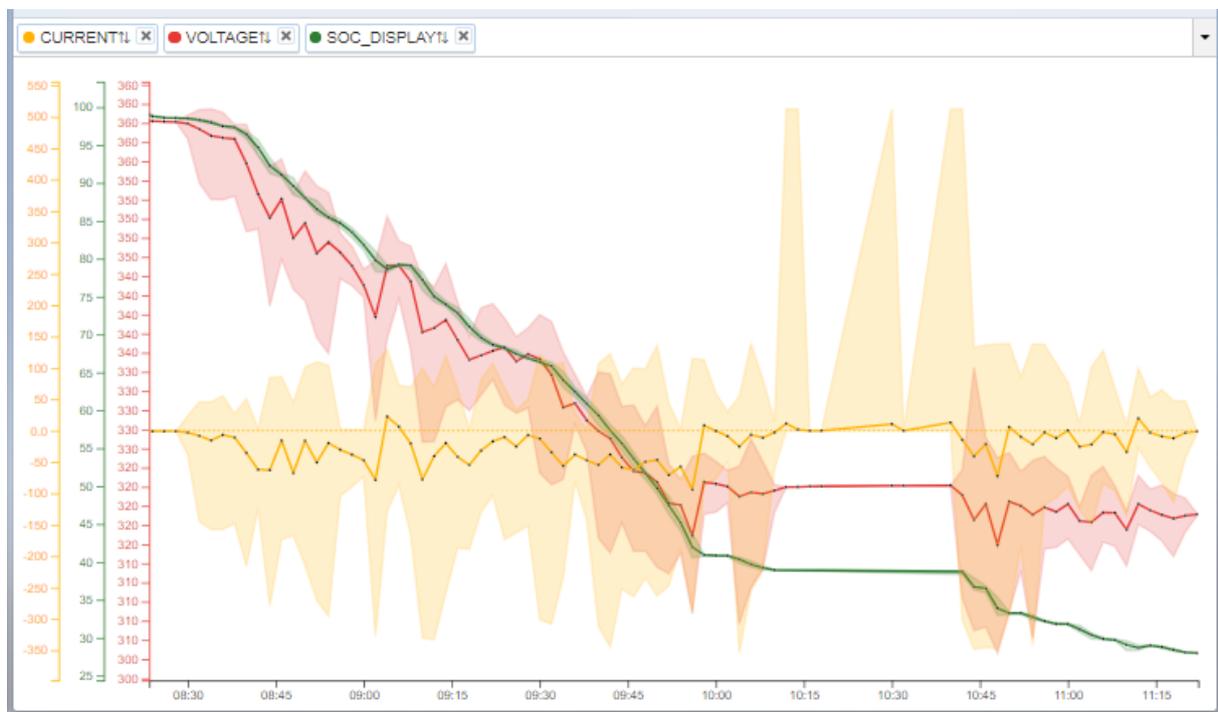


Abbildung 4.8: Fahrt VW e-Golf

Zu Beginn der Fahrt war die Batterie vollgeladen. Bis zur Auffahrt auf die Autobahn sank der SOC nur gering. Eine Rekuperation fand in diesem Zeitraum nicht statt. Der nächste Abschnitt der Fahrt fand ausschließlich auf der Autobahn statt. In der Abbildung kann in diesem Abschnitt erkannt werden, dass beim Beschleunigen Ströme von bis zu 260 A auftreten. Eine Rückeinspeisung in die Batterie beim Bremsen erfolgt mit einem maximalen Strom von etwa 130 A, was nur etwa die Hälfte des aus der Batterie bezogenen Maximalstromes beim Beschleunigen ist. Aus den Verläufen von Strom und Spannung kann das Fahrverhalten reproduziert werden, wobei ein negativer Strom wieder Bezug aus der Batterie und ein positiver Strom Einspeisung in die Batterie bedeutet. Der SOC sinkt bis auf kurze Bremsphasen die meiste Zeit. Zwischenzeitlich wurde eine längere Zeit bergab gefahren, was durch ein sichtbares Ansteigen des SOC erkennbar ist.

Nach einer zwischenzeitlichen Pause wurde die Fahrt fortgesetzt. Dieser Abschnitt der Fahrt entspricht der Fahrt auf einer Landstraße. Im Gegensatz zum ersten Abschnitt wurde hier nicht auf ökonomisches Fahren geachtet. Das Hauptziel dieses Abschnittes war es, die Batterie so weit wie möglich zu entladen, um den nachfolgenden Ladevorgang besser darstellen zu können. Aufgrund der hügeligen Topographie ergaben sich trotzdem hohe Ströme beim Bremsen und Beschleunigen. Nach Beenden der Fahrt wurde das Fahrzeug an eine Ladesäule angesteckt.

In Abbildung 4.9 werden der Unterschied zwischen dem angezeigte SOC (*SOC-DISPLAY*) und dem wahren SOC (*SOC-REAL*) verglichen.

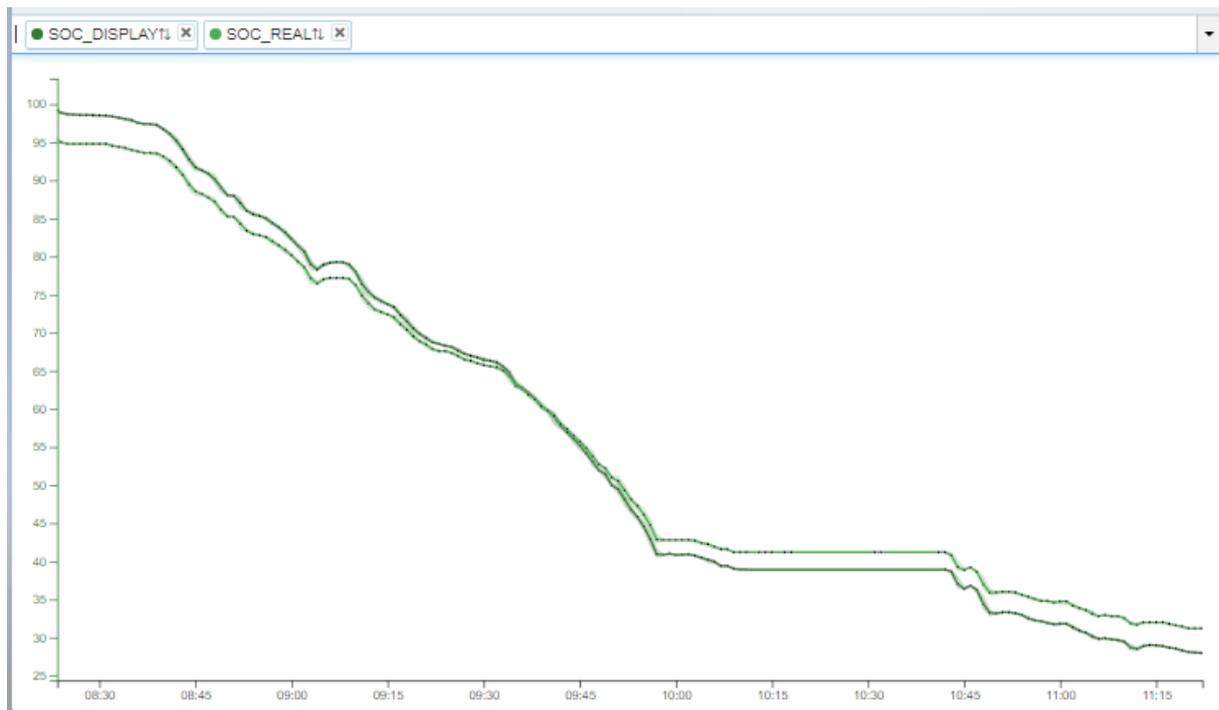


Abbildung 4.9: SOC Fahrt VW e-Golf

Zu Beginn ist der angezeigte SOC höher als der wahre SOC. Ab einem SOC von 65 % sind die beiden Werte gleich. Bei einem SOC von 40 % ist der wahre SOC höher als der angezeigte. Diese Abweichung dient auch beim VW e-Golf dazu, die Batterie nicht auf einen SOC von 100 % zu laden, bzw. auf einen SOC von 0 % zu entladen, da dies die Lebensdauer der Batterie deutlich verringert.

### Zusammenfassung der Messung

Bei dieser Messung konnte festgestellt werden, dass die Ströme beim Beschleunigen höher sind als die Ströme beim Rekuperieren.

Der VW e-Golf zeigte zu Beginn der Fahrt eine Restreichweite von 240 km an. Nach einer Fahrt von 158 km zeigte er eine Restreichweite von 78 km an. Es folgt daraus die

Erkenntnis, dass die prognostizierte (berechnete) Restreichweite sehr genau ist, und diese beim VW e-Golf durch ökonomisches Fahren nicht gesteigert werden konnte.

### 4.1.3 Vergleich der Fahrprofile

In diesem Abschnitt erfolgt der Vergleich der Messung des Fahrprofils des BMW i3 laut Abschnitt 4.1.1 mit der Messung des VW e-Golf nach Abschnitt 4.1.2. Es wird speziell auf die unterschiedlichen Batteriespannungen und Batterieströme eingegangen.

Beim BMW i3 treten beim Beschleunigen Ströme von bis zu 300 A auf, beim VW e-Golf sind diese mit 260 A etwas geringer. Ein genauer Vergleich müsste unter exakt gleichen Bedingungen erfolgen. Da diese Ströme bei unterschiedlichen Streckenabschnitten auftraten kann nicht zu 100 % genau gesagt werden, dass der Maximalstrom beim VW e-Golf geringer ist, als beim BMW i3. Da jedoch bei beiden Fahrten laut Anzeige am Armaturenbrett der Fahrzeuge zeitenweise maximal beschleunigt wurde erfolgt die Erkenntnis, dass im Zuge dieser Messung die Maximalwerte des Batteriestromes beim VW e-Golf höher sind als beim BMW i3.

Beim Bremsen ist der Rückeinspeisestrom des BMW i3 mit 150 A etwas höher als beim VW e-Golf mit 130 A. Generell ist das Fahrverhalten des BMW i3 mehr auf ökonomisches Fahren ausgelegt, als das des VW e-Golf. Dies zeigt sich darin, dass der BMW i3 auf Bremsbetrieb schaltet, sobald das Strompedal (vergleichbar Gaspedal) nicht mehr betätigt wird. Ein Bremsen muss somit durch eine konstante Strompedalposition unterbunden werden. Beim VW e-Golf hingegen muss aktiv gebremst werden, um den Bremsbetrieb einzuleiten. Nichtbetätigung des Strompedals führt lediglich zu einem Gleitbetrieb. Weiters gibt es bei beiden Fahrzeugen den „eco plus“ Betrieb, bei dem die maximale Leistung des Fahrzeuges reduziert wird, um die Reichweite zu erhöhen. Beim BMW i3 wird in diesem Betrieb zusätzlich auf stärkere Rekuperation geachtet.

Der VW e-Golf zeigte zu Beginn der Fahrt eine Restreichweite von 240 km an. Im Vergleich dazu zeigte der BMW i3 eine Reichweite von 200 km an, wobei beide Fahrzeuge zu Beginn der Fahrt vollständig geladen waren. Mit dem BMW i3 wurde eine Fahrt mit 130 km durchgeführt, bei der die Batterie zwischenzeitlich um 9 % aufgeladen wurde. Nach Beenden der Fahrt wurde eine Restreichweite von 100 km angezeigt, wodurch erkannt werden kann, dass durch ökonomisches Fahren ein Reichweitengewinn von etwa 10 km erfolgt. Mit dem VW e-Golf wurde eine Strecke von 158 km gefahren, wobei nach der Fahrt eine Restreichweite von 78 km angezeigt wurde. Bei diesem Fahrzeug stimmt die zu Beginn angezeigte Reichweite abzüglich der gefahrenen Strecke sehr gut mit der Restreichweite überein. Der Reichweitengewinn durch ökonomisches Fahren hebt sich somit durch den erhöhten Verbrauch auf der hügeligen Strecke auf. Generell konnte durch die Fahrten

erkannt werden, dass die Reichweite der beiden Fahrzeuge ähnlich ist, und diese stark abhängig von der Fahrweise ist. Es ist damit möglich, in weiteren Betrachtungen von gleichen möglichen Reichweiten auszugehen. Die zu Beginn der Fahrt angezeigte Reichweite geht in der Regel nicht von längeren Fahrten auf der Autobahn mit 130 km/h aus, weswegen bei solch einer Fahrt eine Reserve eingeplant werden sollte. Die Batteriespannung bewegt sich beim BMW i3 in einem Wertebereich zwischen 340 V und 400 V. Beim VW e-Golf ist dieser Bereich mit 310 V bis 360 V etwas geringer.

## 4.2 Messung der Ladevorgänge

In diesem Abschnitt wird die Messung der Ladevorgänge beschrieben. Zu Beginn werden die Ladekurven der verschiedenen Fahrzeugmodelle gemessen. Aus diesen werden erste Erkenntnisse abgeleitet. Die weiteren Messungen können auf diesen Grunderkenntnissen weiter aufgebaut werden.

### 4.2.1 Ladevorgang BMW i3

Zur Messung der Ladekurve des BMW i3 werden verschiedene Messungen durchgeführt. All diese durchgeführten Messungen werden in den folgenden Unterpunkten beschrieben.

#### Aufnahmen der Ladekurve mit dem Aviloo Messsystem

Zum Abschluss der Messung laut Abschnitt 4.1.1 wird die Ladung des BMW i3 von einem *SOC-Display* von 38 % bis zu einem *SOC-Display* von 100 % (Vollladung) gemessen. Dazu müssen die vorhin beschriebenen für den BMW i3 notwendigen Vorkehrungen getroffen werden. Der BMW i3 wird an einen Ladepunkt mit einer Leistung von 11 kW angeschlossen. Nachdem es mit diesem Modell möglich ist, dreiphasig zu laden, kann diese Leistung auch (annähernd) genutzt werden. Bei dieser Messung geht es primär darum, den Verlauf der Ladekurve aufzunehmen. Die Auswirkung des Ladevorganges auf das Netz wird in einer späteren Messung genauer untersucht. Folgende Verläufe konnten gemessen werden.

Die Ladekurve wurde ab einem *SOC-Display* von 70 % aufgenommen. Bei diesem beträgt der Ladestrom 26 A. Der Ladestrom sinkt linear weiter auf etwa 24,5 A. Bei einer weiteren Messung konnte festgestellt werden, dass der Ladestrom zu Beginn der Ladung etwa 28,5 A beträgt. Trotz dieser (linearen) Stromreduktion von etwa 2,5 A kann diese Phase als die Konstantstromphase (CC) angesehen werden.

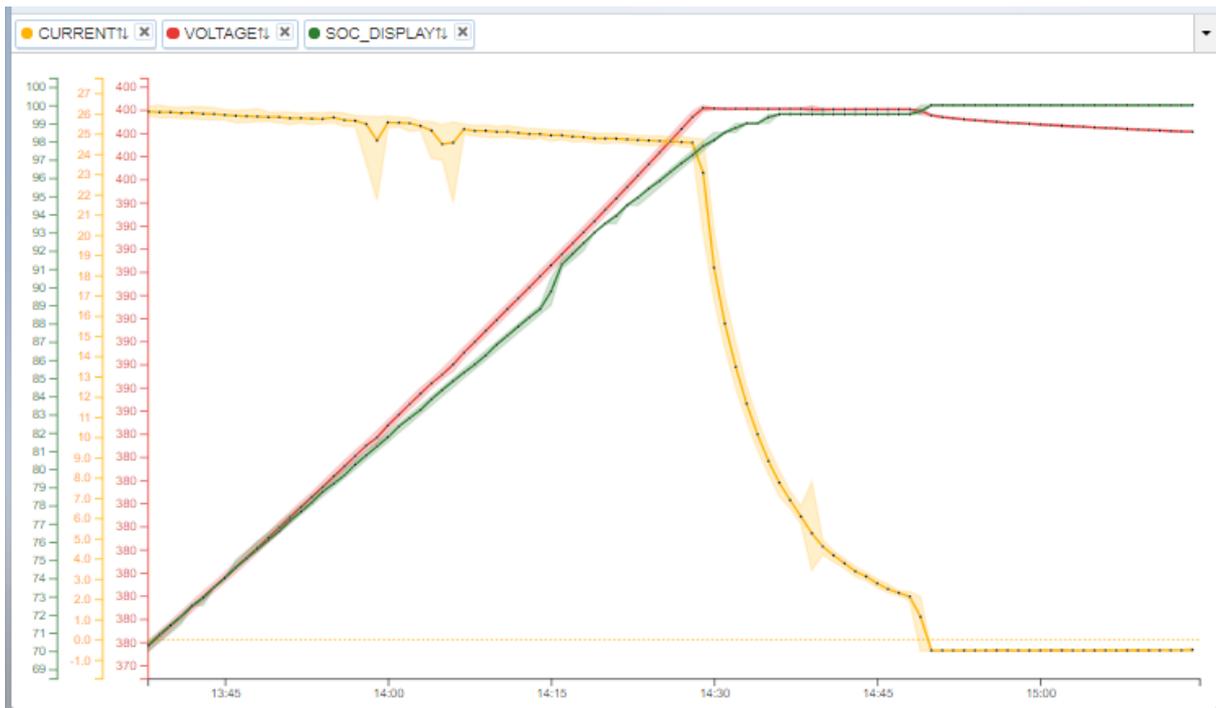


Abbildung 4.10: Ladevorgang BMW i3

Die Ladeleistung beträgt bei dieser CC-Phase 9,8 kW. Der Verlauf ist proportional zum Verlauf des Ladestroms. Die Spannungssteigerung in der CC-Phase gleicht den geringen Stromabfall aus, wodurch die Leistung in dieser Phase exakt konstant ist.



Abbildung 4.11: Ladeleistung BMW i3

Ab einem SOC von 97 % beginnt die Konstantspannungsphase (CV). Bei dieser wird die Ladespannung konstant auf 400 V gehalten, und der Strom wird immer weiter reduziert, bis der Ladevorgang beendet ist (bei einem *SOC-Display* von 100 %). Um etwa 14:50 Uhr war der Ladevorgang beendet. Zu diesem Zeitpunkt fließt nur mehr ein Standby-Strom von wenigen mA. Die Spannung sinkt nochmal geringfügig ab. Am konstanten SOC von 100 % ist erkennbar, dass der Ladevorgang abgeschlossen ist. Die Dauer des Ladevorganges von 30 % auf 100 % beträgt in etwa 2 Stunden und 20 Minuten.

Generell ist in den Abbildungen 4.10 und 4.11 zu sehen, dass der BMW i3 nach dem im Abschnitt 2.1.3 beschriebenen CCCV-Laden aufgeladen wird.

**Unterschied wahrer SOC - angezeigter SOC beim Laden:** Nachdem der SOC-Wert von 97%, bei dem das CC-Laden beendet wird, höher als erwartet war (bezogen auf frühere Messungen an Elektrofahrzeugen), wurde der SOC noch genauer untersucht. Mit dem Aviloo-Stecker ist es möglich, zwischen angezeigtem SOC (*SOC-Display*) und wahrem SOC (*SOC-Real*) zu unterscheiden. Wird der Ladevorgang nochmal mit dem wahren SOC (hellgrün) betrachtet, so können deutliche Unterschiede erkannt werden.

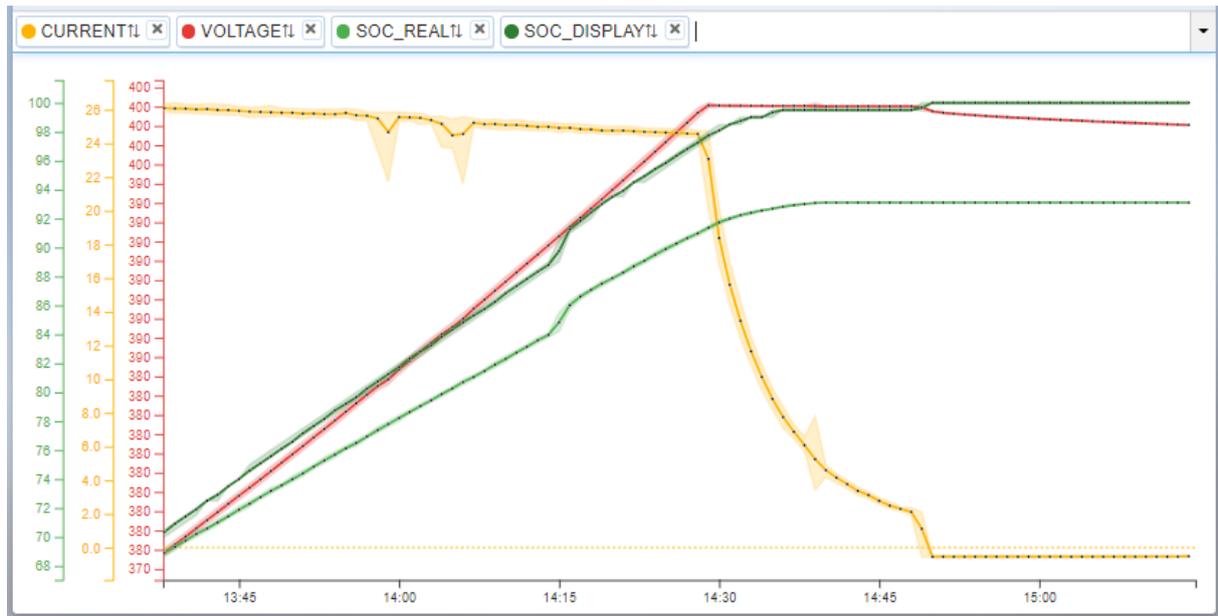


Abbildung 4.12: SOC-Vergleich Laden BMW i3

Bei etwa 70% SOC beträgt die Abweichung zwischen den beiden Größen nur 1%. Diese Abweichung wird mit steigendem Ladezustand größer. Bei Ladeende beträgt diese Abweichung 7%. Das bedeutet, dass die Batterie des BMW i3 eigentlich nur auf 93% geladen wird. Dies dient zur Erhöhung der Lebensdauer der Batterie, da eine tatsächliche Vollladung der Batterie die Lebensdauer dieser deutlich senkt. Das Konstantstromladen endet somit auch schon bei einem SOC-Wert von 90%.

### Zusammenfassung der Messung

Es konnte festgestellt werden, dass mit dem BMW i3 dreiphasiges Laden möglich ist. Die Ladeleistung beträgt in etwa 9,8 kW, womit die möglichen 11 kW seitens der Ladesäule durch einen Ladestrom von 27 A (statt 32 A) nicht voll ausgenutzt werden.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Messung ist, dass der BMW i3 über das CCCV-Ladefahren aufgeladen wird. Der Übergang von der Konstantstrom- in die Konstantspannungsphase erfolgt bei einem SOC von etwa 97%.

### 4.2.2 Schnellladen BMW i3

In diesem Abschnitt wird das Laden an der Schnellladesäule untersucht. Mit diesem sind Ladeleistungen von bis zu 150 kW möglich, sofern dies das Fahrzeug zulässt. In Abbildung 4.13 ist der Schnellladevorgang dargestellt. Wie auch schon beim AC-Ladevorgang ist das CCCV-Ladeprofil erkennbar.



Abbildung 4.13: Schnellladen BMW i3

Der Ladestrom beträgt zu Beginn 123 A. Nach etwa fünf Minuten Ladezeit sinkt dieser geringfügig auf 120 A, mit welchem konstant bis zu einem SOC (Real) von etwa 75 % geladen wird. Die Spannung steigt in diesem Ladeabschnitt um etwa 40 V an. Zu Beginn des Ladevorganges beträgt die Ladeleistung 44 kW. Nach Beenden der CC-Phase beginnt die CV-Phase, bei der mit konstanter Ladespannung von 400 V geladen wird. Der Strom wird proportional mit der Ladedauer von 120 A auf 0 A kontinuierlich gesenkt, was charakteristisch für die CV-Phase ist.

Auffällig ist, dass die CC- und die CV-Phase in diesem Abschnitt mit jeweils 30 Minuten gleich lang sind. In der CC-Phase wird das Fahrzeug von einem SOC von 25 % auf einen SOC von 75 % (Aufladung um 50 %) in 30 Minuten aufgeladen (entspricht 1,66 % SOC-Steigerung pro Minute), während der SOC in der CV-Phase nur um 20 % bis auf Vollladung gesteigert wird. Um die Batterie bei hohen SOC-Werten nicht zu stark zu belasten muss die Ladeleistung verringert werden, was den restlichen Ladevorgang deutlich verlängert.

### Vergleich Zelltemperaturen

In den beiden folgenden Abbildungen wird die Auswirkung der Ladevorgänge auf die Zelltemperatur dargestellt. In Abbildung 4.14 Abbildung ist hierbei ein AC-Ladevorgang an einem 11kW-Ladepunkt und Abbildung 4.15 ein DC-Ladevorgang an der vorher beschriebenen Schnellladestation dargestellt.

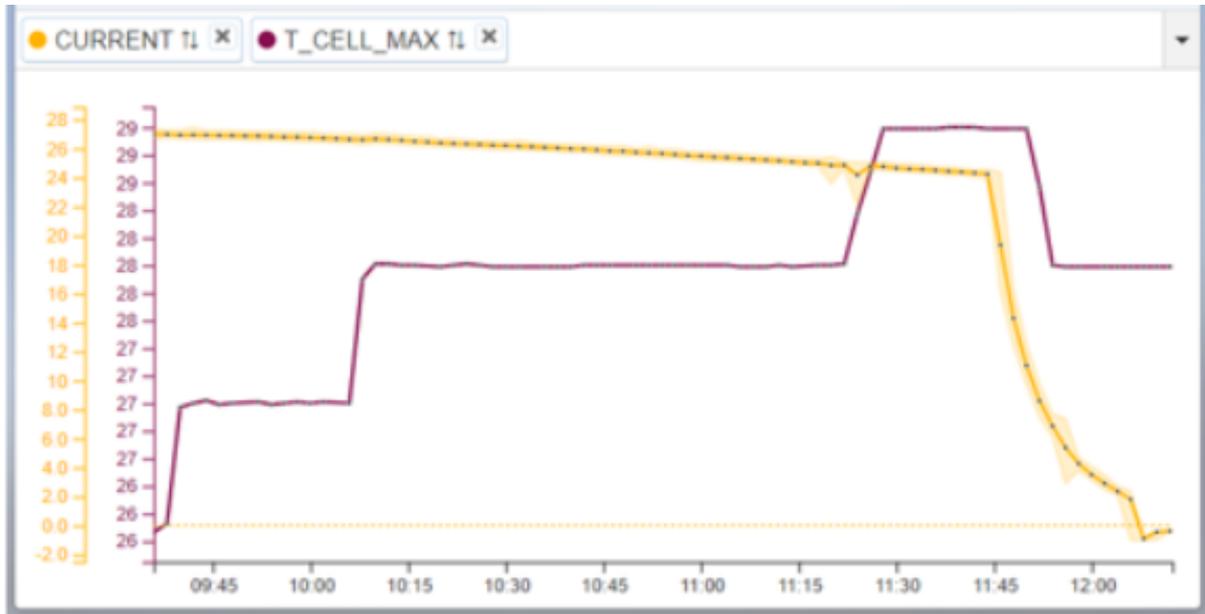


Abbildung 4.14: Temperatur BMW i3 AC-Laden

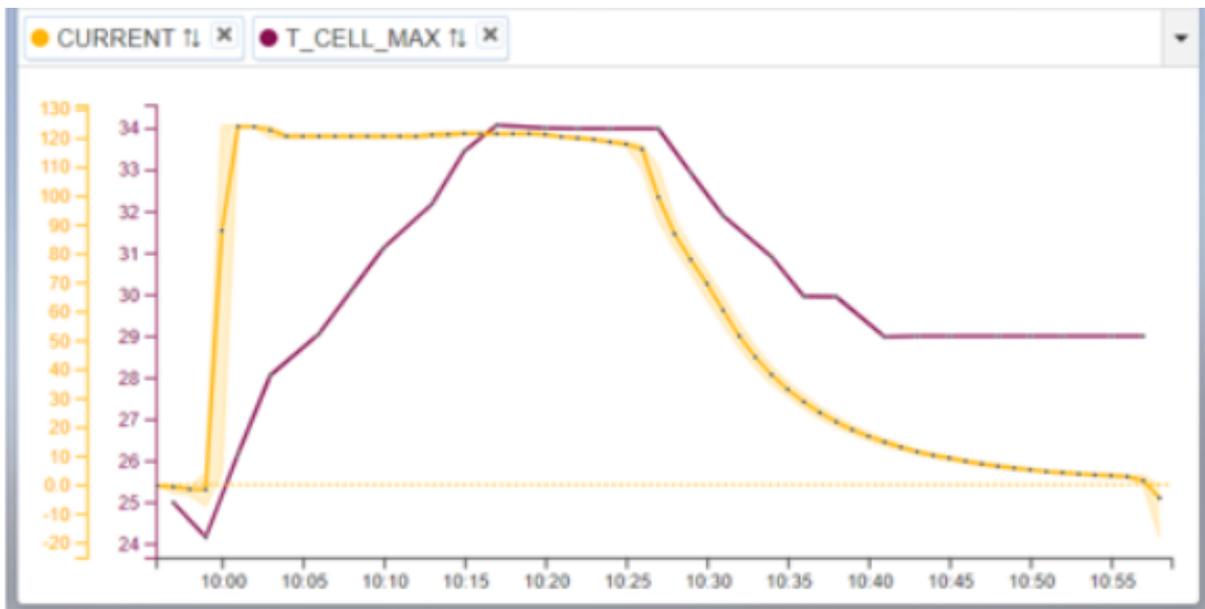


Abbildung 4.15: Temperatur BMW i3 DC-Laden

Beim AC-Laden steigt die Zelltemperatur deutlich weniger an als beim DC-Laden, wodurch die Batterie beim AC-Laden durch den geringeren Ladestrom weniger belastet wird. Weiters folgt die Erkenntnis, dass die Zelltemperatur in der CV-Phase des DC-Ladens wieder

deutlich absinkt, was das Entlasten der Batterie durch die CV-Phase des CCCV-Ladens beweist.

### Zusammenfassung Schnellladen BMW i3

Beim Schnellladen erfolgt eine höhere Batteriebelastung als beim AC-Laden, was deren Lebensdauer auf lange Sicht verringert (wenn das Fahrzeug primär an Schnellladestationen geladen wird). Es ist somit erstrebenswert, das Fahrzeug nur wenn es zwingend notwendig ist an einer Schnellladesäule zu laden. Erfolgt das Laden in der Regel an einem fixen Standort (Wohnung im Privatbereich oder am Arbeitsplatz) mit ausreichend verfügbarer Ladezeit sollte AC-Laden als Ladetechnologie verwendet werden. DC-Ladestationen bieten sich vor allem für längere Fahrten an, bei denen zwischendurch aufgeladen werden muss (vergleichbar Kraftstoff-Tankstelle), weswegen ein vermehrter Einsatz auf Autobahnen und anderen stark befahrenen Straßen sinnvoll ist.

#### 4.2.3 Ladevorgang VW e-Golf

Nach Beenden der Fahrt (welche im Abschnitt 4.1.2 beschrieben wurde) wurde der VW e-Golf an einen 11 kW Ladepunkt angesteckt. Der Ladevorgang wird in 3 Abschnitten durchgeführt. Abbildung 4.16 zeigt den gesamten Ladevorgang. In dieser ist ersichtlich, dass ein vollständiger Ladevorgang von einem  $SOC$  von 30 % bis auf einen  $SOC$  von 100 % beim e-Golf an diesem Ladepunkt etwa 3,5 h dauert.

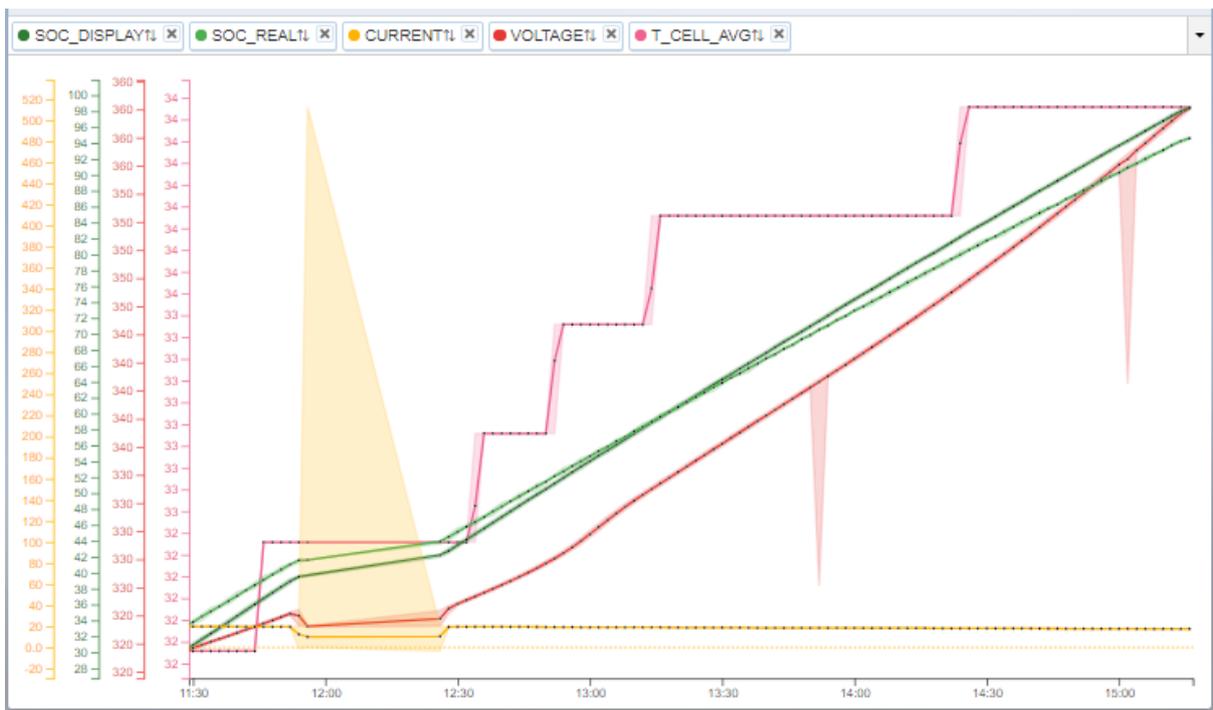


Abbildung 4.16: Ladevorgang VW e-Golf

### Laden direkt nach Beenden der Fahrt

Ziel dieses ersten Abschnittes ist es, das Laden direkt nach Beenden der Fahrt aufzuzeichnen. Die Batterie befindet sich unmittelbar nach der Fahrt noch auf Betriebstemperatur. Wird das Fahrzeug im Gegensatz dazu eine gewisse Zeit abgestellt bevor mit dem Ladevorgang begonnen wird, kühlt die Batterie in dieser Zeitspanne ab. Die beiden Möglichkeiten (Laden direkt nach der Fahrt und Laden nach einer Wartezeit) werden anhand der SOC-Werte miteinander verglichen. In der Abbildung 4.17 ist der erste Abschnitt nochmal genauer dargestellt.

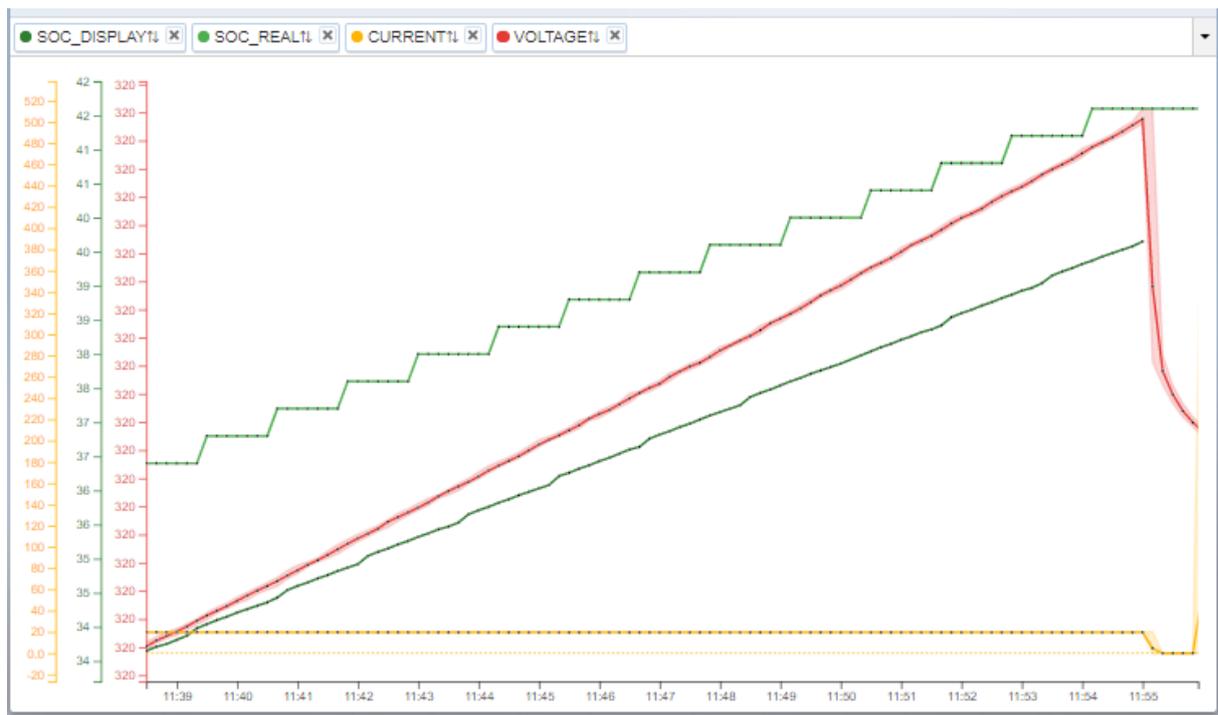


Abbildung 4.17: Ladeabschnitt 1 e-Golf

Der Ladestrom beträgt konstant 18,5 A. Dieser ist höher als der zulässige maximale einphasige Strom von 16 A. Im Falle einer zweiphasigen Ladung könnten diese Grenzwerte theoretisch noch eingehalten werden. Ob zweiphasiges Laden vorliegt muss damit durch Kontrolle der drei Phasen in den Abgängen noch untersucht werden. Durch Erkenntnisse früherer Messungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die verwendeten VW e-Golf Modelle zweiphasig laden. Aus den gemessenen 18,5 A kann darauf geschlossen werden, dass der e-Golf einen maximalen Ladestrom von 20 A bezieht, welcher in Deutschland noch zulässig ist. Eine Begrenzung des Ladestromes müsste in diesem Fall auf der Seite der Ladesäule erfolgen. Die Ladeleistung des Ladevorganges beträgt in diesem Abschnitt etwa 6 kW. Genauere Untersuchungen diesbezüglich erfolgen bei der Messung der Ladevorgänge an den Transformator-Abgängen.

Bezüglich der SOC-Werte ist erkennbar, dass der *SOC-DISPLAY* kontinuierlich vom Fahr-

zeug geliefert wird, wohingegen der *SOC-REAL* nur etwa einmal pro Minute geliefert wird, was durch die treppenartige Darstellung ersichtlich ist. Wird zusätzlich die Zelltemperatur in Abbildung 4.18 betrachtet, so ist erkennbar, dass diese in Folge des Ladevorganges um etwa  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ansteigt. Weitere Untersuchungen bezüglich der Zelltemperatur erfolgen in den nächsten Abschnitten.

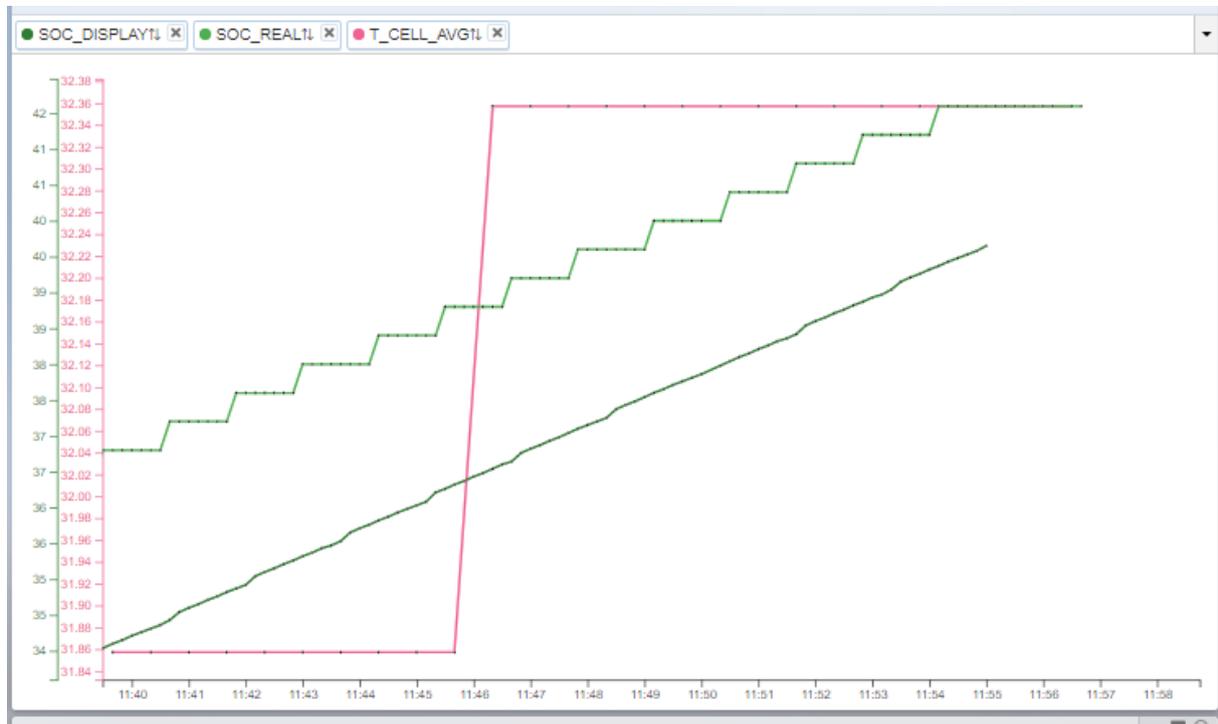


Abbildung 4.18: Temperatur Ladeabschnitt 1 e-Golf

### Abstecken des Fahrzeuges

In diesem Abschnitt des Ladevorganges geht es darum, die Batterie zu entlasten. Diese Entlastung wird für etwa 30 Minuten durchgeführt. Der Ruhezustand des Fahrzeuges kann aus dem Ladestrom von  $0\text{ A}$  erkannt werden. Der leicht steigende Verlauf ergibt sich durch das Messsystem, da dieses im abgesteckten Zustand inaktiv ist, und die Werte beim Abstecken und Anstecken graphisch verbindet. Dadurch sind auch die linearen Anstiege zu erklären, welche in der Realität nicht zwingend linear sein müssen. Aus dieser Erkenntnis folgt, dass die Messwerte zwischen Abstecken und Wiederanstecken verworfen werden müssen, und nur die beiden Zeitpunkte konkret betrachtet werden dürfen.

Zum Zeitpunkt des Absteckens sinkt die Spannung um  $1,2\text{ V}$ . Beim Wiederanstecken steigt sie um  $0,6\text{ V}$ .

Der SOC steigt im betrachteten Intervall um  $2\%$ , obwohl das Fahrzeug nicht geladen wird. Um diese Erkenntnis weiter zu untersuchen wird erneut die Zelltemperatur betrachtet. Diese bleibt im betrachteten Zeitraum konstant und es kommt zu keiner Erwärmung.

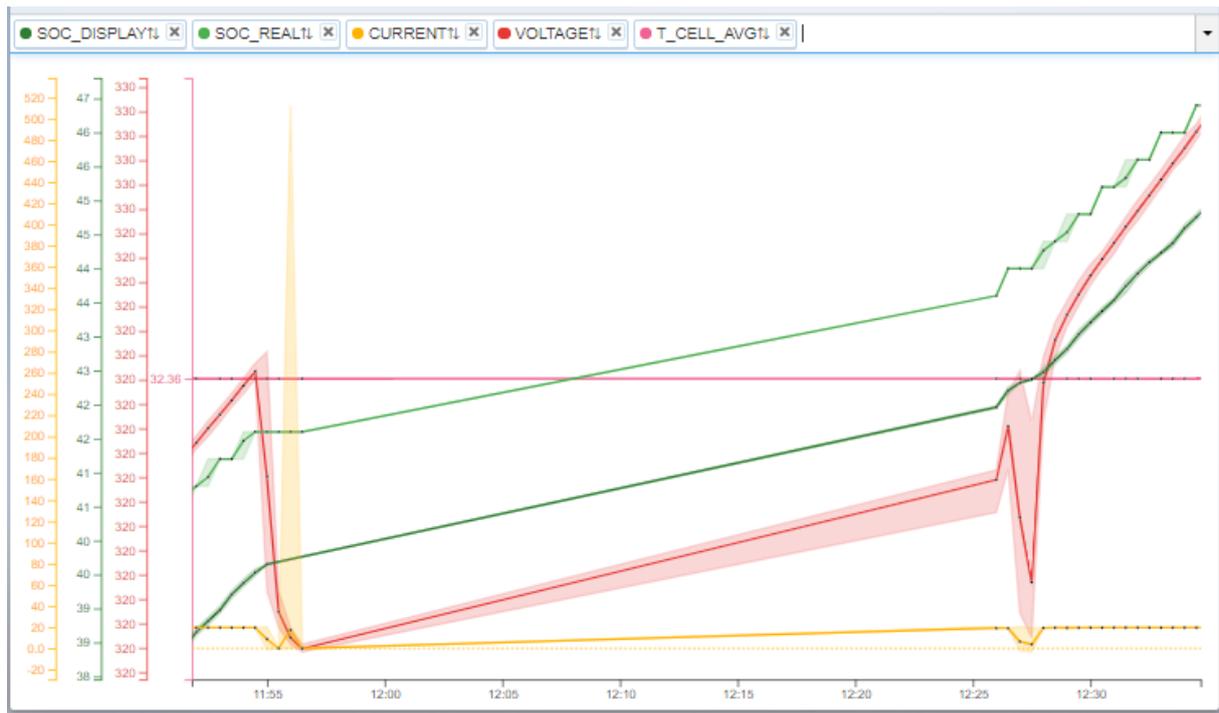


Abbildung 4.19: Ladeabschnitt 2 e-Golf

Um einen Zusammenhang zwischen optimaler Zelltemperatur und SOC der Batterie zu finden muss die Batterie kurz geladen, und dann für eine längere Zeit (mehrere Stunden – jedoch nicht zu lange, sodass Selbstentladungserscheinungen nicht dominieren) im Standby Zustand bleiben. Ob allgemein gilt, dass der SOC der Batterie steigt, wenn sich diese nicht erwärmt, oder ob es sich dabei um einen Messfehler, bzw. eine zufällige Abweichung handelt wird in einer eigenen Messung weiter überprüft.

### Beenden des Ladevorganges

Im dritten Abschnitt geht es darum, das Fahrzeug vollständig zu laden, und zu untersuchen, ob und wie lange der Ladestrom konstant bleibt.

Der Ladestrom beträgt bis zum vollgeladenen Zustand konstant 18,5 A. Die Batterie wird somit durchgehend mit dem maximalen Ladestrom belastet. Die Spannung steigt kontinuierlich bis auf etwa 360 V an. Aus diesen beiden Verläufen zeigt sich, dass beim VW e-Golf kein CCCV-Ladeverfahren vorliegt, sondern MSCC-Laden, was im folgenden Unterpunkt genauer beschrieben wird. Die Zelltemperatur steigt treppenartig bis etwa 34,3 °C an. Diese Treppenkurve zeigt, dass das Fahrzeug die Messwerte der Zelltemperatur ebenfalls nicht kontinuierlich liefert. Aus den SOC-Verläufen erfolgt die Erkenntnis, dass bei einem angezeigten vollgeladenen Zustand (*SOC-DISPLAY* von 100 %) ein realer Ladezustand von 95 % vorliegt.



Abbildung 4.20: Ladeabschnitt 3 e-Golf

### Zusammenfassung der Messung

Bezüglich der Ladung konnte festgestellt werden, dass der VW e-Golf mit einem Ladestrom von 20 A lädt, was einphasig nicht zulässig wäre. In den früheren Messungen wurde festgestellt, dass die VW e-Golf Modelle mit Baujahr 2017 zweiphasig laden, wodurch die Annahme des zweiphasigen Ladens beim VW e-Golf getroffen werden. Durch Messung der Trafoabgänge kann zusätzlich untersucht werden, ob die einphasigen Ströme die zulässigen Grenzwerte von 16 A überschreiten. Weiters konnte festgestellt werden, dass der SOC der Batterie im Falle der durchgeführten Messung bei Entlastung der Batterie leicht steigt. Auch diese Erkenntnis wird in einer folgenden Messung weiter untersucht. Eine weitere Erkenntnis aus dieser Messung ist, dass beim VW e-Golf kein CCCV-Laden sondern eine andere Art von Ladevorgang vorliegt, wodurch die Batterie bis zur Vollladung trotz geringfügiger Verringerung mit hohen Ladeströmen belastet wird.

### Vollständiger AC-Ladevorgang

Zum Abschluss der generellen Untersuchungen des AC-Ladens beim VW e-Golf erfolgt ein Bild eines vollständigen AC-Ladevorganges. Aus diesem ist ersichtlich, dass es sich beim Ladevorgang des VW e-Golfs um MSCC-Laden handelt, da der Ladestrom stufenweise gesenkt wird. Dieses Ladeprofil wurde im Laufe einer anderen Messung aufgenommen, und wurde deswegen im vorherigen Abschnitt nicht zur Beschreibung herangezogen.



Abbildung 4.21: MSCC-Laden e-Golf

#### 4.2.4 Überprüfen der Annahme der Temperaturabhängigkeit

In diesem Abschnitt sollen die in Kapitel 4.2.3 – Ladeabschnitt 2 (laut Abbildung 4.19) getroffenen Annahmen der Temperaturabhängigkeit des SOC genauer betrachtet werden. Um zu untersuchen, ob der SOC bei Entlastung der Batterie im Standby-Betrieb steigt wird erneut ein VW e-Golf an einem 11 kW Ladepunkt geladen. Vor der Aufladung wird das Fahrzeug auf einen SOC-Wert von 38% entladen. Direkt nach Beendigung der Fahrt wird das Fahrzeug für etwa 30 Minuten lang geladen. Danach wird der e-Golf für etwa 2 Stunden abgesteckt, um die Batterie zu entlasten. Nach diesen 2 Stunden wird der Ladevorgang fortgesetzt. Der gesamte Ladevorgang ist in Abbildung 4.22 ersichtlich. In der abgesteckten Phase dürfen nur die beiden Randpunkte beim Ab- und Anstecken betrachtet werden.

##### Messung des Ladevorganges

Im Gegensatz zu Abbildung 4.19 steigt der SOC in der abgesteckten Phase nicht, sondern er bleibt über die ganze Zeit konstant. Es kommt in diesen knapp 2 Stunden weder zu einer Entlastungs- oder Temperaturbedingten SOC-Erhöhung, noch zu merklichen Entladevorgängen. Die Annahmen aus Kapitel 4.2.3 – Ladeabschnitt 2 müssen somit erneut überprüft werden. In den folgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse der Messung untersucht.

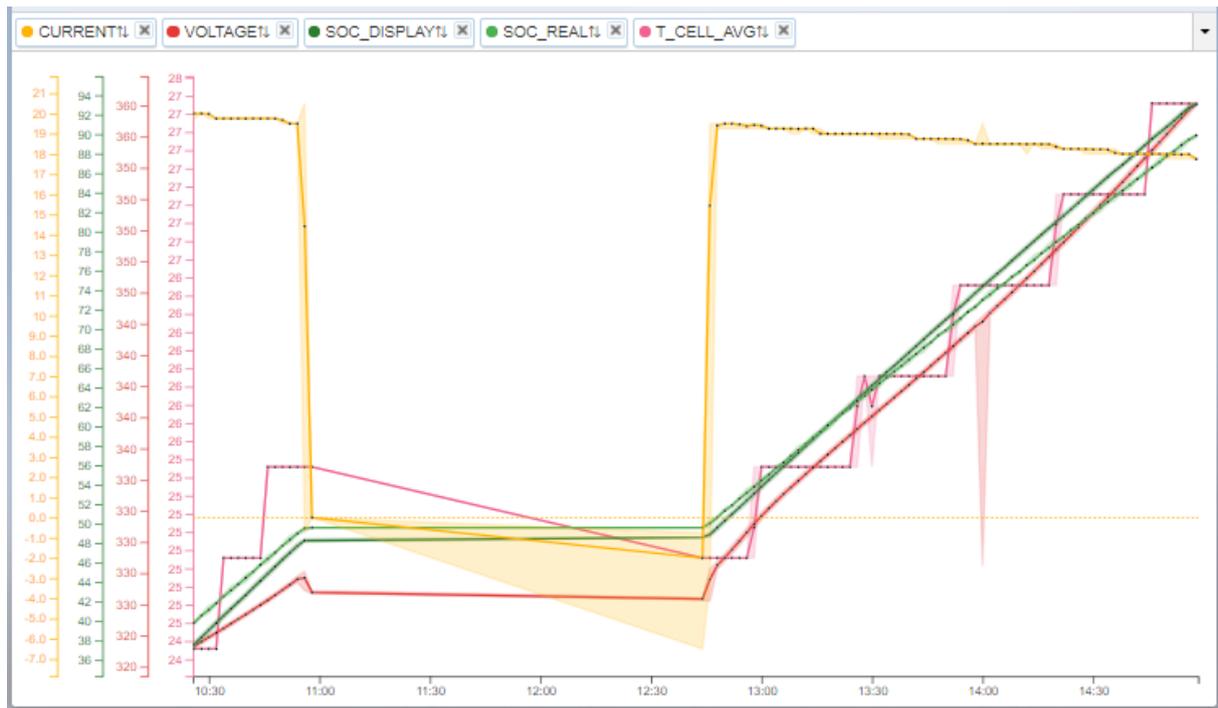


Abbildung 4.22: Überprüfung Temperaturabhängigkeit

### Erkenntnisse bezüglich Stromverlauf

Aus dem Stromverlauf in Abbildung 4.22 ist ersichtlich, dass dieser zu Beginn des Ladevorganges 20 A beträgt. Dies bestätigt erneut die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen bezüglich einphasiger Belastung. Weiters ist ersichtlich, dass der Strom mit steigendem SOC-Wert stufenweise in 0,25 A Schritten (Verringerung etwa alle 5 % SOC-Steigerung) verringert wird. Bei annähernd vollgeladenem Fahrzeug beträgt der Ladestrom nur noch 17,5 A. Die Batterie wird mit steigendem SOC weniger belastet, was deren Lebensdauer erhöht.

### Erkenntnisse bezüglich Temperaturabhängigkeit

In Abbildung 4.22 wird zusätzlich die Zelltemperatur angezeigt. Diese steigt während des Ladevorganges kontinuierlich an. Aufgrund der geringeren Ausgabeintervalle der Werte auf der Seite des Fahrzeuges hat der Verlauf eine treppenartige Form. Während der Stillstand-Phase sinkt die Zelltemperatur um 0,5 °C. Durch den temperaturunabhängigen SOC-Wert konnte gezeigt werden, dass der SOC-Wert der Batterie nicht zwingend bei Entlastung der Batterie leicht ansteigt, wie es beim Ladevorgang laut Abbildung 4.19 der Fall war. Um zu untersuchen, ob der Ladevorgang temperaturunabhängig und belastungsunabhängig ist, werden die Steigungen der beiden Ladeabschnitte in Abbildung 4.22 miteinander verglichen. Eine Auswertung der Messwerte ergibt bei beiden Abschnitten eine Steigung von 4,8 % pro 15 Minuten Ladezeit (0,27 %/min). Da diese Steigung in beiden Fällen gleich

ist, kann im Allgemeinen auf Temperatur- und Belastungsunabhängigkeit bei geringen Temperaturänderungen geschlossen werden.

Diese Unabhängigkeit kann jedoch nur für geringe Temperaturunterschiede ( $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), die beim Abkühlen der Batterie auftreten, vorausgesetzt werden. Im Allgemeinen hat sich gezeigt, dass der SOC der Batterie mit sinkender Temperatur kleiner wird. Dies ist durch die geringere Leitfähigkeit des Elektrolyten der Batterie bei geringeren Temperaturen bedingt. Daraus resultiert eine geringere Batteriespannung bei der Entladung bei kleineren Temperaturen, und ein früheres Erreichen der Ladeschlussspannung, was direkt mit einer Kapazitätsverringern der Batterie zusammenhängt [75]. Langfristig gesehen wird die Batterie jedoch bei höheren Temperaturen stärker belastet, weswegen die Lebensdauer der Batterie sinkt, und auch der SOC in weiterer Folge langfristig sinkt [76]. Um dies zu überprüfen werden weitere Messungen des Ladevorganges in den Wintermonaten durchgeführt.

### Erkenntnisse bezüglich SOC-Steigerung

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt festgestellten Temperaturunabhängigkeit der Batterie bei geringer Temperaturänderung muss die Ursache der SOC Steigerung nach Abbildung 4.19 noch untersucht werden. Eine mögliche Ursache dieser Steigerung um etwa 2% können laut Expertenmeinung Ausgleichsvorgänge in der Batterie im Stillstand sein.

Eine weitere mögliche Ursache ist, dass das Batteriemanagementsystem (BMS) den SOC-Wert teilweise nicht zur Gänze richtig interpretiert, und somit einen leicht von der Realität abweichenden Wert (in wenigen Prozent) ausgibt. Zusätzlich kann es zu geringen Messabweichungen seitens des Messsystems kommen.

Generell kann darauf geschlossen werden, dass es ohne ersichtliche Abhängigkeit von Umweltparametern zu einer zufälligen SOC-Abweichung und einer nicht erwarteten Steigerung kommen kann, welche auch durch Messung bei exakt gleichen Bedingungen nicht Reproduziert werden kann [77]. Bei einer erneuten Überprüfung kam es erneut zu einer SOC-Steigerung. Der Ladevorgang wurde dabei wieder für etwa 1,5 h unterbrochen, und es kam in diesem Zeitraum zu einer SOC-Steigerung von 2%.

Ein Gespräch mit der Partnerfirma Aviloo hat ergeben, dass auch diese vom Abend bis zum nächsten Morgen eine SOC-Steigerung von 4% feststellen konnten, wobei das Auto über Nacht in einer Garage abgestellt war und nicht geladen wurde.

Aus all diesen Erfahrungen erfolgt die Erkenntnis, dass es durch interne Ausgleichsvorgänge in der Batterie zu einer SOC-Steigerung kommen kann. Wie hoch diese Steigerung ist und ob sie auftritt ist jedoch nicht deterministisch, weswegen dahingehend keine allgemein gültige Gesetzmäßigkeit angegeben werden kann.

In einer weiteren Messung, bei der der SOC direkt nach einer Fahrt, sowie etwa eine Stunde später, gemessen wurde, konnte eine SOC-Verminderung von 1,2 % gemessen werden. Aufgrund dieser weiteren Messung kann erneut auf Indeterminismus geschlossen werden. Eine Abweichung des SOC-Wertes von 2 % (positiv oder negativ) kann somit zu jeder Zeit vorkommen.

#### 4.2.5 Schnellladen VW e-Golf

Wie beim BMW i3 wird auch beim VW e-Golf ein Schnellladevorgang aufgenommen. Dazu wird der SOC im Rahmen einer Ausfahrt auf etwa 22 % reduziert. Direkt nach der Fahrt wird der e-Golf vollgeladen. Der Ladevorgang dauert 45 Minuten, wobei das Fahrzeug bei einem realen SOC von 96 % als vollgeladen gilt. Mit diesen Werten ergibt sich eine SOC-Steigerung von 1,64 % pro Minute. Der Ladevorgang wird in Abbildung 4.23 dargestellt.

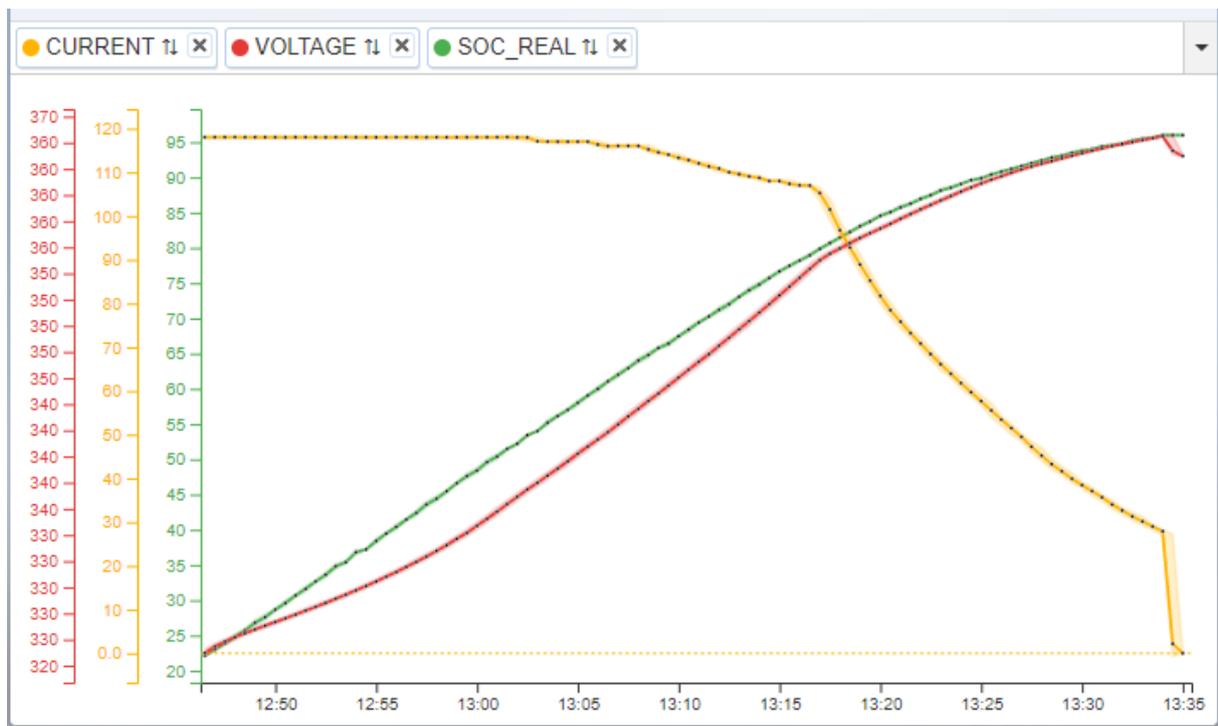


Abbildung 4.23: Schnellladen VW e-Golf

Beim diesem Ladevorgang ist ein CCCV-Ladeprofil erkennbar, wobei die Spannung gegen Ende des Ladevorganges nicht vollständig konstant gehalten wird, sondern noch geringfügig (wenige Volt) gesteigert wird. Der Strom beträgt zu Beginn 118 A. Ab einem SOC von 50 % wird der Strom stufenweise bis auf 116 A gesenkt, und weiters ab einem SOC von 65 % kontinuierlich mit etwa 1 A pro Prozent SOC-Steigerung verringert. Bei einem SOC von 80 % ist der Abfall des Stromes mit etwa 4 A pro Prozent SOC-Steigerung deutlich größer. Der Wert dieses Stromabfalls bleibt bis zum Ende des Ladevorganges konstant.

Die Ladeleistung beträgt zu Beginn des Ladevorganges etwa 38,5 kW. Mit der Schnellladesäule sind bis zu 150 kW Ladeleistung möglich. Diese werden vom VW e-Golf somit nicht vollständig ausgenutzt. Gegen Ende des Ladevorganges beträgt die Ladeleistung nur noch 10 kW, was mit der eines dreiphasigen Ladevorganges vergleichbar ist. Die Leistungsminde- rung (bzw. Stromminderung) bei höheren SOC-Werten dient wie bereits erwähnt dazu, die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen. Da beim Schnellladen höhere Ströme in die Batterie fließen ist dieser Schritt noch dringender notwendig, als bei AC-Laden. Weiters ist eine Einleitung der CV-Phase bei niedrigeren SOC-Werten (als beim AC-Laden) notwendig, da die Batterie beim Schnellladen auch bei geringfügigem Senken des Ladestromes noch weitaus mehr belastet wird, als beim AC-Laden.

### Vergleich Zelltemperaturen

In diesem Unterpunkt werden die Zelltemperaturen beim AC-Laden mit geringeren Strömen (Abbildung 4.24) und DC-Laden mit hohen Strömen (Abbildung 4.25) verglichen. Es ist erkennbar, dass die Zelltemperatur beim DC Laden mit 37 °C fast doppelt so hoch ist wie beim AC Laden mit 19 °C.

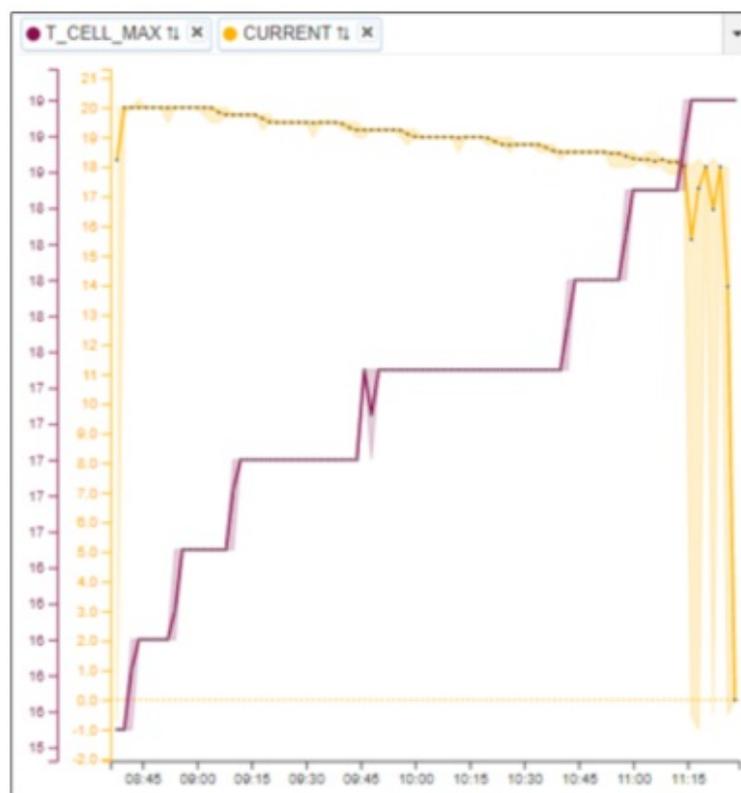


Abbildung 4.24: Temperatur VW e-Golf AC-Laden

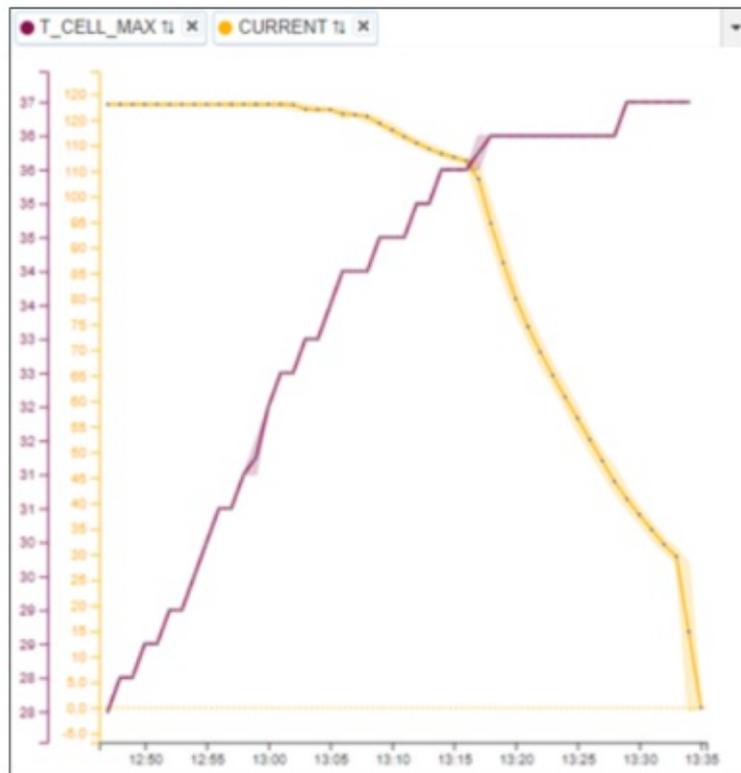


Abbildung 4.25: Temperatur VW e-Golf DC-Laden

### Zusammenfassung Schnellladen VW e-Golf

Es konnte festgestellt werden, dass das Schnellladen zwar erheblich kürzere Ladedauern bewirkt, jedoch wird gleichzeitig auch die Batterie stärker belastet. Aus diesem Grund sollte Schnellladen nur dann verwendet werden, wenn es unbedingt notwendig ist, z.B. wenn dringend in kürzerer Zeit weite Strecken mit dem Fahrzeug zurückgelegt werden müssen. Bei ausreichend verfügbarer Zeit zum Laden (wie es in der Regel im Privatbereich der Fall ist) sollte deswegen Laden mit geringeren Ladeströmen angestrebt werden.

#### 4.2.6 Laden an Schuko-Steckdose VW e-Golf

Um einen Ladevorgang an einer Schuko-Steckdose aufzunehmen und zu untersuchen wird das Fahrzeug an einem 3,7 kW Ladepunkt angesteckt, und der Ladestrom auf 10 A begrenzt. Damit ist die Ladeleistung am Fahrzeug auf 2,3 kW begrenzt. Abbildung 4.26 zeigt den aufgenommenen Verlauf.

Die Ladeströme und Spannungen (welche mit dem Aviloo-Messsystem direkt an der Batterie gemessen werden) betragen laut Abbildung 4.26 zu Beginn des Ladevorganges 6,25 A und 315 V. Bis zum Ende des Ladevorganges steigt die Spannung bis auf 360 V und der Strom sinkt (gemäß MSCC-Laden) auf 5,5 A. Die maximale Ladeleistung des Ladevorganges beträgt somit 1,98 kW, womit Verluste von 320 W beim Schuko-Ladevorgang zu verzeichnen

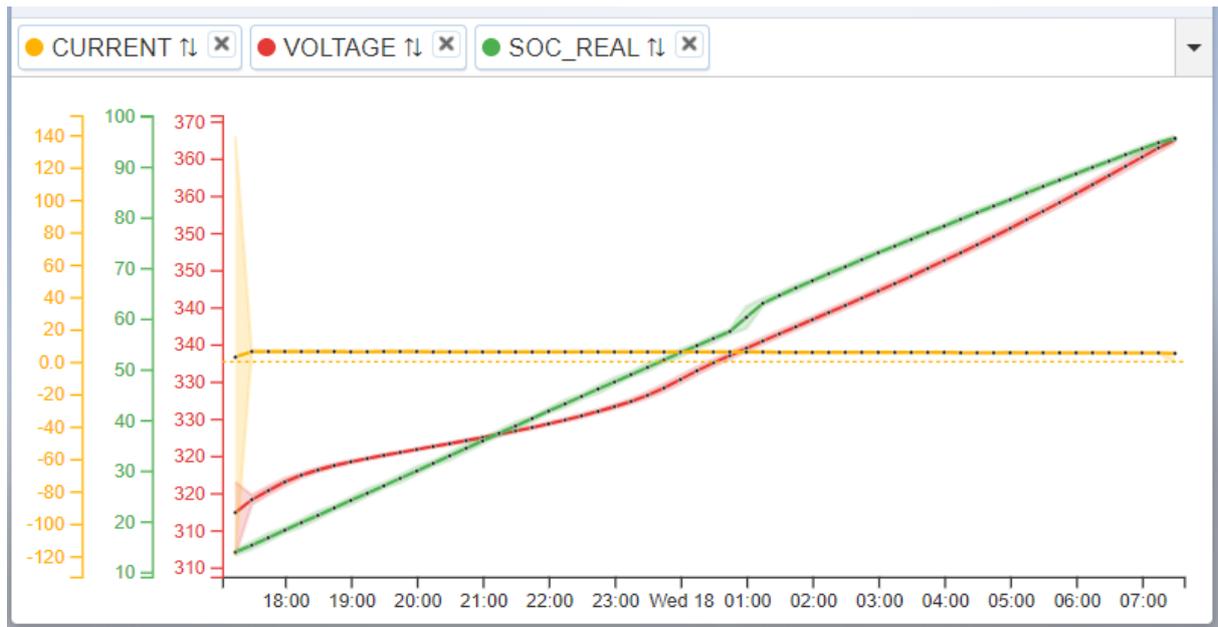


Abbildung 4.26: Ladevorgang Schuko-Steckdose

sind. Bezogen auf die Nennleistung von 2,3 kW ergeben sich damit prozentuell gesehen etwa gleiche Verluste wie an den 11 kW-Ladepunkten.

Der reale State of Charge zu Beginn der Ladung um 17:15 Uhr beträgt etwa 14 %. Das Fahrzeug ist am darauffolgenden Tag um 07:30 Uhr bei einem SOC von 96 % vollständig geladen, womit die Ladedauer für einen vollständigen Ladevorgang an einer Schuko-Steckdose über 11 Stunden beträgt. Pro Minute erfolgt damit eine SOC-Steigerung von 0,12 %.

Aus der Messung ist erkennbar, dass die Schuko-Ladung keine Vor- oder Nachteile bezüglich Ladeverlusten bietet. Mit einer Ladezeit von über 11 Stunden ist die Ladedauer teilweise unzulässig lang, um einen optimalen Betrieb des Fuhrparks gewährleisten zu können. In der Regel würde die Zeit ausreichen, um ein Fahrzeug vollständig aufzuladen. Die langen Ladezeiten können (trotz geringerer Ladeleistung) zukünftige Ziele wie Verringern der Gleichzeitigkeiten (GLZ) und Implementierung von Lademanagement behindern.

Laden an Schuko-Steckdosen sollte somit nur dann in Erwägung gezogen werden, wenn nicht ausreichend Ladeinfrastruktur vorhanden ist, um Ladevorgänge mit höherer Ladeleistung durchzuführen. Aufgrund der hohen Ladezeit wird die Schuko-Ladung in den weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt.

#### 4.2.7 Vergleich Ladekurven

In diesem Abschnitt werden die Ladekurven der Fahrzeugmodelle, deren Messung in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.3 beschrieben wurde, verglichen. Dieser Abschnitt soll wie Ab-

schnitt 4.1.3 einen kurzen Überblick über die Unterschiede zwischen den Fahrzeugmodellen bieten.

Beide AC-Ladevorgänge wurden an einem 11 kW Ladepunkt durchgeführt. Der BMW i3 konnte hierbei dreiphasig mit einem Ladestrom von bis zu 27 A und einer Ladeleistung von 9,8 kW geladen werden. Beim VW e-Golf hingegen konnte nur mit einem Ladestrom von 18,5 A und einer Ladeleistung von 6 kW geladen werden. Aufgrund der höheren Ladeleistung des BMW i3 dauert der Ladevorgang weniger lange als beim e-Golf.

Bei den beiden Fahrzeugen werden unterschiedliche Ladeverfahren verwendet. Der BMW i3 verwendet das CCCV-Ladeverfahren, bei dem der Ladestrom ab einem SOC (real) von 90 % nicht mehr konstant gehalten, sondern reduziert wird. Der VW e-Golf senkt stufenweise den Ladestrom, und verwendet somit das MSCC-Ladeverfahren. Werden beide Fahrzeuge im Konstantstrombereich miteinander verglichen, so dauert eine Aufladung um 10 % Punkte beim e-Golf etwa 30 Minuten und beim BMW i3 knapp über 20 Minuten.

Bezüglich DC-Laden (Schnellladen) wurden beide Fahrzeuge an einem 150 kW Ladepunkt aufgeladen. Die Ladeströme der beiden Fahrzeugmodelle unterscheiden sich nur gering. Die Ladeleistung ist beim BMW i3 zu Beginn mit 44 kW etwas höher als beim VW e-Golf mit 38,5 kW. Generell konnte erkannt werden, dass die Ladedauer der beiden Fahrzeuge beim Schnellladen in etwa gleich ist. Beim BMW i3 liegt reines CCCV-Laden vor. Beim VW e-Golf wird die Spannungssteigerung gegen Ende des Ladevorganges nur verringert, und nicht komplett unterbunden. Gleichzeitig wird der Strom gegen Ende des Ladevorganges beim VW e-Golf im Vergleich zum BMW i3 nicht komplett auf 0 A reduziert. Generell ist die Ähnlichkeit der DC-Ladevorgänge der beiden Fahrzeugmodelle jedoch größer als die der AC-Ladevorgänge.

### 4.3 Datenerhebung aus den Messungen

In den vorherigen Kapiteln wurde beschrieben, wie die Messungen durchgeführt werden. Im Projekt „Lademanagement Fuhrpark“ von Netz Niederösterreich werden die Messgeräte von Aviloo (laut Abbildung 3.2) auf längere Dauer in den Fahrzeugen verbaut und angesteckt. Mit diesen ist es möglich, permanent Daten aufzunehmen - konkret werden immer dann Daten geschickt, wenn Ereignisse auftreten, wie zum Beispiel eine Fahrt oder ein Ladevorgang. Weiters wird das Siemens Messsystem im Schaltschrank (wie in Abbildung 3.7) verbaut. Zusätzlich dazu erfolgt eine Power Quality Messung mit dem Haag Combi-Quant Messgerät. Alle Messwerte werden gesammelt in Datalab gespeichert.

Für die Auswertung der Daten werden die aufgezeichneten Sessions analysiert. Aus den Messungen mit dem Aviloo-Messsystem werden einerseits die durchgeführten Fahrten, und andererseits die Ladevorgänge analysiert. Von den Messwerten des Siemens-Systems und des Power Quality Messgeräts werden in erster Linie die Ströme auf den drei Phasen aller Abgänge und die verketteten Spannungen analysiert, um mögliche Unsymmetrien der Ladevorgänge zu ermitteln, und in weiterer Folge die Auswirkungen auf das Verteilnetz zu analysieren.

Die Analysen werden über einen Zeitraum von knapp einem Monat (4 Wochen) durchgeführt, wobei die Sessions immer am darauf folgenden Tag eingetragen werden, da teilweise Nachtsessions (bei späterer Rückkehr zum Dienort) aufgezeichnet werden.

In diesem Abschnitt werden sowohl die Vorgehensweise bei der Datenerhebung, als auch die erhobenen Daten beschrieben. Weiters werden die erhobenen Daten analysiert und miteinander verglichen. In Kapitel 5 werden die erhobenen Daten und gewonnenen Erkenntnisse für weitere projektrelevante Analysen erneut herangezogen.

#### 4.3.1 Erhebung der Fahrten

Mit dem Aviloo-Messsystem ist es möglich, den Kilometerstand des Fahrzeuges als Kurve darzustellen, und die vom Fahrzeug ausgegebenen Daten aus der Ferne auszulesen. Diese Vorgehensweise ersetzt damit das ursprünglich geplante manuelle Auswerten der Fahrtenbücher. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass der Verlauf des SOC und der Verlauf des Kilometerstands gleichzeitig angezeigt werden können. Ein Beispiel solch einer Anzeige wird in Abbildung 4.27 dargestellt.

Der Kilometerstand ist hierbei in grau und der (reale) SOC in grün dargestellt. Wie zu erwarten war, sinkt der SOC in der Regel wenn der Kilometerstand steigt. In einzelnen Teilabschnitten ist es möglich, dass der SOC trotz steigender Kilometeranzahl konstant bleibt oder steigt. Er bleibt konstant, wenn das Fahrzeug bergab nicht beschleunigt werden

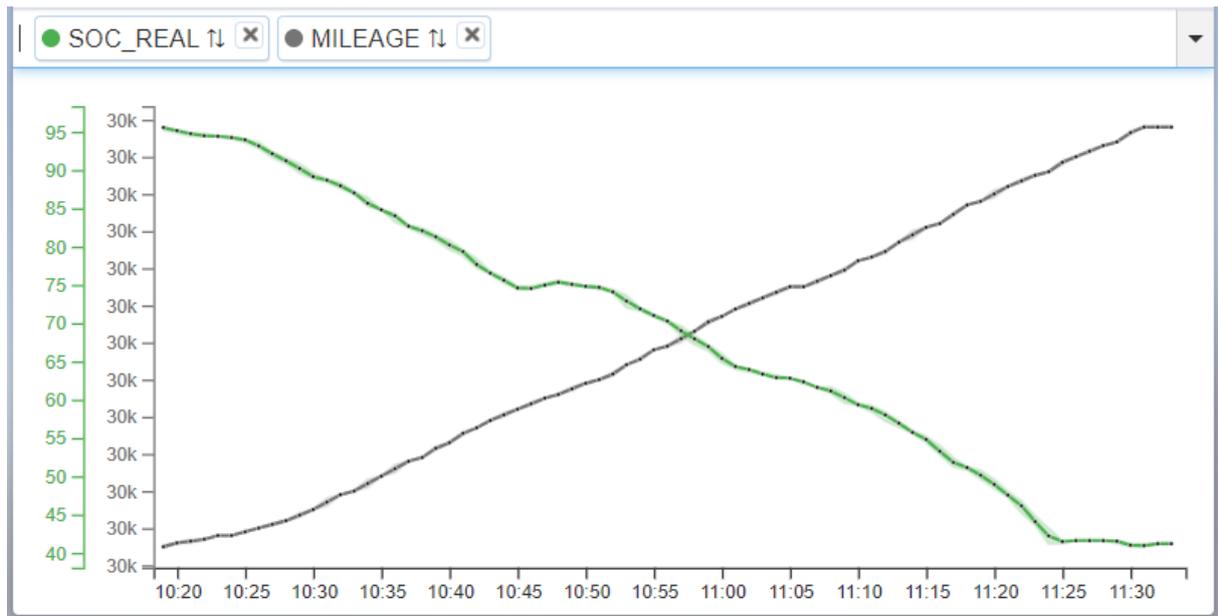


Abbildung 4.27: Kilometerstand und SOC - Darstellung

muss, und gleichzeitig auch keine Bremsung erfolgt. Wenn eine Bremsung erfolgt steigt der SOC während dieser Phase, was als Rekuperieren bezeichnet wird. In der Aufzeichnung werden ausschließlich Fahrten über mehrere Kilometer dokumentiert, wodurch die kurzen Rekuperationsphasen für das Modell der Fahrten nicht direkt berücksichtigt werden. Die Fahrten werden immer als Vorgänge angesehen, bei denen der SOC verringert wird. Rekuperationsphasen äußern sich lediglich darin, dass der SOC bei Beenden der Fahrt etwas höher ist, als er ohne die Rekuperationsphasen wäre.

Ziel der Datenerhebung der Fahrten ist es, zu wissen wie viele Kilometer durchschnittlich mit den Fahrzeugen gefahren wird. Dazu werden das Datum der Fahrt, die Abfahrtszeit, die Ankunftszeit, die gefahrenen Kilometer, und der SOC-Stand bei Anfang und Ende der Fahrt tabellarisch dokumentiert. Durch die gleichzeitige Messung von gefahrenen Kilometern und SOC-Verringerung ist es möglich, die SOC-Verringerung pro Kilometer (in %/km) auszurechnen. Wenn der SOC in kWh angegeben wird kann die Verringerung auch in kWh/km angegeben werden. Die berechnete SOC-Verringerung pro Kilometer wird ebenfalls für jede Fahrt dokumentiert.

Aus all diesen aufgezeichneten Werten werden durchschnittlich gefahrene Strecken ermittelt, welche für weitere Analysen herangezogen werden können.

### Durchschnittlich gefahrene Kilometer

Aus der Differenz zwischen dem Kilometerstand nach der Fahrt und dem Kilometerstand vor der Fahrt können die gefahrenen Kilometer im Rahmen einer Fahrt ermittelt werden. Bei der Datenerhebung werden die Fahrten aller Fahrzeuge des Fuhrparks ausgewertet. Die

Fahrten werden anhand der gemessenen Sessions aufgezeichnet, weswegen zwischenzeitlich unterbrochene Fahrten (ab einer Unterbrechungsdauer von mehr als 30 Minuten) als separate Fahrten dokumentiert werden. Die Auswirkung dieser Fahrten in mehreren Abschnitten wirkt sich auf die durchschnittlichen SOC-Werte bei der Abfahrt und Ankunft aus.

Aus den aufgezeichneten Fahrten werden der Mittelwert, der Maximalwert und der Minimalwert der gefahrenen Kilometer für die einzelnen Fahrzeugmodelle aus den erhobenen Daten ermittelt. Der Mittelwert dient hierbei als repräsentativer Indikator für die gefahrenen Kilometer mit Elektrofahrzeugen des Fuhrparks. Durch die Bestimmung der maximal gefahrenen Strecke wird ermittelt, bis zu welcher zurückzulegenden Distanz Elektrofahrzeuge von den Mitarbeitern verwendet werden. Mit der Ermittlung des Minimalwertes soll herausgefunden werden, welche Minimalstrecke mit den Fahrzeugen gefahren wurde. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Auswertung Fahrkilometer

	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittelwert</b>	50 km	52 km	47 km
<b>Maximalwert</b>	169 km	169 km	161 km
<b>Minimalwert</b>	3 km	3 km	6 km

In Tabelle 4.1 ist erkennbar, dass die durchschnittlich gefahrenen Kilometer, sowie Minimal- und Maximalwert, unabhängig vom Fahrzeugmodell sind. Durch die ähnliche Reichweite der beiden Modelle (siehe Abschnitt 3.4) wird keines der beiden bevorzugt für längere Strecken an die Mitarbeiter vergeben, und die Auswahl des Fahrzeugmodells ist somit unabhängig von den zu fahrenden Kilometern. Das spiegelt sich in der Gleichheit der Mittelwerte und Extremwerte wider.

Die maximal gefahrenen Kilometer sind mit 169 km noch deutlich unterhalb der laut [72] und [73] angegebenen maximalen Reichweiten. Es kann deswegen davon ausgegangen werden, dass Elektrofahrzeuge in der Regel nur bei Strecken gebucht<sup>1</sup> werden, bei denen die Reichweite des Fahrzeuges sicher ausreicht. Bei einzelnen Fahrten wurde zwischendurch geladen. Die Gesamtstrecke der Fahrt war somit länger als die angegebenen 169 km. Es kann davon ausgegangen werden, dass solche Fahrten mit zwischenzeitlichem Laden ausschließlich von Mitarbeitern, die Erfahrung im Umgang mit Elektroautos haben, durchgeführt werden. In der Regel verwenden Mitarbeiter für weitere Strecken eher Verbrennungsfahrzeuge, auch wenn eventuell die Möglichkeit bestünde, zwischenzeitlich zu laden.

<sup>1</sup>Fahrzeugreservierung mit Angabe ob ein Elektroauto oder ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gewünscht ist

## Fahrzeit

Diese hängt unmittelbar mit den gefahrenen Kilometern zusammen. Die Dauer der Fahrt ist abhängig von der gefahrenen Distanz, der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit (und damit auch der gefahrenen Route - Autobahn, Landstraße oder Stadtgebiet) und etwaigen Fahrpausen. Durchschnittlich betrug die Fahrzeit der erhobenen Fahrten 64 Minuten. Auch durch diesen Wert zeigt sich, dass Elektroautos eher für kürzere Strecke gebucht werden. Die maximale Fahrzeit einer durchgehenden Fahrt beträgt knapp über zwei Stunden und die Minimalzeit fünf Minuten. Auf eine genauere Auswertung der Fahrzeiten wird in diesem Zusammenhang verzichtet.

## SOC-Werte Fahrt

Im Rahmen der Datenerhebung werden der SOC vor der Fahrt und der SOC nach der Fahrt dokumentiert. Diese Aufzeichnungen sollen zeigen, in welchem Ladezustand die Fahrzeuge in der Regel an die Mitarbeiter übergeben werden. Die SOC-Werte bei der Abfahrt sind abhängig vom vor der Fahrt durchgeführten Ladevorgang (primär von dessen Dauer und der Ladeleistung, mit der dieser durchgeführt wurde). Der SOC-Wert nach der Fahrt ist abhängig von der Fahrt. Er bestimmt, wie lange das Fahrzeug nach der Fahrt geladen werden muss. In Tabelle 4.2 sind diese beiden Werte dokumentiert.

Tabelle 4.2: SOC-Werte Fahrt

	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittelwert SOC Abfahrt</b>	83 %	82 %	85 %
<b>Maximalwert SOC Abfahrt</b>	96 %	96 %	94 %
<b>Minimalwert SOC Abfahrt</b>	25 %	25 %	28 %
<b>Mittelwert SOC Ankunft</b>	60 %	59 %	64 %
<b>Maximalwert SOC Ankunft</b>	94 %	94 %	90 %
<b>Minimalwert SOC Ankunft</b>	12 %	12 %	18 %

In der Tabelle ist ersichtlich, dass die Fahrzeuge in der Regel mit über 80 % SOC-Stand vergeben werden. Die Minimalwerte von 25 % und 28 % traten bei Sessions auf, bei denen eine bereits begonnene Fahrt fortgesetzt wurde. Fahrzeuge werden vom Fuhrpark mit so geringen SOC-Werten nicht an Mitarbeiter ausgegeben. Von allen begonnenen Fahrersessions (inklusive fortgesetzten Fahrten) war bei 56 % das Fahrzeug vollgeladen. Bei Fahrten mit Beginn am Dienst-Standort waren die Fahrzeuge immer zu mindestens 75 % vollgeladen.

Die durchschnittlichen SOC-Werte bei der Ankunft zeigen wie schon die Messungen der vorherigen Punkte, dass die Elektrofahrzeuge des Fuhrparks primär für kürzere Strecken

gebucht werden. An den Minimalwerten (des SOC-Wertes bei der Ankunft) ist jedoch erkennbar, dass vereinzelt auch durchaus weitere Fahrten mit Elektrofahrzeugen durchgeführt werden, bei denen die Batteriekapazität des Fahrzeuges bis an die Grenzen getrieben wird. Die Maximalwerte des SOC bei der Ankunft korrelieren mit den minimal gefahrenen Kilometern laut Tabelle 4.1.

### Durchschnittlicher SOC-Verbrauch

Der SOC-Verbrauch der Fahrten wird in %/km dokumentiert. In der Literatur und in Herstellerangaben wird der Verbrauch von Fahrzeugen in den meisten Fällen in der Einheit kWh/km angegeben. Da bei der Messung zwei verschiedene Fahrzeuge mit unterschiedlicher Batteriekapazität verwendet wurden ist es einfacher, die Fahrzeuge anhand des Verbrauches  $W_V$  in %/km zu vergleichen. Dieser errechnet sich folgendermaßen:

$$W_V / (\%/km) = \frac{\Delta SOC / \%}{\Delta s / km} = \frac{SOC_{Fahrbeginn} - SOC_{Fahrende}}{\Delta s} \quad (4.1)$$

wobei  $\Delta s$  die gefahrene Strecke beschreibt. Der durchschnittliche Verbrauch, sowie der Maximalverbrauch werden in Tabelle 4.3 angegeben. Auf die Angabe des minimalen Verbrauches wird verzichtet, da dieser keine projektrelevanten Aussagen liefert.

Tabelle 4.3: Verbrauch der Fahrten in %/km

	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Durchschnittlicher Verbrauch</b>	0,43 %/km	0,43 %/km	0,43 %/km
<b>Maximaler Verbrauch</b>	0,70 %/km	0,70 %/km	0,63 %/km

Der durchschnittliche Verbrauch ist bei allen Fahrzeugen gleich. Lediglich bei den Maximalwerten treten geringe Unterschiede zwischen den Fahrzeugmodellen auf. Der Verbrauch  $W_V$  kann mit folgender Formel von der Einheit %/km in die Einheit kWh/km umgerechnet werden.

$$W_V / (\text{kWh/km}) = \frac{W_V / (\%/km)}{100\%} \cdot C_{Batterie} / \text{kWh} \quad (4.2)$$

$C_{Batterie}$  ist hierbei die nominale Batteriekapazität des jeweiligen Fahrzeugmodells. Laut Abschnitt 3.4 beträgt die Batteriekapazität des VW e-Golfs 35,8 kWh und die des BMW i3 33,2 kWh. Mit den Werten aus Tabelle 4.3 und Gleichung 4.2 ergibt sich Tabelle 4.4 mit den Verbrauchswerten in kWh/km, wobei für die Batteriekapazität des jeweiligen Fahrzeugs die Werte laut Abschnitt 3.4 eingesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen

Kapazitätswerte, sowie der Gleichheit der Mittelwerte wird in dieser Tabelle auf die Darstellung des Durchschnittsverbrauchs beider Fahrzeuge gemeinsam verzichtet.

Tabelle 4.4: Verbrauch der Fahrten in kWh/km

	VW e-Golf	BMW i3
<b>Durchschnittlicher Verbrauch</b>	0,16 kWh/km	0,14 kWh/km
<b>Maximaler Verbrauch</b>	0,25 kWh/km	0,21 kWh/km

Trotz der Gleichheit der Mittelwerte der beiden Fahrzeuge in %/km sind die Mittelwerte aufgrund der geringeren Batteriekapazität des BMW i3 in kWh/km unterschiedlich. Der Mittelwert des Verbrauches des BMW i3 ist somit etwas geringer als der des VW e-Golf. Bei den Maximalwerten bewirkt der unterschiedlich gemessene Wert (in %/km) zusätzlich zu den unterschiedlichen Batteriekapazitäten eine Abweichung der Werte beider Fahrzeuge.

Der Durchschnittsverbrauch der beiden Elektrofahrzeuge beträgt 0,16 kWh/km bzw. 0,14 kWh/km. Auch in den Tests laut Abschnitt 3.4 hatte der VW e-Golf einen höheren Verbrauch als der BMW i3. Die Verbrauchswerte stimmen somit größenordnungsmäßig mit den Werten laut Tests überein.

Wird ein VW Golf 8 (Modell VW Golf 2.0 TDI DSG Style) damit verglichen, welcher ein neues effizientes Verbrennungskraftfahrzeug ist, so verbraucht dieser 4,4l Diesel pro 100 km gefahrener Strecke [78]. Wird dieser Wert mit der Energiedichte von Diesel multipliziert, welche laut [79] 8,76 kWh/l beträgt, so ergibt sich für den VW Golf 8 einen Durchschnittsverbrauch von 0,39 kWh/km, welcher mehr als doppelt so hoch ist wie der Verbrauch der Elektroautos. Bei einem VW Golf 5 mit einem Benzinverbrauch von 0,0679 l/km nach [80] und einer Benzin-Energiedichte von 9,79 kWh/l laut [79], ergibt sich ein Verbrauch von 0,665 kWh/km. Dieser Unterschied ist nochmal höher, was die Effizienz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen unterstreicht.

Um die Temperaturabhängigkeit zu überprüfen werden zusätzlich Werte von Fahrten Ende November (an Tagen mit Temperaturen unter 0 °C betrachtet, wobei die Überprüfung stichprobenartig erfolgt. Bei den betrachteten Fahrten ist der Verbrauch pro Kilometer bei beiden Fahrzeugmodellen höher als der Durchschnittswert nach Tabelle 4.4. Dies ist durch die geringere Effizienz der Batterie bei niedrigen Temperaturen bedingt. Der Innenwiderstand der Batterie steigt bei niedrigeren Temperaturen, wodurch der Spannungsabfall an diesem erhöht und die Batterie damit schneller entladen wird [81]. Weiters steigt der Energiebedarf des Fahrzeuges durch das vermehrte Heizen bei kalten Temperaturen. Da die Messungen nach Tabelle 4.4 bei Temperaturen durchgeführt wurden, bei denen im Normalfall weder beheizt, noch klimatisiert werden musste bewirkt der Anteil des Heizens bei den Messungen bei kalten Temperaturen Unterschiede.

### 4.3.2 Erhebung der Ladevorgänge

Bei dieser Erhebung geht es darum, die Ladevorgänge aller Fahrzeuge (der unterschiedlichen Modelle) im Fuhrpark aufzuzeichnen, um auf den gemessenen Werten aufbauende Analysen durchführen zu können. Wie auch schon bei der Fahrt werden aus den gemessenen Daten durchschnittliche Werte ermittelt. Es ist dabei sinnvoll, durchschnittliche Werte für Ladepunkte mit einer bestimmten Ladeleistung zu ermitteln. Die betrachteten Ladeleistungen sind hierbei 3,7 kW, 11 kW und 150 kW (Schnellladestation).

Die Ladevorgänge werden wie die Fahrten in Form von Sessions aufgezeichnet. Bei der Auswertung der Sessions werden die Start- und Endzeit des Ladevorganges, die Ladedauer, und der SOC-Wert (in Prozent) bei Beginn und Ende des Ladens dokumentiert. Aus diesen kann die zeitliche SOC-Steigerung beim Laden in der Einheit %/min angegeben werden. Wie schon in Abschnitt 4.3.1 beschrieben können die SOC-Steigerung für die einzelnen Modelle durch Umrechnung auch in der Einheit kWh/min angegeben werden. Weiters werden die Ladeströme und Ladespannungen dokumentiert und in weiterer Folge daraus die Ladeleistungen errechnet. Mit dem Aviloo-Messsystem ist es möglich, die Ladespannung und den Ladestrom direkt an der Batterie zu messen, wodurch die real vorhandene Ladeleistung aus dem Produkt dieser beiden Größen berechnet werden kann.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, lädt keines der Fahrzeuge den gesamten Ladevorgang lang mit einem konstanten Strom oder einer konstanten Spannung. Der BMW i3 nutzt dabei das CCCV-Ladeverfahren, bei dem der Strom gegen Ende des Ladevorganges proportional mit  $1/t$  verringert wird. Beim VW e-Golf liegt MSCC-Laden vor, wobei der Strom bei diesem Ladeverfahren stufenartig gesenkt wird. Die Ladespannung steigt bei beiden Ladeverfahren im Bereich von 300 V bis maximal 400 V an. Daraus folgt die Erkenntnis, dass die maximale Ladespannung und der maximale Ladestrom bei den vorhandenen Ladeverfahren nie gleichzeitig auftreten - der Strom ist zu Beginn des Ladevorganges am größten und die Spannung gegen Ende des Ladevorganges. Durch das CCCV-Ladeverfahren ist die Leistung beim BMW i3 gegen Ende des Ladens deutlich niedriger als zu Beginn. Die Spannung wird gegen Ende des Ladevorganges konstant gehalten.

Aus den gemessenen Sessions in der betrachteten Aufzeichnungsperiode werden die Ladeleistungen als 15-minütige Mittelwerte dokumentiert. Diese Mittelwerte dienen als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Leistungs- und Energiewerte.

Mit all diesen dokumentierten und berechneten durchschnittlichen Werten der Parameter ist es möglich, weitere Untersuchungen bezüglich der Ladevorgänge durchzuführen. Im Laufe dieses Abschnitts werden die erhobenen Daten beschrieben und analysiert.

## Ladeleistung

Für die Erhebung der Ladeleistung werden die Leistungen mit denen die Fahrzeuge geladen werden als 15-minütige Mittelwerte dokumentiert. In weiterer Folge muss zwischen den Ladepunkten mit unterschiedlicher Ladeleistung unterschieden werden, da nur Ladepunkte mit gleicher Ladeleistung sinnvoll miteinander verglichen werden können. Es wird dabei zwischen Ladepunkten mit 3,7 kW, 11 kW und 150 kW unterschieden. In Abbildung 3.4 ist ersichtlich, an welchen Ladesäulen sich die entsprechenden Ladepunkte befinden. Für die Ladepunkte entsprechender Leistung werden die mittlere Ladeleistung und die maximal gemessene Ladeleistung bestimmt. Die Fahrzeugmodelle werden wie schon bei der Betrachtung der Fahrten in Abschnitt 4.3.1 sowohl gemeinsam, als auch separat betrachtet. Vor allem an den 11 kW Ladepunkten kommt es hierbei zu Unterschieden, da der BMW i3 dreiphasig und der VW e-Golf nur zweiphasig (mit geringerer Ladeleistung) laden kann (siehe Abschnitt 4.2.7).

In Tabelle 4.5 sind die Durchschnitts- und Maximalwerte der Ladeleistungen an den 3,7 kW-Ladepunkten ersichtlich.

Tabelle 4.5: Ladeleistung 3,7 kW Ladepunkt

3,7 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Leistung</b>	3,12 kW	3,13 kW	3,06 kW
<b>Maximale Leistung</b>	3,40 kW	3,30 kW	3,40 kW

In dieser Tabelle ist erkennbar, dass die mittlere Ladeleistung sowohl bei beiden Fahrzeugen, als auch gesamt niedriger als die Nennleistung von 3,7 kW ist. Durchschnittlich ergeben sich Leistungsminderungen gegenüber der Nennleistung von 580 W (für den Mittelwert aller Ladevorgänge an den 3,7 kW Ladepunkten). Aus Sicht der maximalen Ladeleistung betragen diese Verluste gegenüber Nennleistung nur noch 300 W.

Der Auslastungsgrad (bezogen auf die Nennleistung des Ladepunktes) beträgt knapp 85 % für die mittlere Ladeleistung und etwa 92 % für die maximale Leistung. Wird die mittlere Ladeleistung betrachtet, so können die verminderten Leistungswerte dadurch erklärt werden, dass beim VW e-Golf MSCC-Laden und beim BMW i3 CCCV-Laden vorliegt. Beide Ladevorgänge haben Phasen, in denen nicht die vollen Leistungen genutzt werden, um die Batterie zu schonen. Diese Phasen werden mitdokumentiert und verringern in weiterer Folge die mittlere Leistung. Verluste ergeben sich durch den Umrichter des On-Board Ladegeräts des Elektrofahrzeuges. Bei geringeren Ladeleistungen fallen die Verluste des Umrichters prozentuell höher aus (Teillastbereich) als bei höheren Ladeleistungen (Vollastbereich), da der Umrichter einen gewissen Grundverbrauch hat [82]. Moderne Umrichter haben jedoch bereits Wirkungsgrade von bis zu 94 % [83].

Weiters können Verluste dadurch auftreten, dass die Fahrzeuge nicht die maximal mögliche Ladeleistung beziehen. Dieselben Auswertungen der Ladevorgänge wie in Tabelle 4.5 werden in Tabelle 4.6 für 11 kW dargestellt.

Tabelle 4.6: Ladeleistung 11 kW Ladepunkt

11 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Leistung</b>	7,1 kW	6,5 kW	8,7 kW
<b>Maximale Leistung</b>	10,0 kW	6,7 kW	10,0 kW

Dadurch, dass der VW e-Golf AC mit maximal 7,2 kW zweiphasig laden kann ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Ladeleistungen an den 11 kW Ladepunkten zwischen den beiden Fahrzeugmodellen. Der Mittelwert der Ladeleistung ist somit auch deutlich unter der Nennleistung von 11 kW. Der VW e-Golf hat bezogen auf die Nennleistung von 7,2 kW sowohl für die mittlere als auch für die Maximalleistung einen Ausnutzungsgrad über 90 %. Beim BMW i3 wird die laut Ladepunkten mögliche Ladeleistung nur zu 79 % ausgenutzt. Dies ist durch die CV-Phasen der Ladevorgänge, in welchen die Ladeleistung deutlich unter der Nennleistung liegt, bedingt. Wird die maximale Ladeleistung des BMW i3 betrachtet, so nutzt dieser 91 % der möglichen Ladeleistung von 11 kW aus. Dieser maximale Ausnutzungsgrad ist nur geringfügig kleiner als der maximale Ausnutzungsgrad des BMW i3 am 3,7 kW Ladepunkt.

Generell ist aus den mittleren Ladeleistungen an den 11 kW Ladepunkten erkennbar, dass die Ausnutzung der möglichen Ladeleistung etwas geringer ist als an den 3,7 kW Ladepunkten. Aufgrund der höheren Anzahl an 11 kW Ladepunkten in der Garage im Vergleich zu den 3,7 kW Ladepunkten (siehe 3.4) wurden auch mehr Ladevorgänge aufgezeichnet, wodurch die mittleren Ladeleistungen für die 11 kW Ladepunkte genauer ermittelt werden konnten.

Dieselbe Aufzeichnung wird auch für die beiden Ladepunkte der Schnellladesäule durchgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl der durchgeführten Ladevorgänge an diesen Ladepunkten sind diese ermittelten Werte weniger genau. Durch die starke Auswirkung der CV-Phasen wurde auch ein Mittelwert rein für die CC-Phasen ermittelt.

Tabelle 4.7: Ladeleistung 150 kW Ladepunkt

150 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Leistung</b>	30,4 kW	32,3 kW	25,7 kW
<b>Maximale Leistung</b>	44,9 kW	39,0 kW	44,9 kW
<b>Mittlere Leistung CC</b>	39,0 kW	37,8 kW	43,3 kW

In dieser Tabelle ist erkennbar, dass die CV-Phase beim BMW i3 stärker ausgeprägt ist als beim VW e-Golf. Weiters ist die Ladeleistung beim BMW i3 zu Beginn des Ladevorganges höher. Außerdem ist ersichtlich, dass beide Fahrzeuge nicht die möglichen 150 kW Ladeleistung nutzen können, da dies von der Seite der Fahrzeuge aus nicht möglich ist. Laut Tabelle 2.2 können beide Modelle mit maximal 50 kW DC-Laden. Für den VW e-Golf ergeben sich somit maximale Ausnutzungsgrade von etwa 80 % und für den BMW i3 von 90 %. Die CC-Phase hat beim e-Golf einen Ausnutzungsgrad von 75 % und beim BMW i3 von 87 %. Werden die Ladevorgänge inklusive CV-Phasen betrachtet, so ergeben sich Ausnutzungsgrade von gesamt 61 %. Diese geringe Ausnutzung der laut Ladepunkten möglichen Ladeleistung ist ein weiteres Argument dafür, Schnelllader nur dann zu benutzen, wenn es wirklich notwendig ist, und im Alltag in erster Linie mit geringeren Ladeleistungen zu laden.

Ähnlich wie bei der Erhebung der Fahrten in Abschnitt 4.3.1 wird eine stichprobenartige Untersuchung der Veränderung der Ladeleistungen bei kalten Außentemperaturen durchgeführt. Aus den dabei ermittelten durchschnittlichen Ladeleistungen der verschiedenen Ladepunkte konnte erkannt werden, dass keine signifikanten Unterschiede gegenüber den ursprünglichen Messungen auftreten, wodurch die durchschnittliche Ladeleistung der Ladevorgänge im Fuhrpark unabhängig von der Außentemperatur ist. Das ist dadurch bedingt, dass die Fahrzeuge in der beheizten Garage geladen werden, und in der Regel direkt nach einer Fahrt angesteckt werden, wodurch die Batterie noch auf Betriebstemperatur ist.

Aus dem vernachlässigbaren Einfluss der Außentemperatur auf die mittlere Ladeleistung kann auf den vernachlässigbaren Einfluss auf die weiteren Parameter des Ladevorganges geschlossen werden. Diese Annahme konnte ebenfalls durch stichprobenartige Kontrolle bestätigt werden, weswegen die Untersuchung der weiteren Parameter bei niedrigeren Temperaturen in den folgenden Abschnitten nicht weiter beschrieben wird.

#### **Ladedauer**

Die Ladedauer wird für jede der aufgezeichneten Sessions dokumentiert. Aus diesen Aufzeichnungen kann die mittlere Ladedauer für alle Fahrzeugmodelle an den Ladepunkten mit unterschiedlicher Leistung ermittelt werden. Das Unterscheiden zwischen den Fahrzeugmodellen ist vor allem an den 11 kW Ladepunkten wichtig, da bei diesen der VW e-Golf zweiphasig und der BMW i3 dreiphasig lädt. Um zu analysieren, wie lange die Fahrzeuge maximal laden wird auch die maximale Ladedauer dokumentiert. Weiters wird die minimale Ladedauer angegeben. Tabelle 4.8 zeigt die Ladedauer an den 3,7 kW Ladepunkten. Die mittlere Ladedauer ist mit mehr als 4 Stunden relativ lang, was auch an der geringen Ladeleistung liegt.

Tabelle 4.8: Ladedauer 3,7 kW

3,7 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Ladedauer</b>	260 min	281 min	214 min
<b>Maximale Ladedauer</b>	470 min	450 min	470 min
<b>Minimale Ladedauer</b>	66 min	90 min	66 min

Es kommt bei vollständigen Ladevorgängen vor, dass das Fahrzeug bis zu knapp 8 Stunden lang geladen wird. Kurze Ladevorgänge kommen bei den 3,7 kW Ladepunkten nicht vor, was dadurch erkennbar ist, dass die minimale Ladezeit knapp über eine Stunde beträgt. Dieselbe Aufzeichnung wird für die 11 kW-Ladepunkte durchgeführt.

Tabelle 4.9: Ladedauer 11 kW

11 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Ladedauer</b>	110 min	124 min	83 min
<b>Maximale Ladedauer</b>	260 min	260 min	165 min
<b>Minimale Ladedauer</b>	10 min	15 min	10 min

Diese Tabelle zeigt, dass die Ladezeiten bei höheren Leistungen deutlich kürzer sind. Weiters folgt die Erkenntnis, dass der BMW i3 mit einer höheren Ladeleistung an 11 kW Ladepunkte laden kann als der VW e-Golf, was sich in den kürzeren Ladezeiten widerspiegelt. Im Gegensatz zu den 3,7 kW Ladepunkten kommen auch sehr kurze Ladevorgänge über wenige Minuten vor.

Tabelle 4.10 zeigt dieselben Werte für die Schnellladepunkte. Durch die wenigen aufgezeichneten Ladevorgänge an diesen Punkten sind die Ergebnisse wieder weniger (statistisch) genau und kritischer zu betrachten.

Tabelle 4.10: Ladedauer 150 kW

150 kW Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>Mittlere Ladedauer</b>	33 min	29 min	55 min
<b>Maximale Ladedauer</b>	55 min	50 min	55 min
<b>Minimale Ladedauer</b>	10 min	10 min	55 min

An der Gleichheit des Mittelwertes, des Maximalwertes und des Minimalwertes beim BMW i3 ist erkennbar, dass nur ein Ladevorgang aufgezeichnet wurde, welcher 55 Minuten gedauert hatte. Auch beim VW e-Golf wurden nur fünf Sessions aufgezeichnet, weswegen der Mittelwert sehr stark von den Extremwerten abhängig ist. Die Datenerhebung sollte

somit mehr als Momentaufnahme betrachtet werden. Trotzdem sind die Ladezeiten bei diesen Leistungen deutlich geringer, als bei niedrigeren Ladeleistungen.

Aus den vorherigen drei Tabellen kann noch ein Gesamtmittelwert der Ladedauern ermittelt werden. Dieser beträgt für beide Fahrzeuge gemeinsam 155 min. Für den VW e-Golf alleine beträgt der Mittelwert 172 min. Im Vergleich dazu hat der BMW i3 eine mittlere Ladedauer von 117 min. Diese ist vor allem durch die höhere Ladeleistung an den 11 kW Ladepunkten kürzer als beim VW e-Golf.

## Ladeenergie

Aus den beiden mittleren Größen Ladeleistung  $P_{Lade,mittel}$  und Ladedauer  $t_{Lade,mittel}$  kann die mittlere Ladeenergie  $E_{Lade,mittel}$  berechnet werden.

$$E_{Lade,mittel} = P_{Lade,mittel} \cdot t_{Lade,mittel} \quad (4.3)$$

Diese Berechnung wurde für alle Ladepunkte durchgeführt und in Tabelle 4.11 angegeben.

Tabelle 4.11: Mittlere Ladeenergien

Ladepunkt	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
3,7 kW	13,42 kWh	14,62 kWh	10,96 kWh
11 kW	13,00 kWh	13,65 kWh	12,18 kWh
150 kW	16,72 kWh	15,46 kWh	23,60 kWh

In der Tabelle ist ersichtlich, dass bis auf die Ausnahme beim BMW i3 die Ladeenergien an den 11 kW-Ladepunkten am geringsten sind. Bei den 3,7 kW Ladepunkten ist zwar die Ladeleistung geringer, dafür aber die Ladezeit höher - bei den 150 kW Ladepunkten ist das ganze umgekehrt. Für die 11 kW Ladepunkte ergibt sich damit das minimale Produkt der beiden Größen. Beim BMW i3 ist die mittlere Ladedauer an den 3,7 kW-Ladepunkten stark von einer Session mit 66 min Ladedauer abhängig. Wird dieser Wert bei der Ermittlung der durchschnittlichen Ladeenergien nicht berücksichtigt, so ist auch die Ladeenergie beim BMW i3 an 11 kW Ladepunkten am geringsten. Das bedeutet, dass in einer Ladesession an 11 kW-Ladepunkten im Mittel am wenigsten geladen wird. An den Schnellladesäulen wird pro Session am meisten Energie geladen. Zusätzlich sind die Installationskosten durch die notwendige Kühlung, die Notwendigkeit eines stationären Umrichters und durch die höhere notwendige thermische Belastbarkeit der Kabel höher als bei Ladesäulen niedrigerer Leistung.

Zusammengefasst kann darauf geschlossen werden, dass Ladesäulen mit 11 kW Ladepunkten durch die Ladedauer von wenigen Stunden und dem laut [37] geringeren Installationsaufwand (im Vergleich zu Ladesäulen mit höherer Ladeleistung) bevorzugt verwendet werden sollten. Schnellladen ist im Allgemeinen am teuersten, weswegen erneut die Erkenntnis gewonnen wurde, dass diese nur dann verwendet werden sollten, wenn es zwingend notwendig ist.

### SOC-Werte Laden

Bei der Durchführung der Datenerhebung werden die SOC-Werte aufgezeichnet, bei denen ein Ladevorgang begonnen wird und bei denen ein Ladevorgang beendet wird. Es werden dabei die mittleren Werte und die Extremwerte aufgezeichnet. Die Extremwerte sollen zeigen, wie weit die Fahrzeuge maximal leergefahren werden und ob es SOC-Werte gibt, bei denen ein Anstecken des Fahrzeuges noch nicht notwendig wäre. Bei der Betrachtung der SOC-Werte am Ende des Ladevorganges geht es darum zu überprüfen, ob Ladevorgänge vorzeitig beendet werden. Tabelle 4.12 zeigt die SOC-Werte zu Beginn der Ladevorgänge.

Tabelle 4.12: SOC-Werte Beginn Ladevorgang

Beginn Ladevorgang	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
<b>SOC mittel</b>	54 %	51 %	59 %
<b>SOC max</b>	92 %	92 %	87 %
<b>SOC min</b>	10 %	10 %	22 %

In Tabelle 4.12 ist erkennbar, dass die Batterie durchschnittlich während der Fahrten bis etwa zur Hälfte entladen wird. Vereinzelt wird die Batterie bis auf 10 % entladen. Da dies dem realen SOC entspricht betrug der SOC, der dem Fahrer angezeigt wurde, in etwa 5 %, wodurch bei solchen Werten schon von leerfahren eines Fahrzeuges gesprochen werden kann. Weiters ist in der Tabelle ersichtlich, dass die Fahrzeuge bei fast vollem Batterieladezustand auch angesteckt werden. Gespräche mit der Partnerfirma Aviloo, welche auch Batteriediagnose Tests durchführen, haben gezeigt, dass Elektroautos nicht permanent angesteckt werden sollten, da dies die Lebensdauer der Batterie verringert. Ein Anstecken bei derart hohen SOC-Werten verringert die Lebensdauer der Batterie [84]. Da es logistisch nicht möglich ist, im Fuhrpark anders vorzugehen, muss diese Lebensdauererhöhung in Kauf genommen werden. Tabelle 4.13 zeigt die SOC-Werte bei Beenden des Ladens.

Im Mittel werden die Fahrzeuge bis zu einem SOC von über 90 % aufgeladen. Die maximalen SOC-Werte entsprechen einer kompletten Vollladung. Beim VW e-Golf kommt es zu kurzen Ladevorgängen während einer längeren Ausfahrt, was das Beenden des Ladens mit einem SOC von 32 % erklärt.

Tabelle 4.13: SOC-Werte Ende Ladevorgang

Beginn Ladevorgang	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
SOC mittel	91 %	90 %	92 %
SOC max	96 %	96 %	95 %
SOC min	32 %	32 %	89 %

Generell kann aus den Aufzeichnungen erkannt werden, dass 87,5 % der Ladevorgänge vollständige Ladevorgänge bis zur Vollladung sind.

### Ladegeschwindigkeit

Ähnlich zum durchschnittlichen SOC-Verbrauch in Abschnitt 4.3.1 werden für die Ladevorgänge die durchschnittlichen Ladegeschwindigkeiten  $c_{Lade}$  in %/min dokumentiert. Diese errechnen sich mit folgender Gleichung:

$$c_{Lade}/(\%/min) = \frac{SOC_{Ladeende}/\% - SOC_{Ladebeginn}/\%}{\Delta t} \quad (4.4)$$

Wobei hier  $\Delta t$  die Dauer des Ladevorganges in Minuten beschreibt. Die durchschnittlichen Ladegeschwindigkeiten, die maximalen Ladegeschwindigkeiten und die minimalen Ladegeschwindigkeiten sind in Tabelle 4.14 dokumentiert.

Tabelle 4.14: Ladegeschwindigkeiten in %/min

Ladegeschwindigkeit	Gesamt	VW e-Golf	BMW i3
3,7 kW mittel	0,15 %/min	0,15 %/min	0,14 %/min
3,7 kW max	0,19 %/min	0,19 %/min	0,18 %/min
3,7 kW min	0,10 %/min	0,12 %/min	0,10 %/min
11 kW mittel	0,33 %/min	0,29 %/min	0,40 %/min
11 kW max	0,43 %/min	0,36 %/min	0,43 %/min
11 kW min	0,22 %/min	0,22 %/min	0,36 %/min
150 kW mittel	1,52 %/min	1,57 %/min	1,27 %/min
150 kW max	1,70 %/min	1,70 %/min	1,27 %/min
150 kW min	1,27 %/min	1,47 %/min	1,27 %/min

Die Ladegeschwindigkeiten können äquivalent zu Gleichung 4.2 von der Einheit %/min in die Einheit kWh/h umgerechnet werden. Die Einheit kWh/h wird bewusst nicht zur Einheit kW gekürzt, da die Ladegeschwindigkeit angeben soll, welche Menge der Batteriekapazität

in kWh pro Stunde geladen wird. Im Gegensatz zum durchschnittlichen SOC-Verbrauch wird die Einheit nicht pro Minute sondern pro Stunde angegeben, da die SOC-Steigerung geringer ist als die SOC-Verringerung, und der Wertebereich damit ansehnlicher in der Einheit kWh/h ist.

$$c_{Lade}/(\text{kWh/h}) = \frac{c_{Lade}/(\%/min) \cdot 60\text{min/h}}{100\%} \cdot C_{Batterie}/(\text{kWh}) \quad (4.5)$$

Wird für die Batteriekapazität des VW e-Golfs 33,2 kWh und für den BMW i3 35,8 kWh eingesetzt, so ergibt sich Tabelle 4.15. Die durchschnittliche Ladegeschwindigkeit beider Fahrzeuge gemeinsam wird aufgrund der unterschiedlichen Batteriekapazitäten nicht angegeben.

Tabelle 4.15: Ladegeschwindigkeiten in kWh/h

Ladegeschwindigkeit	VW e-Golf	BMW i3
3,7 kW mittel	3,00 kWh/h	3,00 kWh/h
3,7 kW max	3,78 kWh/h	3,87 kWh/h
3,7 kW min	2,39 kWh/h	2,15 kWh/h
11 kW mittel	5,78 kWh/h	8,59 kWh/h
11 kW max	7,17 kWh/h	9,24 kWh/h
11 kW min	4,38 kWh/h	7,73 kWh/h
150 kW mittel	31,27 kWh/h	27,27 kWh/h
150 kW max	33,86 kWh/h	27,27 kWh/h
150 kW min	29,28 kWh/h	27,27 kWh/h

Bei Ladevorgängen an den 3,7 kW Ladepunkten ist die mittlere Ladegeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge gleich, bei Ladevorgängen an 11 kW Ladepunkten ist die mittlere Ladegeschwindigkeit des BMW i3 aufgrund der höheren Ladeleistung an diesen Ladepunkten höher als beim VW e-Golf. An den 150 kW Ladepunkten gibt es im aufgezeichneten Intervall nur einen Ladevorgang eines BMW i3, wodurch die mittlere, die maximale und die minimale Ladegeschwindigkeit gleich sind. Generell ist in der Tabelle erkennbar, dass die mittlere Ladegeschwindigkeit beim BMW i3 bei dieser Ladeleistung geringer ist als beim VW e-Golf. Nachdem die Ladegeschwindigkeit anhand kompletter Sessions ausgewertet wird, ist dieser Unterschied durch die längere CV-Phase des BMW i3 mit geringerer Ladeleistung bedingt. Bei allen Ladeleistungen fällt auf, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen minimaler und maximaler Ladegeschwindigkeit gibt. Dadurch, dass bei keinem Ladevorgang durchgehend mit konstantem Strom (und mit konstanter Leistung) geladen wird, kommen diese Abweichungen dadurch zustande, dass die Ladevorgänge mit unterschiedlichen SOC-Werten der Batterie gestartet werden. Eine Session, die mit hohen

SOC-Werten gestartet wird, wird damit in erster Linie durch die CV-Phase mit niedrigerer Leistung bestimmt, und die Ladegeschwindigkeit solch einer Session ist dadurch geringer.

### Vollladezeiten

Aus den mittleren Ladegeschwindigkeiten kann weiters berechnet werden, wie lange es durchschnittlich dauert, bis ein komplett leergefahrenes Fahrzeug vollgeladen ist. Diese durchschnittlichen Vollladezeiten sind unterschiedlich zu den durchschnittlichen Ladezeiten in den Tabellen 4.8, 4.9 und 4.10, da in letzteren auch Ladevorgänge berücksichtigt werden, die keine vollständigen Ladevorgänge (von theoretisch 0 % bis 100 % SOC) waren. Folgende Formel kann zur Berechnung der mittleren Vollladedauern verwendet werden:

$$t_{Vollladung,mittel} = \frac{C_{Batterie}}{c_{Lade,mittel}} \quad (4.6)$$

Für  $C_{Batterie}$  wird die Nennkapazität der Batterie des jeweiligen Fahrzeuges eingesetzt, da ein Vollladevorgang betrachtet wird. Wichtig ist sich vor Augen zu halten, dass es sich bei der Berechnung um eine Näherung handelt, da die Nennkapazitäten der Batterie anstatt der realen Kapazitäten verwendet werden, und da bei der Ermittlung der durchschnittlichen Ladegeschwindigkeit ( $c_{Lade,mittel}$ ) nicht nur Vollladungen berücksichtigt werden. Tabelle 4.16 zeigt die Vollladezeiten für die beiden Fahrzeugmodelle an den betrachteten Ladepunkten.

Tabelle 4.16: Vollladezeiten

Leistung	VW e-Golf	BMW i3
3,7 kW	11,10 h	11,9 h
11 kW	5,75 h	4,17 h
150 kW	1,1 h	1,3 h

In dieser Tabelle ist der große Nachteil der 3,7 kW Ladepunkte ersichtlich. Vollladevorgänge dauern über 10 h. Im öffentlichen Bereich sind diese für vollständige Ladevorgänge vollkommen ungeeignet. Im Privatbereich kann die Ladezeit von über 10 Stunden durchaus erbracht werden, wenn zusätzlich noch berücksichtigt wird, dass die Fahrzeuge nicht komplett leergefahren werden. In den vorherigen Abschnitten wurden einige Nachteile der Schnellladestationen verdeutlicht. Der große Vorteil dieser ist in Tabelle 4.16 mit den Vollladezeiten von knapp über einer Stunde ersichtlich. Als guter Mittelweg stellen sich die Ladesäulen mit 11 kW Ladeleistung heraus, welche vor allem für den Privatbereich ausreichend kurze Ladezeiten bieten. Auch im öffentlichen Bereich sind diese gut geeignet, da die Reichweite durch kürzere Ladevorgänge (von z.B. 1 h-2 h) wieder deutlich erhöht werden kann.

Es bietet sich an, diese Ladeleistung auf Parkplätzen von Firmen oder Einkaufszentren zu installieren, während Schnellladestationen primär auf Autobahnen sinnvoll sind. Zusammenfassend soll Abschnitt 4.3.2 zeigen, dass einzelne Ladeleistungen Vor- und Nachteile haben, und die zu installierende Leistung je nach Bedarfsfall gewählt werden sollte.

### 4.3.3 Erhebung der Gleichzeitigkeiten

Die Erhebung der Gleichzeitigkeiten erfolgt für die Ladevorgänge. Dazu werden die Datenerhebungen aus den letzten Abschnitten herangezogen. Ziel der Erhebung der Gleichzeitigkeiten ist es, Gleichzeitigkeitsfaktoren und Gleichzeitigkeitskurven für die Ladevorgänge der Fahrzeuge zu ermitteln.

#### Definition der Gleichzeitigkeit

Um Gleichzeitigkeiten zu untersuchen muss zuerst eine Definition dieses Begriffes getroffen werden. In der Literatur gibt es viele verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Gleichzeitigkeiten. Um bei den verschiedenen Projekten von Netz Niederösterreich konsistent vorzugehen wird die gleiche Definition wie beim „Feldversuch Echsenbach“ verwendet. Dazu wird der Projektbericht aus [85] verwendet. Grundsätzlich wird mit Gleichzeitigkeitsfaktoren ausgedrückt, dass nie die gesamte installierte Leistung in einem Netz (oder Teilabschnitt eines Netzes) gleichzeitig bezogen wird. Vor allem bei einer großen Anzahl an Geräten wird davon ausgegangen, dass diese nicht permanent gleichzeitig in Betrieb sind, und auch nicht alle die maximal mögliche Leistung (sowohl Nennleistung des Geräts als auch installierte Leistung des Netzes) beziehen [86]. In Gleichzeitigkeitskurven wird der Gleichzeitigkeitsfaktor in Abhängigkeit der installierten Einheiten (Geräte, Wohneinheiten, Fahrzeuge, etc.) als Funktion graphisch dargestellt. Abbildung 4.28 zeigt ein Beispiel für Gleichzeitigkeitskurven von Wohneinheiten.

Gleichzeitigkeitsfaktoren für Elektromobilität sind in der Regel höher als Gleichzeitigkeitsfaktoren von Wohneinheiten, da viele der Ladevorgänge gleichzeitig stattfinden (z.B. am Abend nach der Arbeit). Im Fuhrpark sind die Ladevorgänge davon abhängig, wann die Mitarbeiter von Außenterminen zurückkommen. Es gilt die Vorschrift, das Fahrzeug nach Beenden der Fahrt am Dienst-Standort anzustecken. Die Gleichzeitigkeitskurven des Fuhrparks müssen anhand der Aufzeichnungen der Ladevorgänge berechnet werden.

#### Berechnung der Gleichzeitigkeiten

Zu Beginn muss eine Anzahl  $n$  an Ladesäulen gewählt werden. Dies ist die Anzahl der betrachteten Ladestationen. Im Feldversuch Echsenbach werden hierbei nicht alle verfügbaren Ladesäulen ausgewählt, sondern nur ein vorhin festgelegter Anteil, wobei die

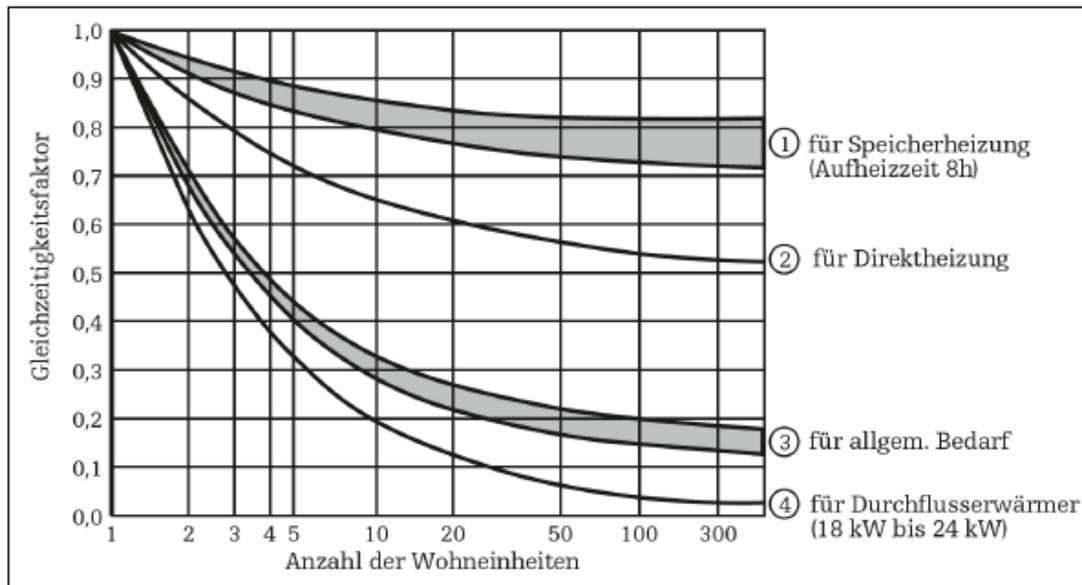


Abbildung 4.28: Gleichzeitigkeitskurven Wohneinheiten [87]

Auswahl der Ladesäulen per Zufallsprinzip erfolgt [85]. In der durchgeführten Untersuchung werden die Gleichzeitigkeiten aus der Sicht der Ladevorgänge der Fahrzeuge an den Ladepunkten mit unterschiedlicher Leistung berechnet, da es nicht möglich ist, jede Ladesäule einzeln zu messen, ohne Ladevorgänge geplant durchzuführen. Eine geplante Durchführung widerspricht wiederum der Idee der Gleichzeitigkeiten. Da eine Messung der Ladevorgänge direkt an den Fahrzeugen möglich ist werden diese als Referenz herangezogen. Die Größe  $n$  beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge (nicht die Anzahl der Ladesäulen). Wichtig ist, nur Ladevorgänge miteinander zu vergleichen, welche an Ladepunkten mit derselben Nennleistung durchgeführt wurden.

Im nächsten Schritt werden die Wirkleistungswerte der gewählten Fahrzeuge zu verschiedenen Zeitpunkten  $t_i$  aufsummiert, was mit folgender Formel beschrieben werden kann.

$$P_{ges}(t_i) = \sum_{j=1}^n P_j(t_i) \quad (4.7)$$

Der Index  $j$  steht hierbei für das jeweils betrachtete Fahrzeug. Nachdem die Summe zu allen betrachteten Zeitpunkten ermittelt wurde muss die maximal errechnete Leistung gesucht werden.

$$P_{ges}(t_i)_{max} = \max\left(\sum_{j=1}^n P_j(t_i)\right) \quad (4.8)$$

Für die weitere Berechnung ist es notwendig, die maximale Leistung über alle Zeitpunkte  $t_m$  der  $n$  Fahrzeuge zu ermitteln.

$$P_{max,j} = \max(P_j(t_m)) \quad (4.9)$$

Aus diesen maximalen Einzelleistungen muss die Gesamtleistung über die Summe der Einzelleistungen gebildet werden.

$$P_{max,ges}(t_m) = \sum_{j=1}^n P_{max,j} \quad (4.10)$$

Mit all diesen Vorkehrungen ist es möglich, den Begriff Gleichzeitigkeit von  $n$  Fahrzeugen ( $GLZ_n$ ) zu definieren.

$$GLZ_n(t_m) = \frac{P_{ges}(t_i)_{max}}{P_{max,ges}(t_m)} \quad (4.11)$$

In Worten bedeutet diese Formel, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor der Quotient aus dem Maximalwert der Gesamtleistung aller Ladevorgänge der Fahrzeuge aus allen betrachteten Zeitpunkten mit einer bestimmten Nennleistung eines Ladepunktes und der Summe der maximalen Einzelleistungen der Ladevorgänge (an den jeweiligen Ladepunkten), welche im betrachteten Zeitraum auftraten ist. Bei vielen Betrachtungen wird als Divisor die Summe der Nennleistungen der einzelnen Ladepunkte genommen. Da Netz Niederösterreich im Zuge des Feldversuches Echsenbach von dieser Definition Abstand genommen hat wird auch im Zuge dieses Projekts auf diese Definition verzichtet. Je nach Anzahl der betrachteten Fahrzeuge  $n$  ergeben sich unterschiedliche Gleichzeitigkeitsfaktoren.

### Vorgehensweise

Für die Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren werden alle Ladeleistungen der Ladevorgänge aller 11 Fahrzeuge (7 VW e-Golf, 4 BMW i3) des betrachteten Zeitintervalls dokumentiert, wobei die Ladeleistungen durch Mittelwertbildung über einen Zeitraum von 15 Minuten zusammengefasst werden. Die Ladepunkte mit unterschiedlicher Nennleistung (3,7 kW, 11 kW und 150 kW) werden dabei getrennt voneinander betrachtet. Aus allen dokumentierten Ladeleistungen werden die Maximalleistungen pro Fahrzeug und Ladeleistung (in Summe 11 mal 3 = 33 Leistungen) ermittelt. Im betrachteten Intervall werden nicht für alle Fahrzeuge Ladevorgänge an allen Ladepunkten mit verschiedener Nennleistung durchgeführt (was in erster Linie an der Schnellladestation der Fall war).

Für die Berechnung der Gleichzeitigkeiten müssen diese trotzdem mit einer Leistung von 0 kW berücksichtigt werden.

Weiters wird die Summe der Ladeleistungen pro Ladepunkt mit entsprechender Leistung zu jedem Zeitpunkt ermittelt und daraus die maximale Summe pro Ladepunkt (3 Summenleistungen) ermittelt. Mit diesen ermittelten Daten können mit Gleichung 4.11 die Gleichzeitigkeitsfaktoren berechnet werden. Tabelle 4.17 zeigt die dokumentierten Maximalleistungen der Fahrzeuge an den verschiedenen Ladepunkten, die Summe dieser Maximalleistungen, die maximal aufgetretene Summenleistung und daraus die berechneten Gleichzeitigkeitsfaktoren.

Tabelle 4.17: Berechnung der Gleichzeitigkeitsfaktoren

Parameter/Leistung Ladepunkt	3,7 kW	11 kW	150 kW
<b>eGolf 1</b>	3,3 kW	6,6 kW	0 kW
<b>eGolf 2</b>	3,2 kW	6,6 kW	37,7 kW
<b>eGolf 3</b>	0 kW	6,6 kW	0 kW
<b>eGolf 4</b>	3,3 kW	6,7 kW	38,2 kW
<b>eGolf 5</b>	3,3 kW	6,6 kW	39 kW
<b>eGolf 6</b>	3,2 kW	6,5 kW	0 kW
<b>eGolf 7</b>	3,2 kW	6,5 kW	0 kW
<b>BMW i3 1</b>	3,4 kW	9,9 kW	44,9 kW
<b>BMW i3 2</b>	0 kW	10 kW	0 kW
<b>BMW i3 3</b>	3,3 kW	9,6 kW	0 kW
<b>BMW i3 4</b>	0 kW	10 kW	0 kW
<b>Summe max. Leistungen</b>	26,2 kW	85,5 kW	160 kW
<b>max. Summenleistung</b>	6,5 kW	32,4 kW	44,9 kW
<b>GLZ</b>	0,25	0,38	0,28

Der Gleichzeitigkeitsfaktor der 11 kW Ladepunkte ist höher als der Gleichzeitigkeitsfaktor der 3,7 kW Ladepunkte. Das kommt daher, dass es laut Abbildung 3.4 mehr 11 kW Ladepunkte als 3,7 kW Ladepunkte gibt, und somit die maximale Summe der Ladevorgänge an den 11 kW Ladepunkten höher ist als die an den 3,7 kW Ladepunkten, da dadurch auch mehr Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden können. Aufgrund der geringen Anzahl (zwei) der 150 kW Ladepunkte ist der ermittelte Wert nur ein theoretischer Wert, der sich laut Definition nach Gleichung 4.11 ergibt, und er kann nicht für weitere Untersuchungen herangezogen werden. Es können trivial gesehen entweder eines, zwei oder gar kein Fahrzeug gleichzeitig an den 150 kW Ladepunkten laden. Für weitere Dimensionierungen aus der Sicht

des Verteilnetzes sollte somit bei diesen Ladepunkten vom Extremfall zweier gleichzeitiger Ladevorgänge ausgegangen werden.

### Gleichzeitigkeitskurven

Um die Betrachtung der Gleichzeitigkeiten abzuschließen werden noch die Gleichzeitigkeitskurven dargestellt. In [85] wurde zur Ermittlung der Kurven mit der Wahrscheinlichkeitstheorie gearbeitet, indem zufällig ausgewählte Ladesäulen herangezogen wurden. Im Rahmen des Projekts „Lademanagement Fuhrpark“ werden die Kurven anhand einer Näherungsformel [88] beschrieben.

$$GLZ(n) = GLZ_{\infty} + (1 - GLZ_{\infty}) \cdot n^{(-3/4)} \quad (4.12)$$

In Tabelle 4.17 wurden die Gleichzeitigkeitsfaktoren für 11 Fahrzeuge ermittelt. Aus diesen können durch Einsetzen von  $n=11$  und den ermittelten Werte von  $GLZ(11)$  durch Umformen von Gleichung 4.12 die Gleichzeitigkeiten für  $n$  gegen Unendlich ermittelt werden. Danach können die Gleichzeitigkeitsfaktoren für jede beliebige Anzahl  $n$  berechnet werden. Aus den berechneten Faktoren können die Gleichzeitigkeitskurven dargestellt werden.

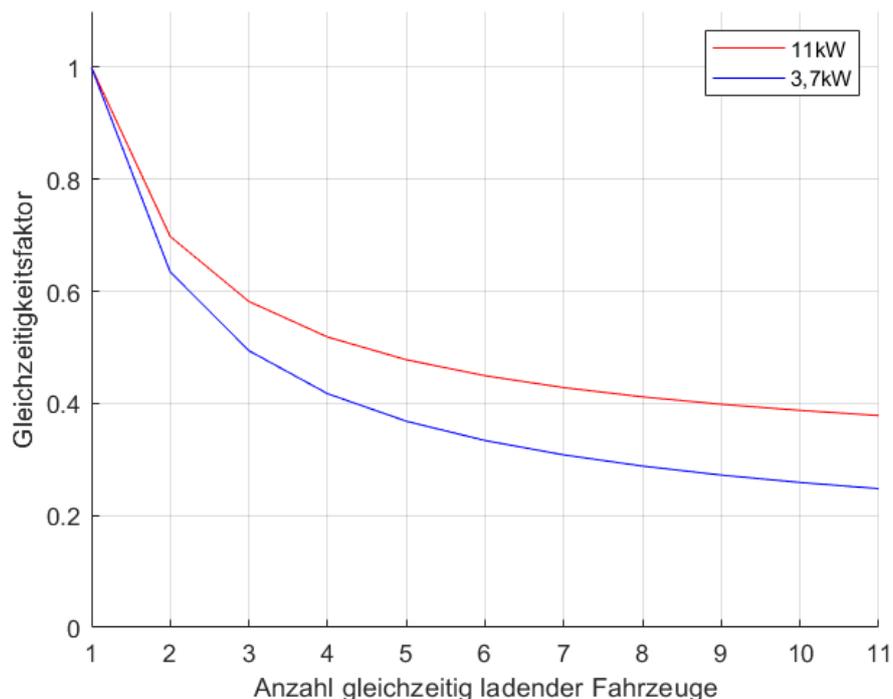


Abbildung 4.29: Gleichzeitigkeitskurven Fuhrpark

Wie bereits angemerkt sind die Gleichzeitigkeiten für die 3,7 kW Ladepunkte geringer, da weniger Ladepunkte (7) vorhanden sind, als 11 kW Ladepunkte (13). Der Fall, dass

alle 11 Fahrzeuge gleichzeitig an 3,7 kW Ladepunkten geladen werden ist somit ein rein theoretischer Fall und in der Praxis nicht möglich. Bezüglich der 13 11 kW Ladepunkte ist es durchaus theoretisch möglich, dass alle 11 Fahrzeuge gleichzeitig an diesen laden. In der Praxis wird dieser Fall mit hoher Wahrscheinlichkeit selten bis nie auftreten, was durch die Gleichzeitigkeitsfaktoren beschrieben wird. Wären gleich viele Ladepunkte beider Leistungen vorhanden, so wären die Gleichzeitigkeitsfaktoren der 3,7 kW Ladepunkte aufgrund der längeren Ladezeiten höher als die der 11 kW Ladepunkte [6]. Da bei der Datenerhebung der Ladevorgänge öfter an den 11 kW Ladepunkten geladen wurde ist dieses Verhalten im Fuhrpark von Netz Niederösterreich nicht gegeben.

Auch die ermittelten Gleichzeitigkeiten dienen als ergänzende Basis für weitere Analysen.

## 4.4 Messung der Abgänge

In diesem Abschnitt wird die Erhebung der Ladevorgänge aus der Sicht des Netzes beschrieben. Es wird dabei auf die wichtigsten Erkenntnisse bezüglich Ladeströmen, Ladeleistungen (Wirk- und Blindleistung) und Oberschwingungen der Ladevorgänge mit unterschiedlicher Ladeleistung eingegangen. Weiters wird überprüft, ob die nach EN 50160 und EN 61000 vorgegebenen Grenzwerte eingehalten werden.

Die Messungen werden mit dem Siemens Messsystem nach Abschnitt 3.1 und dem Power Quality Messgerät der Firma Haag (Modell Combi Quant), welches in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde, durchgeführt. Die hierbei aufgenommenen Ladevorgänge werden mit Matlab weiterverarbeitet und graphisch dargestellt. Eine Datenarchivierung in Datalab erfolgt ebenfalls.

Die hierbei aufgenommenen Messwerte dienen als Basis für die Auswirkungen der Ladevorgänge auf das Verteilnetz. In den folgenden Unterpunkten wird auf die Spannungsqualität, sowie auf die verschiedenen aufgenommenen Ladevorgänge eingegangen.

### 4.4.1 Spannung der Abgänge

Die Spannung wird über einen Zeitraum von einer Woche direkt an der Niederspannungsseite des Transformators gemessen. Ziel dieser Messung ist es, Aussagen über die Spannungsqualität und etwaige Netzurückwirkungen durch Ladevorgänge treffen zu können. Abbildung 4.30 zeigt die Verläufe der drei Phasenspannungen.

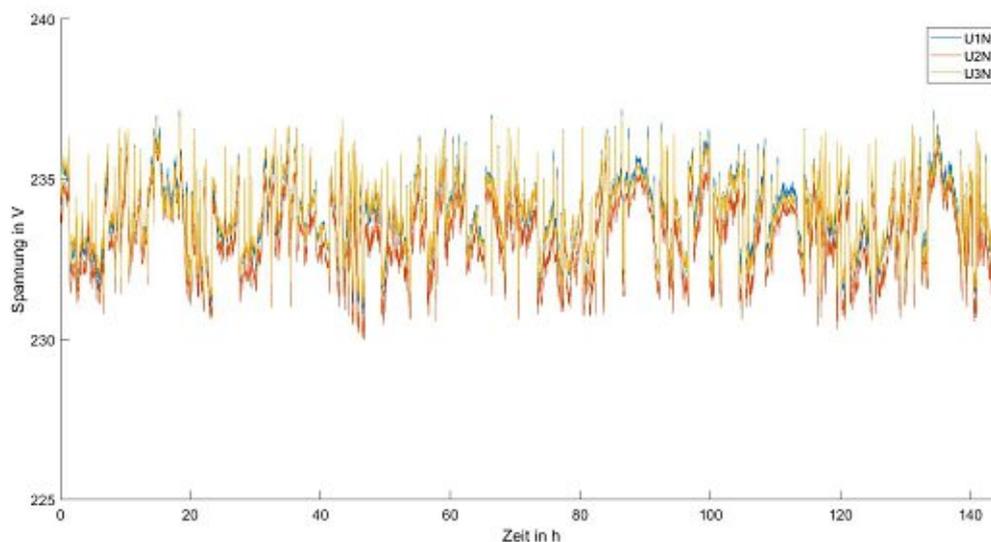


Abbildung 4.30: Phasenspannungen Trafo Abgang

Die Phasenspannungen nehmen im betrachteten Zeitraum Werte zwischen 230 V und 237 V an. Die zulässige Spannungsänderung im Niederspannungsnetz von 10 % (maximale Spannung 253 V) wird damit zu jeder Zeit eingehalten [70]. Weiters ist aus dem Verlauf erkennbar, dass keine merklichen Abweichungen zwischen den Effektivwerten der drei Phasenspannungen auftreten, wodurch auf Symmetrie geschlossen werden kann.

Noch deutlicher wird dies ersichtlich, wenn die symmetrischen Komponenten betrachtet werden. Gegensystem  $U(2)$  und Nullsystem  $U(0)$  sind im Gegensatz zum Mitsystem  $U(1)$  kaum ausgeprägt, wodurch auch hier auf Symmetrie geschlossen werden kann. Der Unsymmetriegrad, welcher als das Verhältnis zwischen Gegensystem und Mitsystem definiert ist, ist in Abbildung 4.31 ersichtlich.

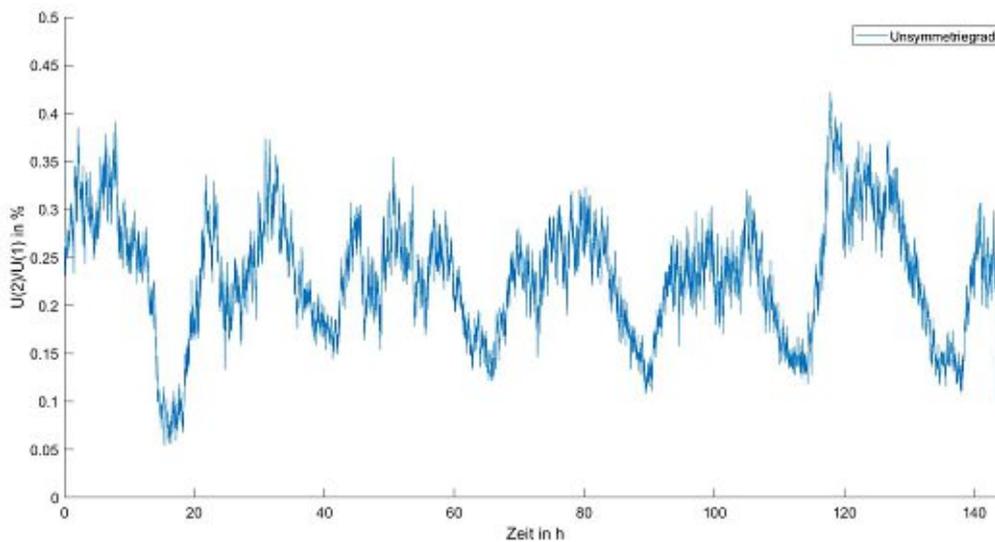
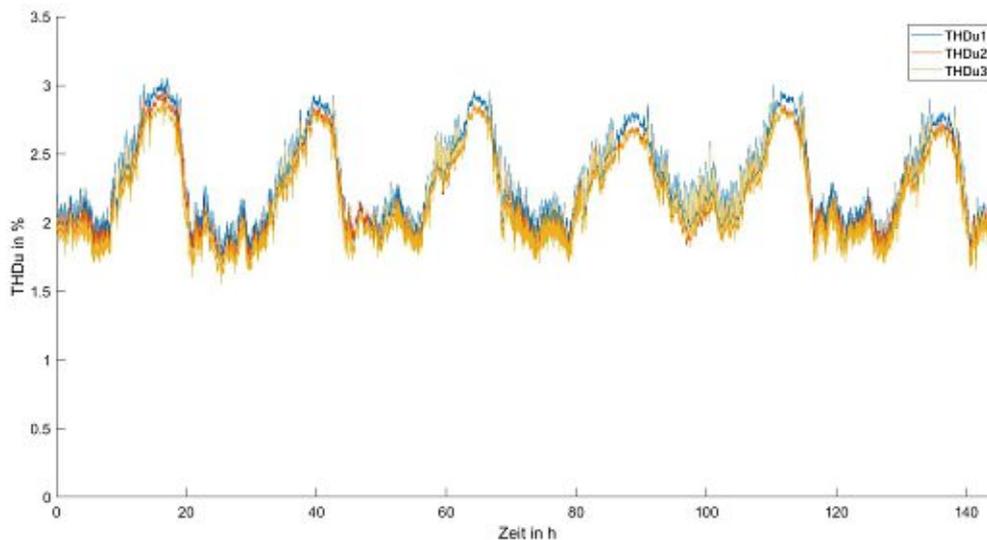


Abbildung 4.31: Unsymmetriegrad

Dieser beträgt maximal 0,42% und ist damit zu jeder Zeit unter dem vorgeschriebenen Maximalwert von 2% [70].

Als letzter Spannungsqualität bestimmender Parameter wird der Oberschwingungsgehalt der Spannung  $THD_U$  betrachtet. Dieser ist als das Verhältnis des Gesamteffektivwertes der Oberschwingungsspannungen zum Effektivwert der Grundschwingungsspannung definiert. Abbildung 4.32 zeigt den Verlauf des Parameters über den betrachteten Zeitraum.

Der  $THD_U$  beträgt maximal 3%, womit der Grenzwert von 8% laut EN 50160 nie überschritten wird [70]. Wird der Verlauf betrachtet, so ist eine Periodizität ersichtlich. Diese ergibt sich durch das Lastprofil des Netzes, bzw. durch andere Verbraucher im Netz, die immer zur selben Zeit in Betrieb sind. Für eine genauere Beschreibung der Ursache müssten auch andere Abgänge betrachtet werden, worauf verzichtet wird, da es zu keiner Grenzwertüberschreitung kommt. Die Start- und Endzeitpunkte der Ladevorgänge sind

Abbildung 4.32: Verlauf  $\text{THD}_U$ 

nicht deterministisch, wodurch diese keine Periodizität aufweisen, und damit als Hauptverursacher der periodischen Oberschwingungsänderungen auszuschließen sind. Ladevorgänge sind jedoch nicht komplett Oberschwingungsfrei, weswegen die Oberschwingungen der Ströme bei den folgenden Untersuchungen ebenfalls betrachtet werden.

#### 4.4.2 Ladevorgang VW e-Golf (einphasig)

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse eines einphasigen Ladevorganges an einem 3,7 kW Ladepunkt beschrieben. Die Messung erfolgt an einem Ladepunkt der Ladestation Nord 2 (nach Abbildung 3.4), wodurch die Messwerte der Power Quality Messgerätes, welches an Abgang Q1 im Schaltfeld 1 (laut Tabelle 3.2) angeschlossen ist, ausgelesen werden. Folgender Verlauf zeigt den Ladestrom während des Ladevorganges.

Der mittlere Ladestrom beträgt bei diesem Ladevorgang etwa 15 A. Es wird dabei nur die Phase L1 belastet. Die Ströme an den Phasen L2 und L3 sind Leerlaufströme im mA-Bereich. Auch der Strom  $I_l$  nimmt diesen Wert an, wenn nicht geladen wird. Aus den Ladeströmen kann mit der Phasenspannung von etwa 230 V unmittelbar auf die Ladeleistung geschlossen werden.

Die Wirkleistung an L1 beträgt im Mittel 3,4 kW. Laut Tabelle 4.5 beträgt die mittlere Ladeleistung des VW e-Golf 3,13 kW. Dadurch werden 270 W der bezogenen Ladeleistung nicht zum Laden der Batterie genutzt. An den Phasen L2 und L3 sind die Wirkleistungen vernachlässigbar klein, wodurch die Summenwirkleistung über alle drei Phasen nicht merklich von der Wirkleistung an L1 abweicht. Die mittlere Blindleistung an Phase 1 beträgt etwa  $-300 \text{ var}$ . Auch an den beiden anderen Phasen kann diese zwischen  $-30 \text{ var}$

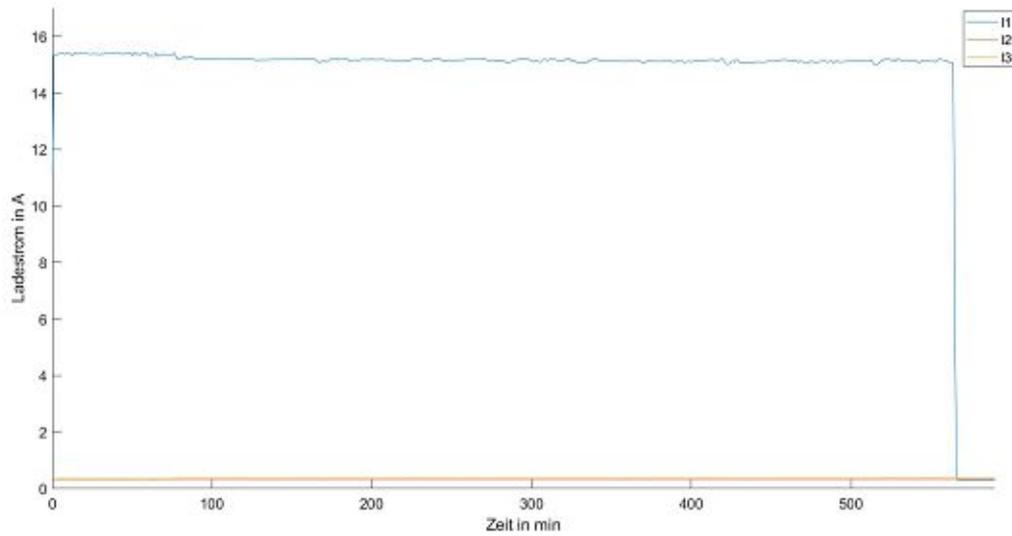


Abbildung 4.33: Ladestrom VW e-Golf an 3,7kW Ladepunkten

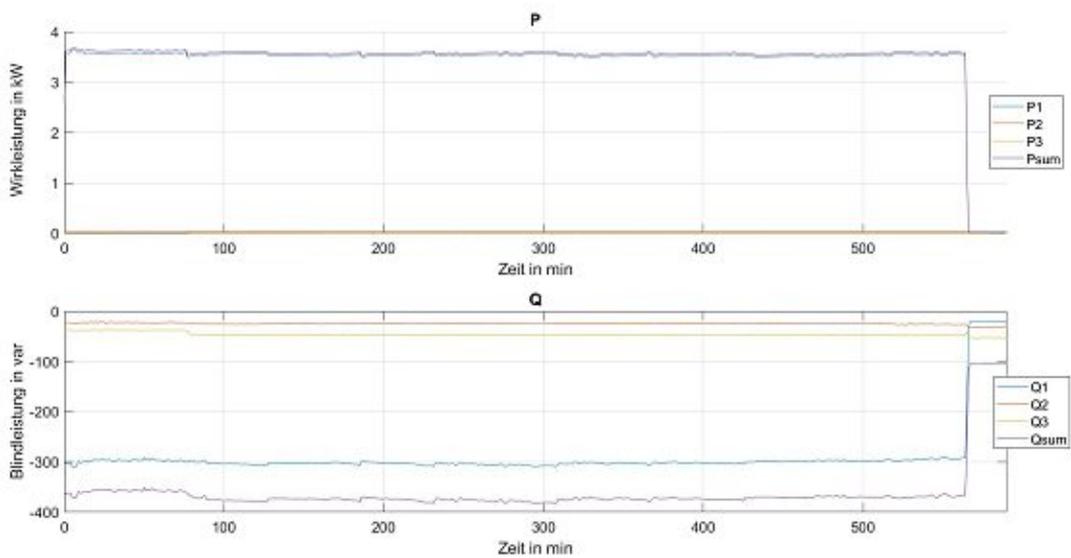


Abbildung 4.34: Ladeleistungen VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten

und  $-50$  var betragen, weswegen die Summenblindleistung höher ist, als  $Q_I$ . Daraus ist erkennbar, dass der einphasige Ladevorgang des VW e-Golf ein ohmsch-kapazitiver Ladevorgang ist, wobei der  $\cos \varphi$  größer als 0,99 ist.

Zum Abschluss werden die Stromüberschwingungen betrachtet. Da nur die Phase L1 belastet wird werden nur die Oberschwingungen von  $I_I$  betrachtet. Es wird dabei die Häufigkeit der auftretenden Effektivwerte von Oberschwingungsströmen unterschiedlicher Ordnung dargestellt.

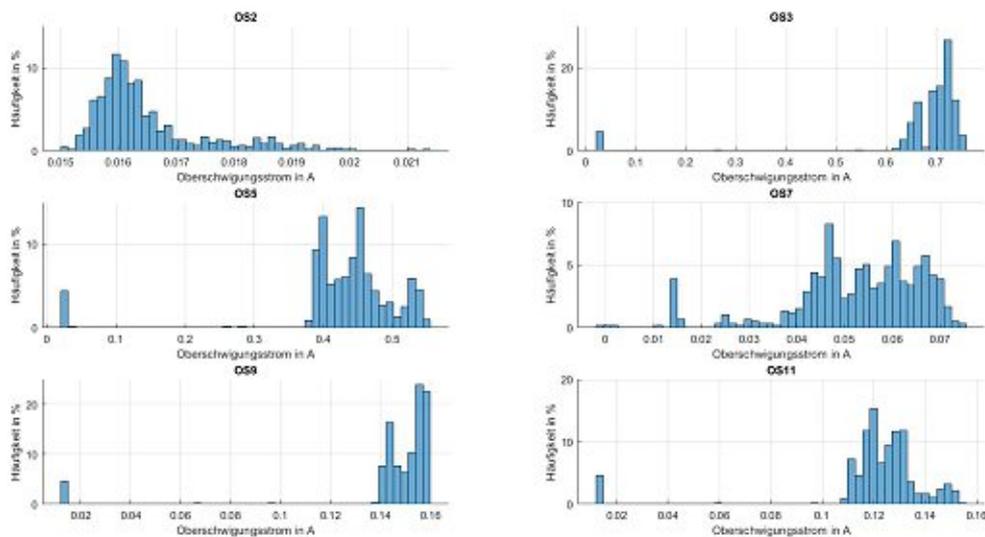


Abbildung 4.35: Stromüberschwingungen VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten

Die niedrige Ausprägung der zweiten Harmonischen zeigt, dass in erster Linie ungeradzahlig Vielfache der Grundschwingung ausgeprägt sind. Mit Ausnahme der Oberschwingung siebenter Ordnung sinken die Oberschwingungen mit steigender Ordnungszahl. Die Oberschwingung dritter Ordnung bewirkt ein Nullsystem, wodurch es zu einer zusätzlichen Belastung des Neutralleiters kommt. Durch den geringen Wert dieser Oberschwingung (im Vergleich zum Ladestrom) kommt es zu keiner unzulässig hohen Belastung. Auch die fünfte Oberschwingung, welche ein Gegensystem ausbildet, ist so gering, dass durch diese keine Betriebsschwierigkeiten auftreten.

Um auf die Grenzwerte der EN 61000 (laut Tabelle 3.3) einzugehen werden Boxplots der Oberschwingungen erstellt.

Aus diesen ist ersichtlich, dass alle Grenzwerte zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden. Die Einhaltung zu allen Zeitpunkten ist dadurch ersichtlich, dass es keine einzelnen Ausreißer gibt, welche die Grenzwerte überschreiten. Das Laden des VW e-Golf an 3,7 kW-Ladepunkten ist damit bezüglich der Oberschwingungsströme gültig.

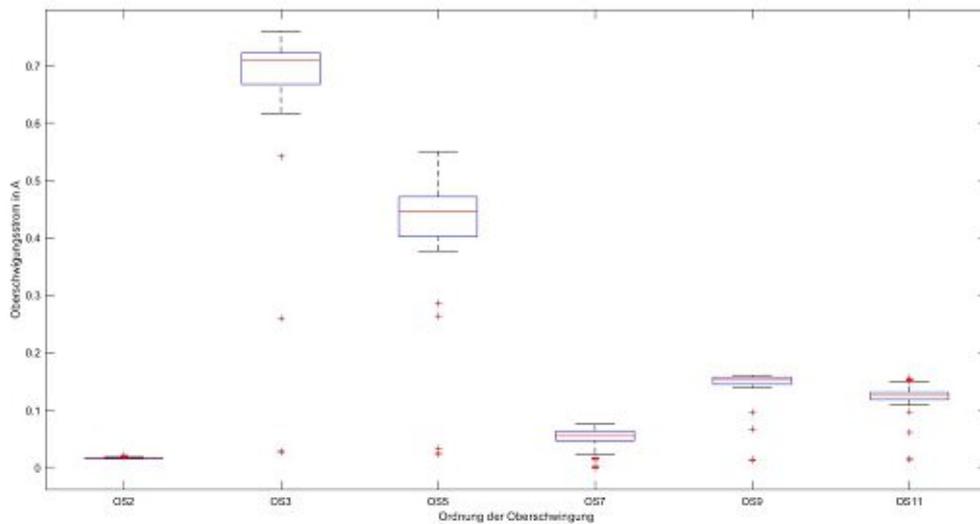


Abbildung 4.36: Boxplot OS VW e-Golf an 3,7kW Ladepunkten

#### 4.4.3 Ladevorgang VW e-Golf (dreiphasig)

Dreiphasig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der VW e-Golf an einen Ladepunkt angeschlossen wird, an dem dreiphasiges Laden möglich ist. Die Messung erfolgt an Abgang Q10 im Schaltfeld 3. Abbildung 4.37 zeigt die Stromverläufe der Ladevorgänge.

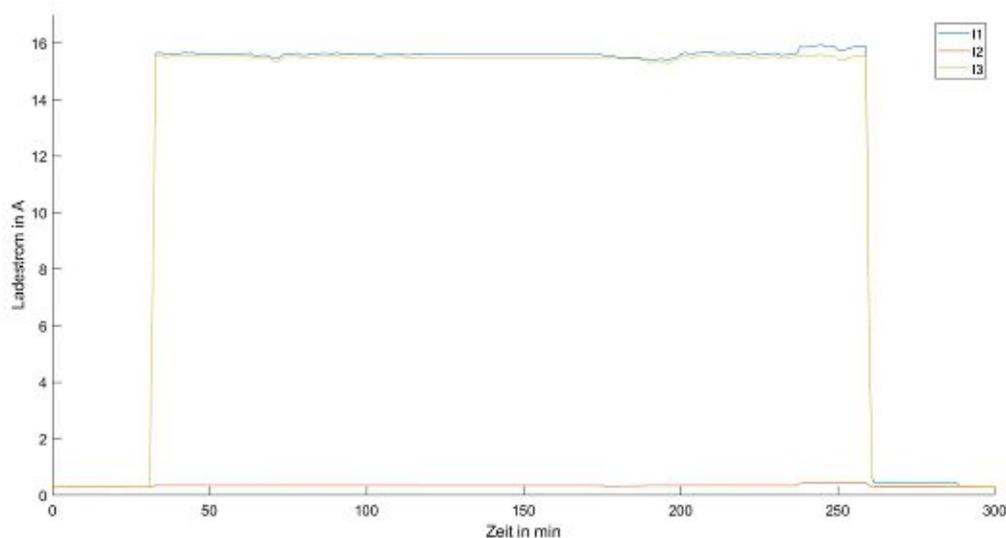


Abbildung 4.37: Ladestrom VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten

Die Ladeströme auf L1 und L3 betragen knapp 16 A, während L2 nicht belastet wird. Der VW e-Golf lädt somit zweiphasig an dreiphasigen Ladepunkten. In vorherigen Abschnitten trat das Problem auf, dass der gemessene Ladestrom an der Batterie größer war, als die zulässigen 16 A (einphasig), weswegen eine Überprüfung notwendig war, ob der Ladevor-

gang einphasig oder zweiphasig ist. Durch die zweiphasige Ladung kommt es zur keiner Überschreitung der zulässigen einphasigen Ladeströme.

Aufgrund Belastung von L1 und L3 wird nur auf diesen Wirkleistung umgesetzt, wie es in Abbildung 4.38 ersichtlich ist.

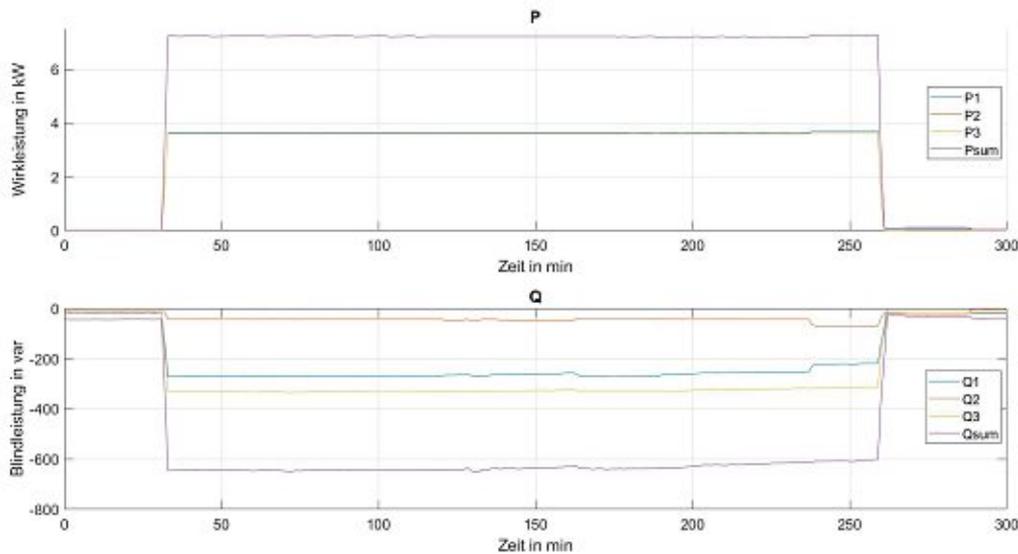


Abbildung 4.38: Ladeleistungen VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten

Die Wirkleistungen  $P_1$  und  $P_3$  betragen 3,6 kW, wodurch sich eine Summenleistung von 7,2 kW ergibt.  $Q_1$  beträgt etwa  $-260$  var,  $Q_2$  etwa  $-42$  var und  $Q_3$  etwa  $-330$  var. Damit ergibt sich eine Summenblindleistung von  $-640$  var. Mit einem  $\cos \varphi$  von 0,996 ist dieser Ladevorgang fast rein ohmsch. Die Blindleistung an den drei Phasen ist kapazitiv. Auch im Leerlauf ist die Blindleistung an allen drei Phasen kapazitiv, und sie beträgt etwa  $-45$  var.

Bezüglich Oberschwingungen gelten die gleichen Beziehungen wie beim einphasigen Laden, wobei beim zweiphasigen Laden auch Oberschwingungen von  $I_3$  auftreten.

Aus den Boxplots ist ersichtlich, dass es zu keinem Zeitpunkt zu Grenzwertverletzungen kommt. In Abbildung 4.41 ist der Boxplot der Oberschwingungsströme der Phase L1 dargestellt.

#### 4.4.4 Ladevorgang VW e-Golf (Schnellladen)

Dieser Ladevorgang wird an Abgang Q3 in Feld 1 durchgeführt, welcher zur Schnellladesäule vor der Garage führt. An dieser kann mit einer Ladeleistung von bis zu 150 kW geladen werden. In Abbildung 4.42 sind die Verläufe der drei Phasenströme dargestellt.

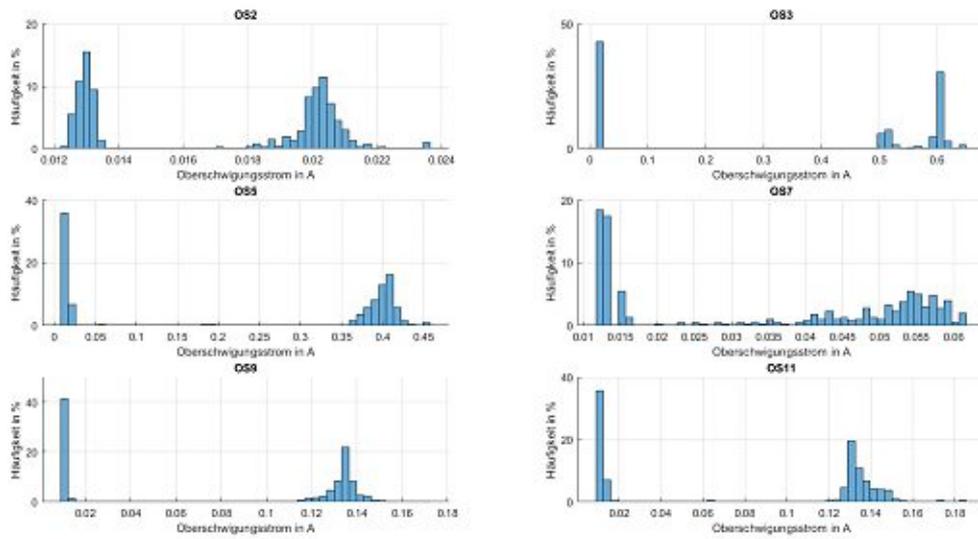


Abbildung 4.39: Stromüberschwingungen L1 VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten

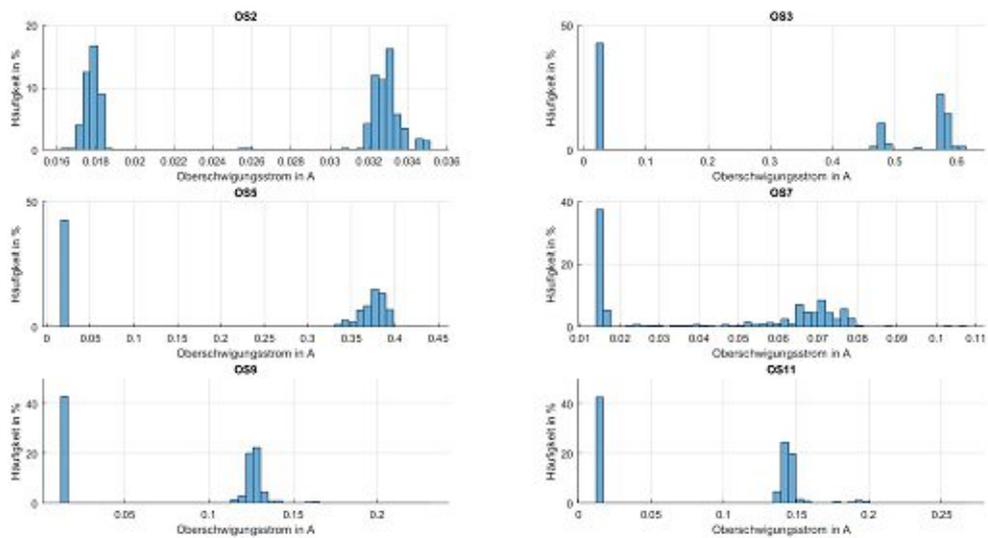


Abbildung 4.40: Stromüberschwingungen L3 VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten

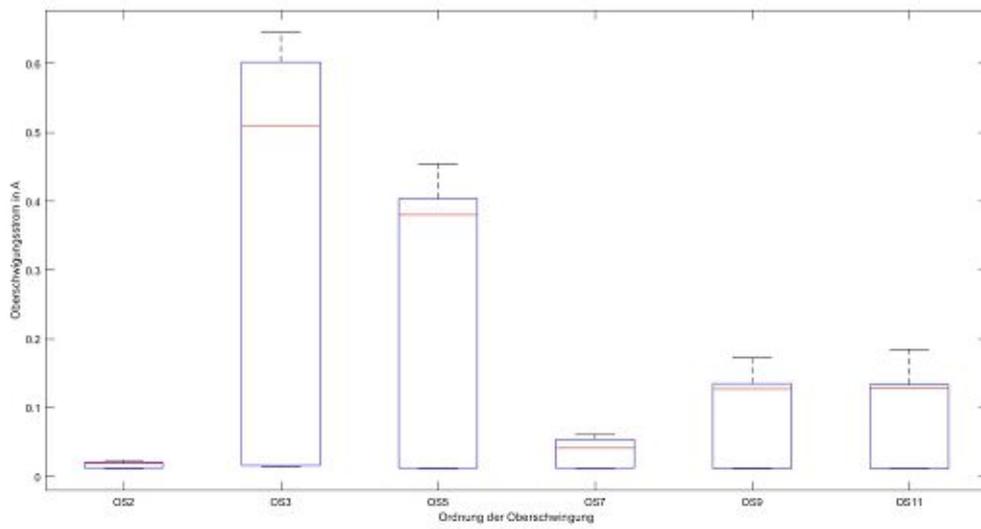


Abbildung 4.41: Boxplot OS VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten

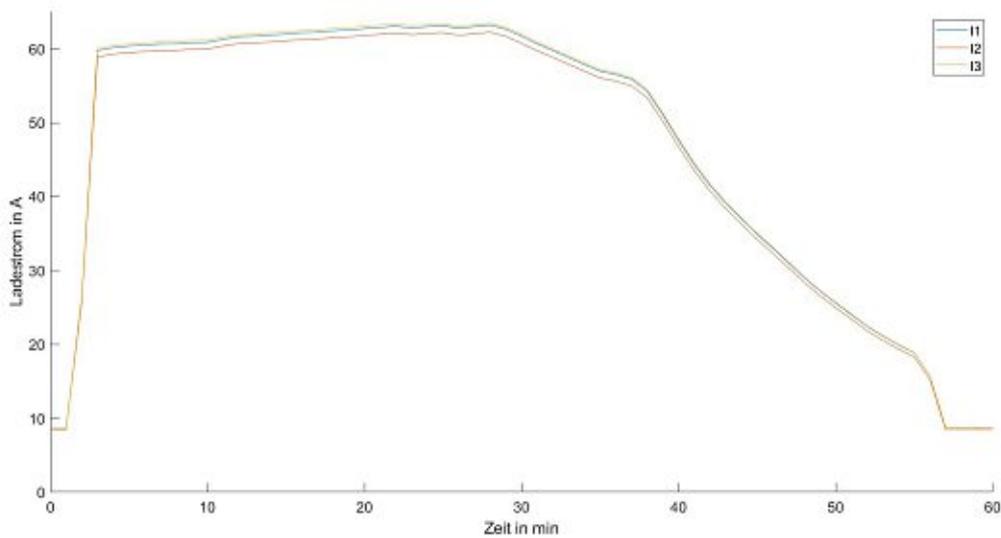


Abbildung 4.42: Ladestrom VW e-Golf Schnellladevorgang

$I_1$  und  $I_3$  betragen bei diesem Ladevorgang zwischen 60 A und 63,5 A, während  $I_2$  mit 59 A bis 62,3 A etwas geringer ist. Diese werden bei steigenden SOC-Werten proportional mit der Ladezeit verringert. Auffällig ist, dass auch im Leerlauf bei der Schnellladesäule Ströme von 8,6 A in allen drei Phasen fließen, was mehr als 10 % der Betriebsströme sind. Um das genauer zu untersuchen werden die Leistungsverläufe betrachtet.

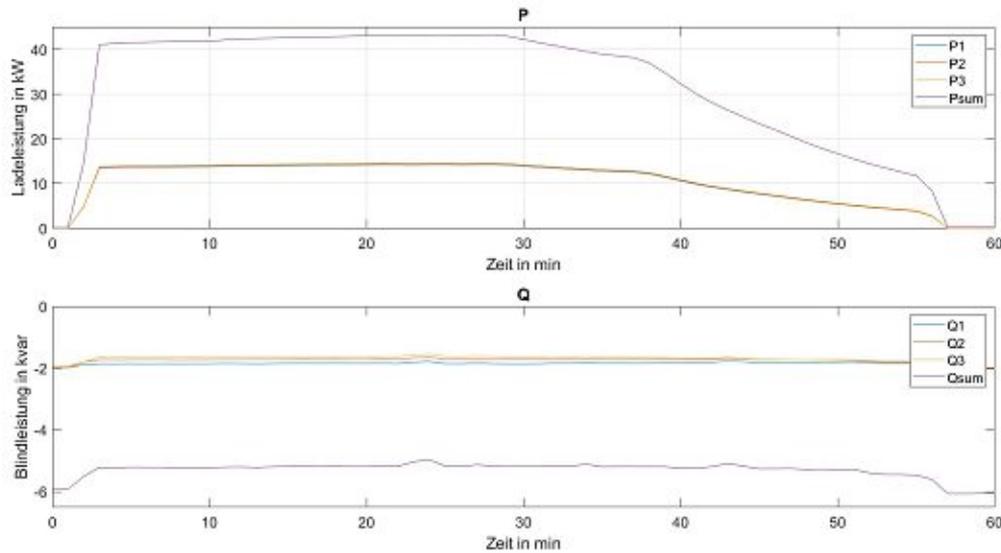


Abbildung 4.43: Ladeleistungen VW e-Golf Schnellladevorgang

Die Wirkleistung beträgt an allen drei Phasen jeweils 14 kW, wodurch sich eine Summenwirkleistung von 42 kW ergibt. Ohne angestecktem Fahrzeug wird keine Wirkleistung übertragen, jedoch bezieht die Ladesäule kapazitive Blindleistung von  $-6$  kvar ( $-2$  kvar pro Phase). Die Leerlaufströme sind Ströme zur Deckung der Blindleistung. Während des Ladens sinkt diese Blindleistung (betragsmäßig) auf  $-5,2$  kvar. Zu beachten ist, dass die Schnellladesäule zwei Ladepunkte besitzt. Die Blindleistung des Ladevorganges beträgt damit  $-2,2$  kvar kapazitiv. Dadurch ergibt sich ein  $\cos \varphi$  von 0,999. Der Ladeumrichter benötigt mehr Blindleistung im Leerlauf als im Betrieb. Dieser befindet sich direkt an der Ladesäule, da die Schnellladesäule Gleichstrom liefert, und er ist somit immer am Netz angeschlossen, weswegen dieser durch die Koppelkondensatoren auch im betriebslosen Zustand kapazitive Blindleistung bezieht. Eine Verringerung der Blindleistung beim Laden ist dadurch erklärbar, dass bei der Ladesäule eine Kühlung vorhanden ist, welche in der Regel induktiv wirkt (Lüftung mit Motor), und damit die Blindleistung beim Ladevorgang verringert (kompensiert). Laut Tabelle 4.7 beträgt die mittlere Ladeleistung beim VW e-Golf an der 150 kW Ladesäule (wenn nur die CC-Phase bis Minute 30 betrachtet wird) 37,8 kW.

Bezüglich der Oberschwingungen müssen alle drei Phasen betrachtet werden. Da in Tabelle 3.4 Grenzwerte der Oberschwingungsströme bezogen auf den Grundschwingungsstrom angegeben sind muss in diesem Fall der Oberschwingungsgehalt dargestellt werden.

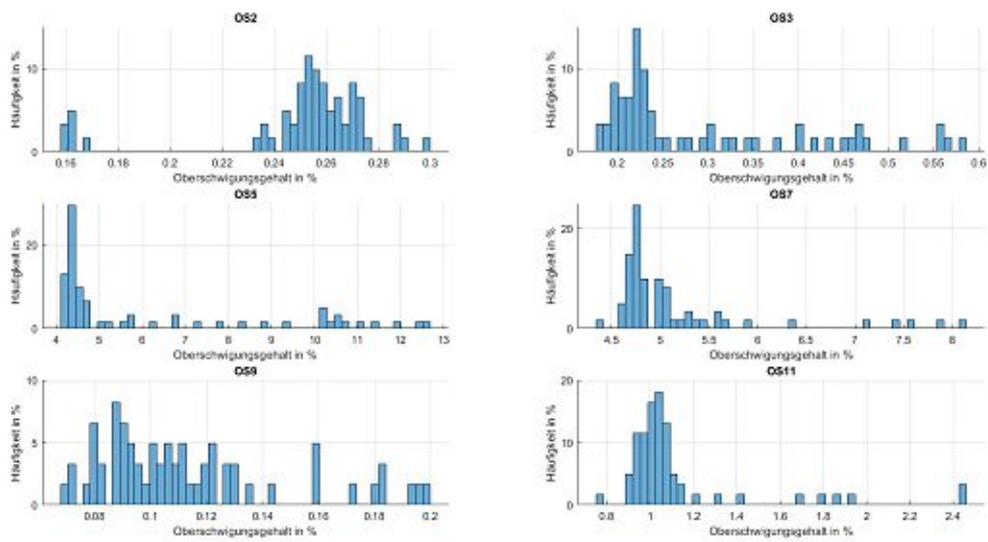


Abbildung 4.44: Stromüberschwingungen L1 VW e-Golf Schnellladevorgang

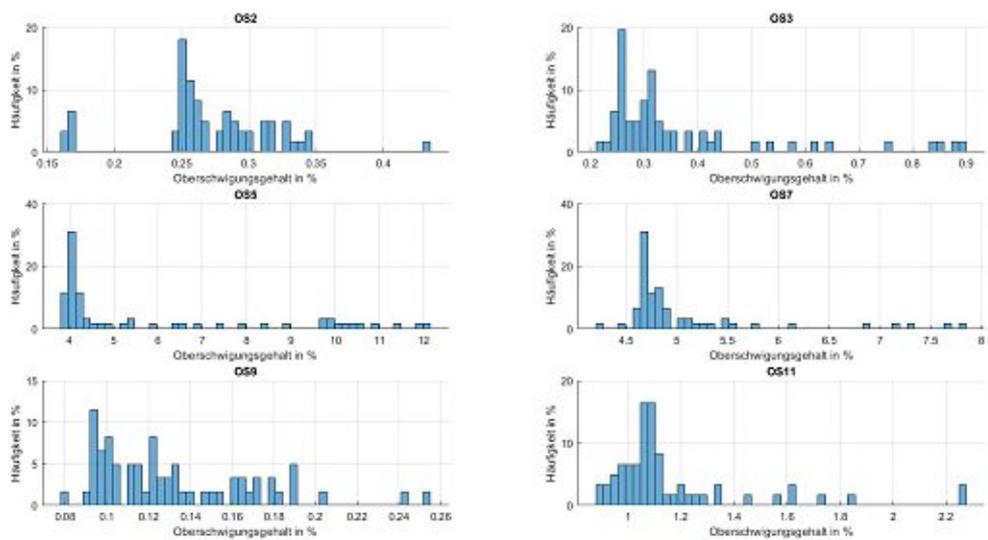


Abbildung 4.45: Stromüberschwingungen L2 VW e-Golf Schnellladevorgang

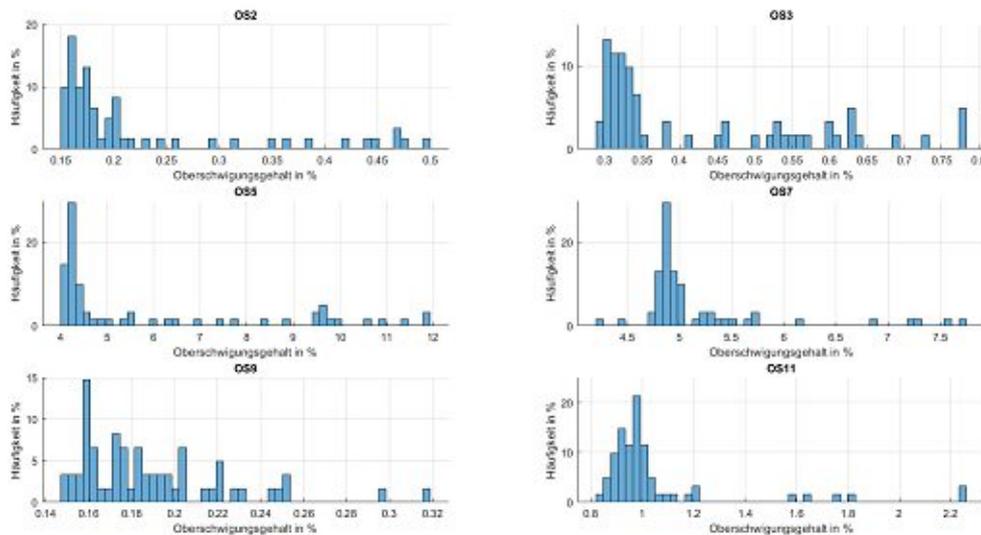


Abbildung 4.46: Stromüberschwingungen L3 VW e-Golf Schnellladevorgang

Die Oberschwingungsströme sind in allen drei Phasen annähernd gleich, wobei nur die fünfte, siebente und elfte Harmonische eine merkliche Ausprägung zeigen. Die Oberschwingung siebenter Ordnung war beim ein- und zweiphasigen Ladevorgang gering im Vergleich zu Oberschwingungen niedrigerer Ordnung, Beim Schnellladen ist diese Oberschwingung (gemeinsam mit der fünften Harmonischen) die am stärksten ausgeprägte. Daraus folgt die Erkenntnis, dass beim Ladeumrichter eine sechspulsige Gleichrichterschaltung verwendet wird, da deren charakteristische Oberschwingungen die Harmonischen fünfter und siebenter Ordnung sind. Beim Ladeumrichter direkt am Fahrzeug ist deswegen von einer nieder-pulsigen Schaltung auszugehen. Weiters treten bei der fünften Harmonischen vereinzelt Oberschwingungsgehalte von über 10 % auf, was mit dem Reduzieren des Ladestromes bei höheren SOC-Werten zusammenhängt. Durch den Umrichter werden die Effektivwerte der sinusförmigen Ströme reduziert, und es ergeben sich überschwingungsbehaftete, nicht sinusförmige Stromverläufe.

Die Untersuchung der Grenzwerteinhaltung nach Tabelle 3.4 erfolgt durch Betrachtung des Boxplots der Phase L1.

Aus diesem ist ersichtlich, dass es bei einem zu geringen Kurzschlussleistungsverhältnis zu Grenzwertverletzungen durch die Oberschwingung fünfter und siebenter Ordnung kommt. Bei einem Kurzschlussleistungsverhältnis von 33 beträgt der Grenzwert der fünften Harmonischen 10,7 % und der Grenzwert der siebenten Harmonischen 7,2 %, wobei die Grenzwertüberschreitungen der siebenten Harmonischen im Boxplot als Ausreißer definiert sind. Bei einer höheren Kurzschlussleistung (und damit einem höheren Kurzschlussleistungsverhältnis - im betrachteten Fall  $R_{SCE}$  von 66) betragen die Grenzwerte 14 % (OS fünfter Ordnung) und 9 % (OS siebenter Ordnung), welche beide laut Abbildung 4.47

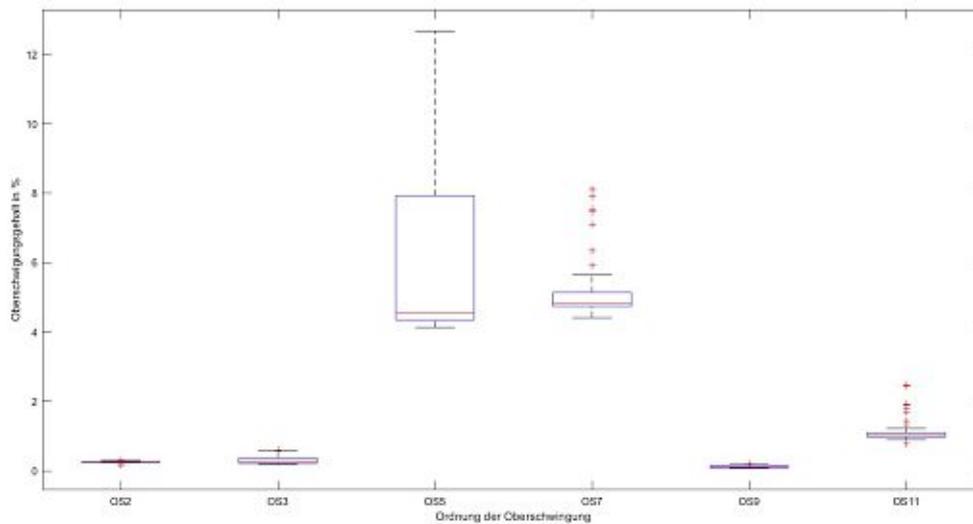


Abbildung 4.47: Boxplot OS VW e-Golf Schnellladevorgang

eingehalten werden. Die Kurzschlussleistung des betrachteten Netzes ist damit ausschlaggebend dafür, ob die Oberschwingungsströme beim Schnellladevorgang laut EN 61000 zulässig sind.

#### 4.4.5 Ladevorgang BMW i3 (einphasig)

Dieselben Untersuchungen wie beim VW e-Golf werden in den folgenden Abschnitten beim BMW i3 durchgeführt. Die Messung des einphasigen Ladevorganges erfolgt an der Ladesäule Nord 1, wodurch das PQ-Messgerät an Abgang Q1 in Feld 1 ausgewertet wird. Bei der Auswertung ergeben sich folgende Zeitverläufe der Ladeströme.

Der Ladevorgang ist auch hier einphasig an der Phase L1. Es fließt ein Ladestrom  $I_1$  von 16 A. Teilweise ist der einphasige Strom größer als 16 A, was unzulässig ist.  $I_2$  und  $I_3$  betragen beim Ladevorgang 370 mA.  $I_1$  nimmt denselben Wert an, wenn nicht geladen wird. Es handelt sich damit um Leerlaufströme, welche unabhängig vom Ladevorgang auftreten. Diese konnten auch beim VW e-Golf erkannt werden. Gegen Ende des Ladevorganges ist das Absenken des Ladestromes (in der CV-Phase) erkennbar. Aus dem Ladestrom kann unmittelbar auf die Ladeleistung geschlossen werden.

Die bezogene Wirkleistung beträgt 3,7 kW auf Phase L1, während die Wirkleistung an den anderen beiden Phasen vernachlässigbar klein ist. Damit entspricht die Summenwirkleistung der Wirkleistung an L1. Die maximale Leistung wird statt der mittleren Leistung verwendet, da bei dieser keine Abweichung durch die CV-Phase (ab Minute 700) auftritt. Weiters wird über die Phase L1 eine kapazitive Blindleistung von  $-430 \text{ var}$  bezogen. Durch geringe Leerlaufblindleistungen an den beiden anderen Phasen ( $Q_2$  von  $-22 \text{ var}$  kapazitiv und  $Q_3$

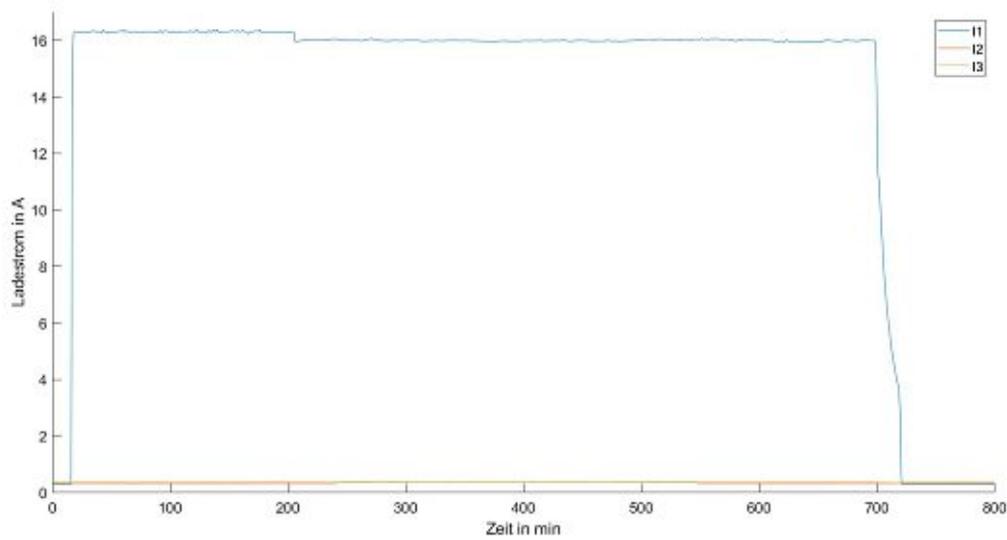


Abbildung 4.48: Ladestrom BMW i3 an 3,7kW Ladepunkten

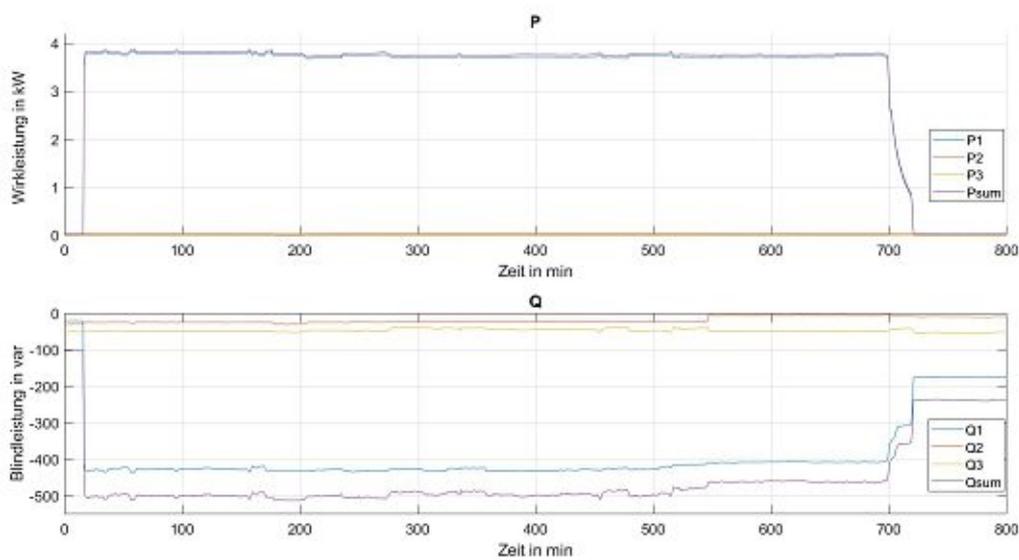


Abbildung 4.49: Ladeleistungen BMW i3 an 3,7kW Ladepunkten

von  $-44$  var kapazitiv) ergibt sich eine Summenblindleistung von  $-500$  var, was einen  $\cos \varphi$  von  $0,991$  ergibt. Der Ladevorgang ist damit annähernd ohmsch (leicht kapazitiv).

Bezüglich der Oberschwingungen (laut Abbildung 4.50) ist die fünfte Harmonische stärker ausgeprägt als die dritte Harmonische. Ansonsten sind die Ausprägungen der Oberschwingungen ähnlich zum zuvor untersuchten VW e-Golf.

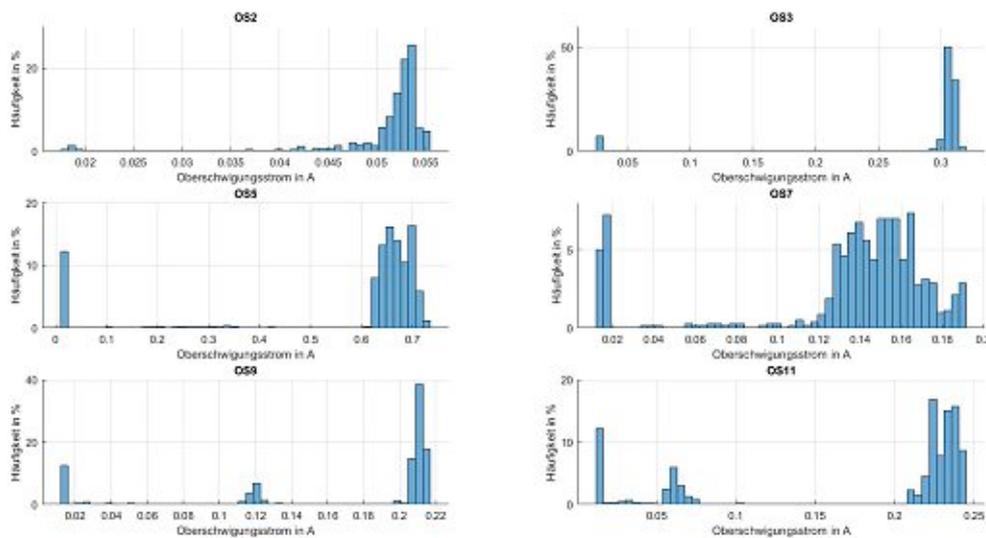


Abbildung 4.50: Stromoberschwingungen BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten

Im Boxplot der Phase L1 ist ersichtlich, dass es auch bei Ladevorgängen des BMW i3 an 3,7 kW-Ladepunkten zu keinen Grenzwertverletzungen kommt. Die große Anzahl an Ausreißern nach unten ist durch die Messwerte, welche nach Beendigung des Ladevorganges aufgenommen wurden, erklärbar. Diese müssen somit für die Betrachtung der Oberschwingungsströme des Ladevorganges verworfen werden.

#### 4.4.6 Ladevorgang BMW i3 (dreiphasig)

Die Messung wird wie beim VW e-Golf an einem Ladepunkt mit einer Ladeleistung von 11 kW durchgeführt. Dazu muss das Haag Combi Quant Messgerät, welches an Abgang Q10 in Feld 3 angeschlossen ist, ausgelesen werden. In Abbildung 4.52 sind die Verläufe der Phasenströme dargestellt.

$I_1$  beträgt bei diesem Ladevorgang  $15,6$  A,  $I_2$  beträgt  $14,4$  A und  $I_3$  hat einen Wert von  $16$  A. Der dreiphasige Ladevorgang beim BMW i3 ist damit nicht vollkommen symmetrisch. Am Ende des Ladevorganges ist die CV-Phase aus den Stromverläufen ab Minute 178 erkennbar. Diese ist auch in den Wirkleistungsverläufen in Abbildung 4.53 gut ersichtlich.

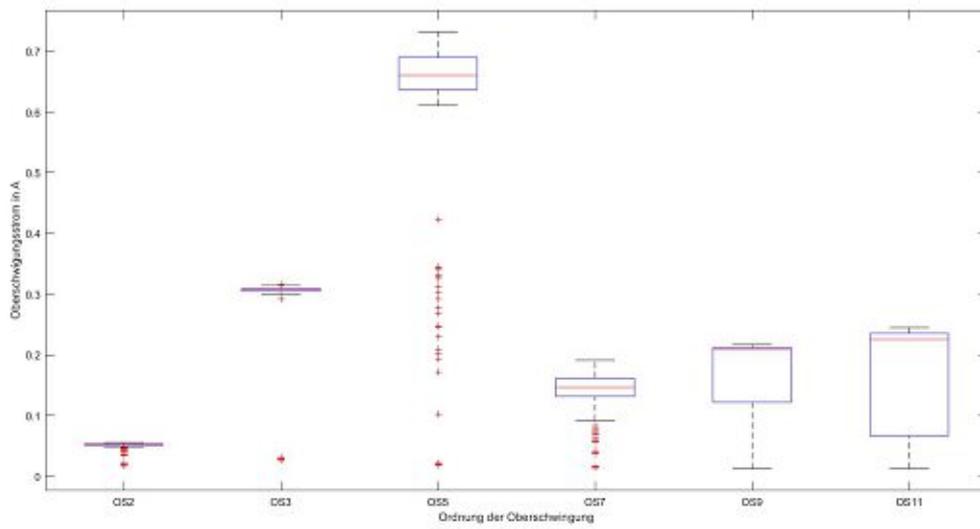


Abbildung 4.51: Boxplot OS BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten

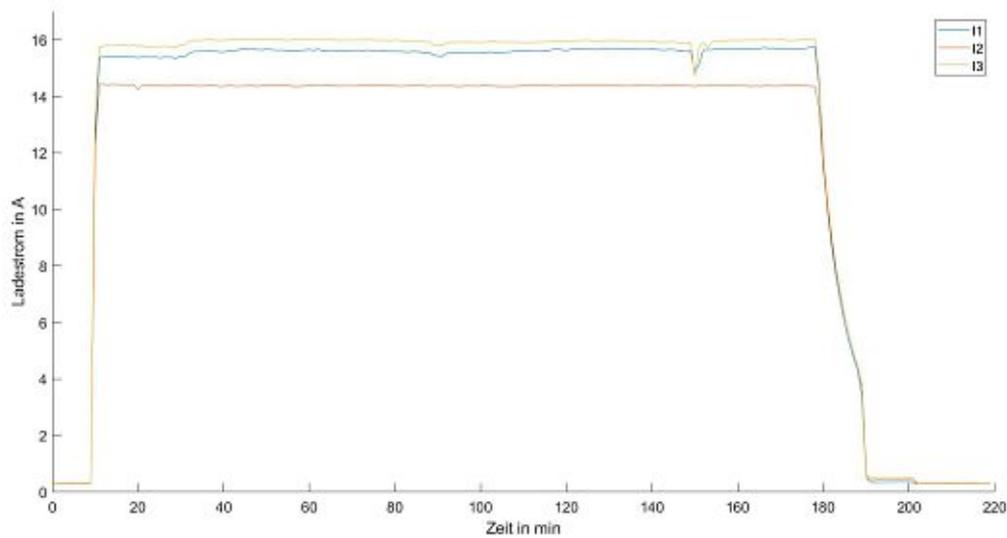


Abbildung 4.52: Ladestrom BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

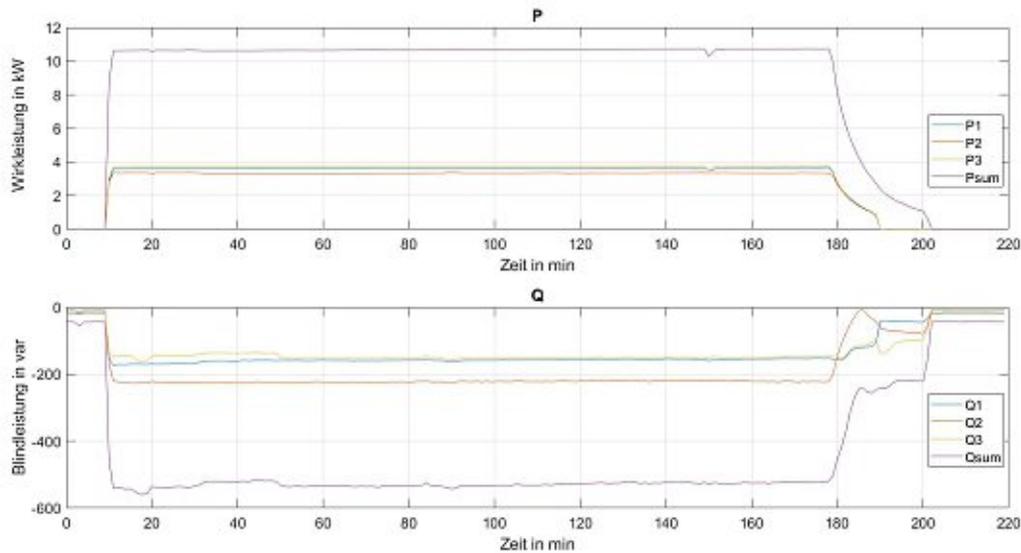


Abbildung 4.53: Ladeleistungen BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

Die Wirkleistung an L1 und L3 beträgt 3,6 kW. An L2 beträgt diese 3,3 kW, womit sich eine Summenwirkleistung von 10,7 kW ergibt. Laut Tabelle 4.6 beträgt die mittlere Ladeleistung beim BMW i3 8,7 kW. Die kapazitive Blindleistung variiert auf den Phasen L1 und L2 zwischen  $-150$  var und  $-160$  var. Mit der kapazitiven Blindleistung  $Q_2$  von etwa  $-220$  var ergibt sich eine Summenblindleistung von  $-540$  var und damit ein  $\cos \varphi$  von 0,999 (kapazitiv).

Es ist auffällig, dass die Blindleistung der Phase L2 höher ist, als die der anderen Phasen, obwohl der Ladestrom geringer ist. Da nur die Blindleistung der Grundschwingung bei der Messung betrachtet wird ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung an L2 höher als an L1 und L3. Weiters werden die Oberschwingungen der Ströme betrachtet.

In den drei Phasen sind die fünfte und die siebente Harmonische am stärksten ausgeprägt. Auch die dritte Harmonische weist vereinzelt Werte über 0,2 A auf. Die Oberschwingungsströme sind auf Phase L2 am stärksten ausgeprägt, weshalb der Boxplot dieser Phase zur Betrachtung der Grenzwerte herangezogen wird.

Es kommt auch bei diesem Fall zu keinen Grenzwertverletzungen. Auffällig ist, dass bei der dritten, fünften und siebenten Oberschwingung viele Ausreißer nach oben auftreten, welche die zulässigen Grenzwerte nach Tabelle 3.3 aber nicht überschreiten. Diese treten beim Reduzieren des Ladestromes in der CV-Phase auf worauf auf nichtsinusförmige Ströme in der CV-Phase geschlossen werden kann.

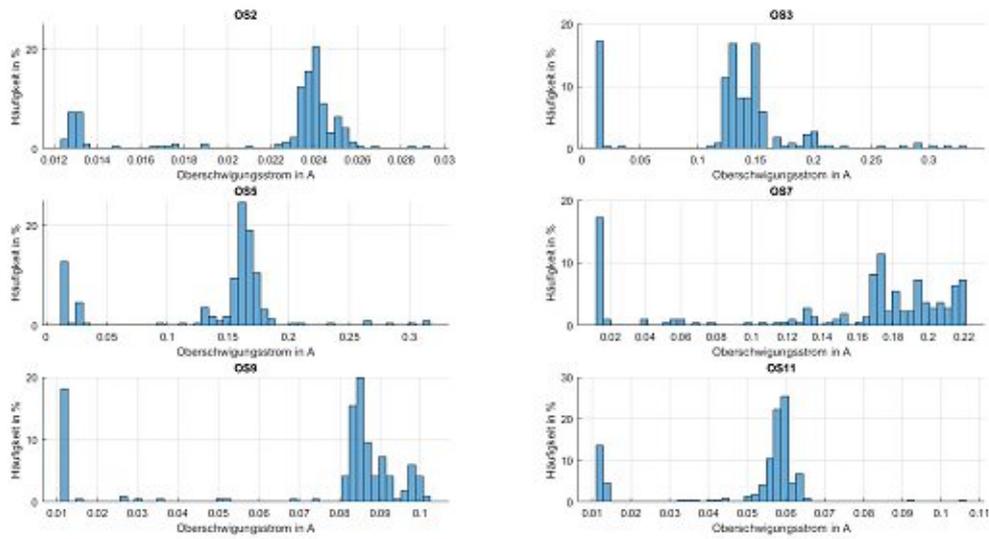


Abbildung 4.54: Stromüberschwingungen L1 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

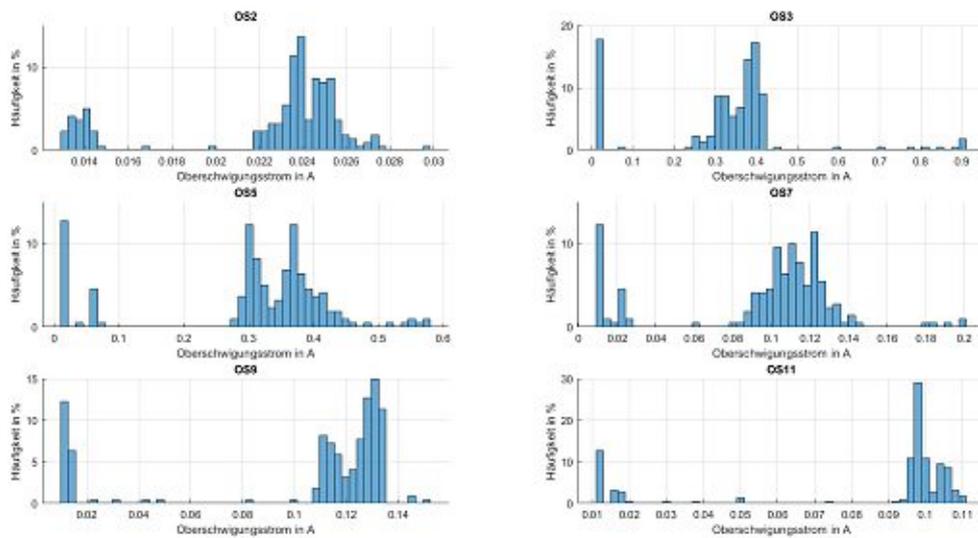


Abbildung 4.55: Stromüberschwingungen L2 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

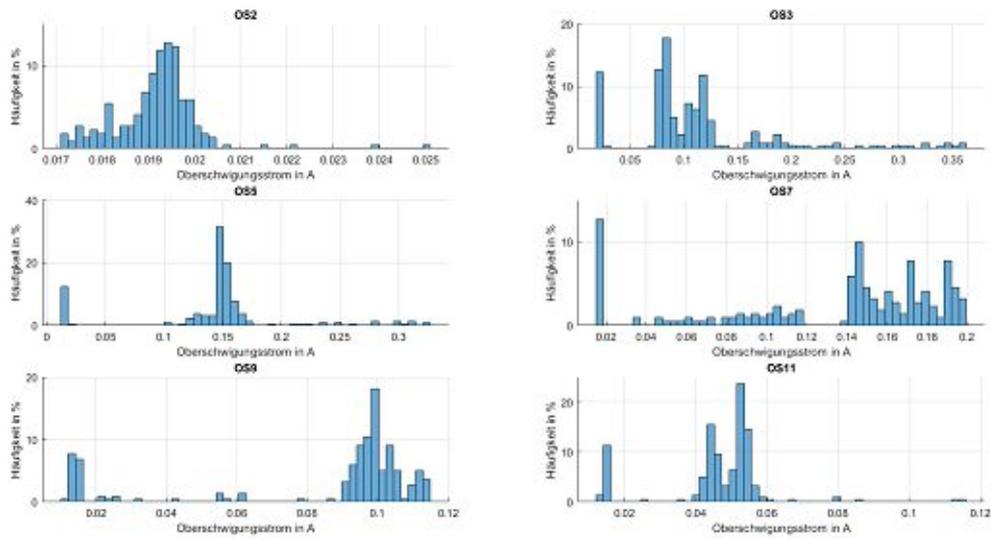


Abbildung 4.56: Stromüberschwingungen L3 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

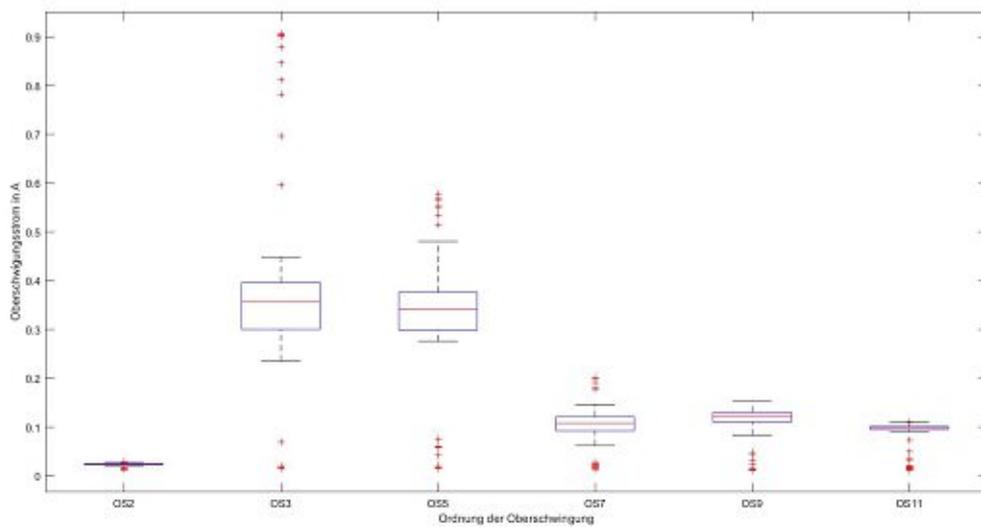


Abbildung 4.57: Boxplot OS BMW i3 an 11 kW Ladepunkten

#### 4.4.7 Ladevorgang BMW i3 (Schnellladen)

Diese Auswertung wird an der Schnellladesäule, bzw. Abgang Q3 in Schaltfeld 1 durchgeführt. Folgende Stromverläufe ergeben sich laut Messung.

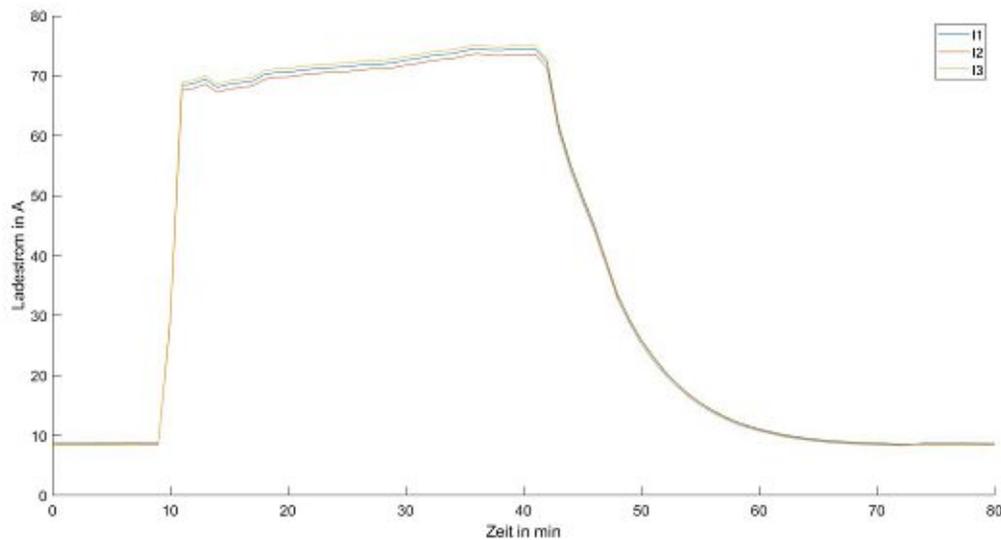


Abbildung 4.58: Ladestrom BMW i3 Schnellladevorgang

Die Werte der Phasenströme betragen zwischen 67 A und 75 A. Es treten nur geringe Abweichungen zwischen den drei Phasenströmen auf, wodurch der Ladevorgang des BMW i3 an der Schnellladesäule ein symmetrischer, dreiphasiger Ladevorgang ist.

Dies ist auch in den Wirk- und Blindleistungsverläufen ersichtlich.

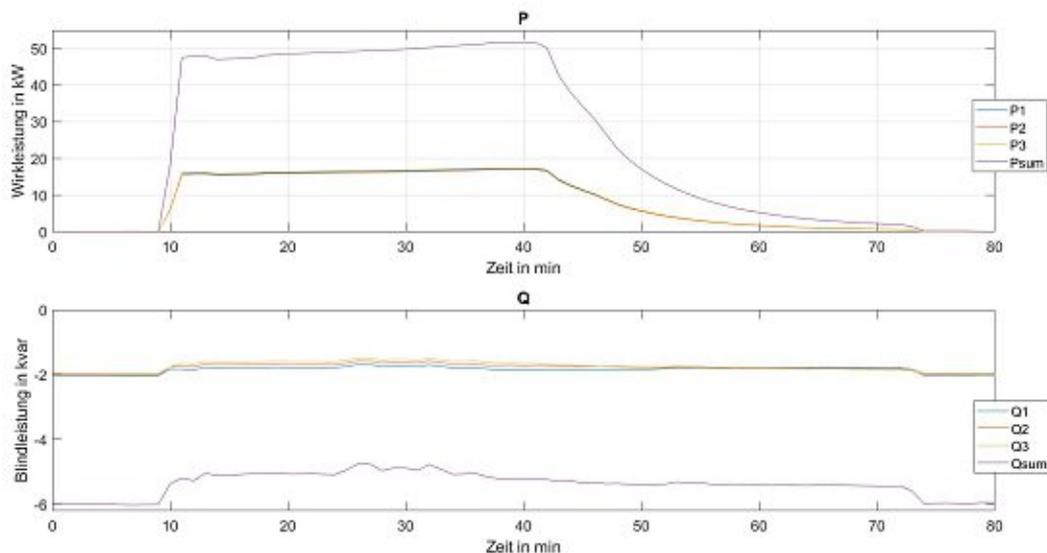


Abbildung 4.59: Ladeleistungen BMW i3 Schnellladevorgang

Die Wirkleistung beträgt in Summe bis zu 51 kW (17 kW pro Phase). Sie ist damit höher als beim VW e-Golf, was auch schon bei der Auswertung der durchschnittlichen Ladeleistungen in Tabelle 4.7 ersichtlich war. Die Blindleistung der Ladesäule im betriebslosen Zustand beträgt wie beim BMW i3  $-3$  kVar pro Ladepunkt. Während des Ladevorganges sinkt diese (aus den selben Gründen wie beim VW e-Golf beschrieben) auf etwa  $-2,2$  kVar (etwa  $-0,73$  kVar pro Phase). Damit ergibt sich ein  $\cos \varphi$  von 0,999 (kapazitiv).

Bezüglich der Oberschwingungsströme sind wie schon beim VW e-Golf die Oberschwingungen fünfter und siebenter Ordnung am stärksten ausgeprägt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Histogramme der Oberschwingungen und den Boxplot der Oberschwingungen der Phase L1.

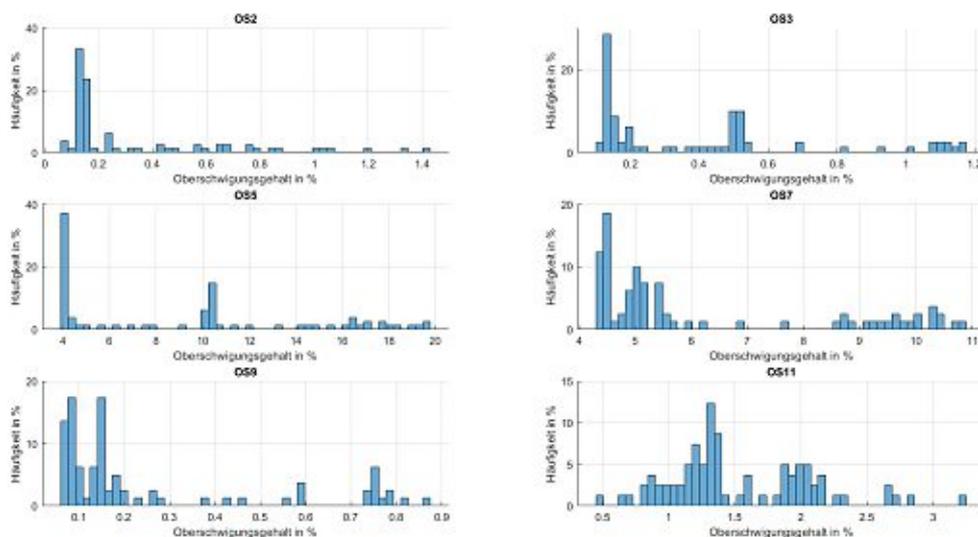


Abbildung 4.60: Stromüberschwingungen L1 BMW i3 Schnellladevorgang

Durch die CV-Phase kommt es zu Oberschwingungen fünfter Ordnung von bis zu knapp 20 % und zu Oberschwingungen siebenter Ordnung von knapp 11 %. Durch die Dauer dieser Phase von etwa 30 Minuten treten diese hohen Oberschwingungsgehalte über 12 % (5. Ordnung) bzw. über 8 % relativ häufig auf, wodurch der Schnellladevorgang des BMW i3 stark überschwingungsbehaftet ist. Um die Grenzwerte zu jedem Zeitpunkt einhalten zu können ist laut Tabelle 3.4 ein Kurzschlussleistungsverhältnis von 250 notwendig. Daraus erfolgt die Erkenntnis, dass die Kurzschlussleistung ein maßgebender Parameter bei Schnellladevorgängen ist.

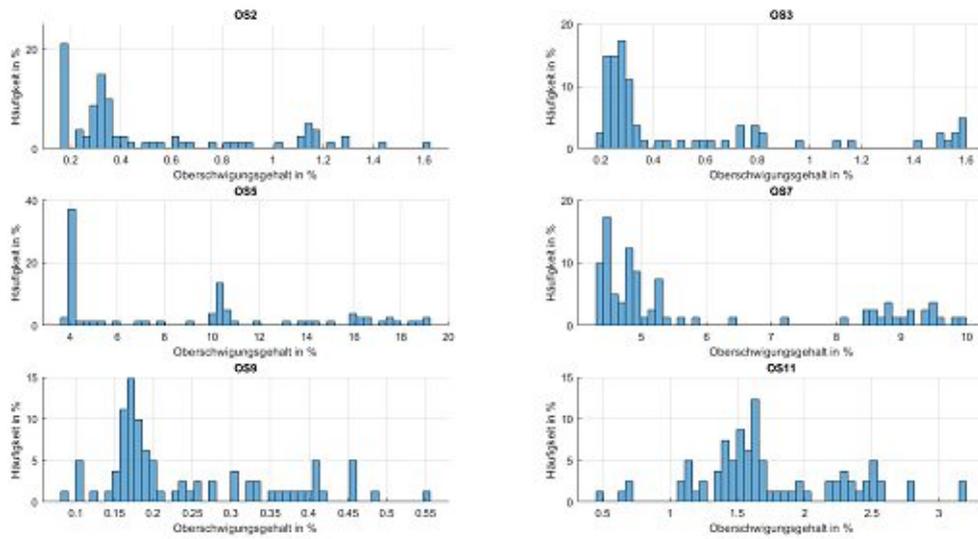


Abbildung 4.61: Stromüberschwingungen L2 BMW i3 Schnellladevorgang

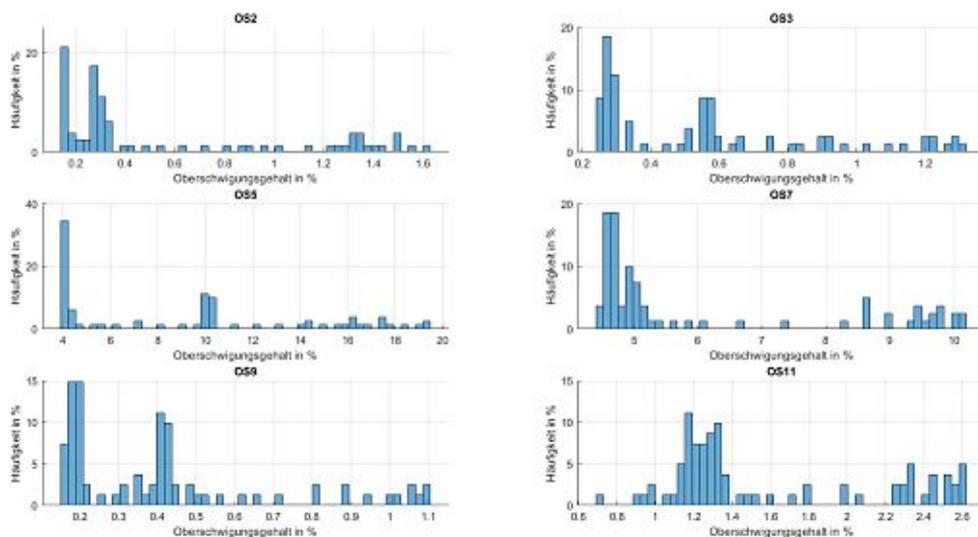


Abbildung 4.62: Stromüberschwingungen L3 BMW i3 Schnellladevorgang

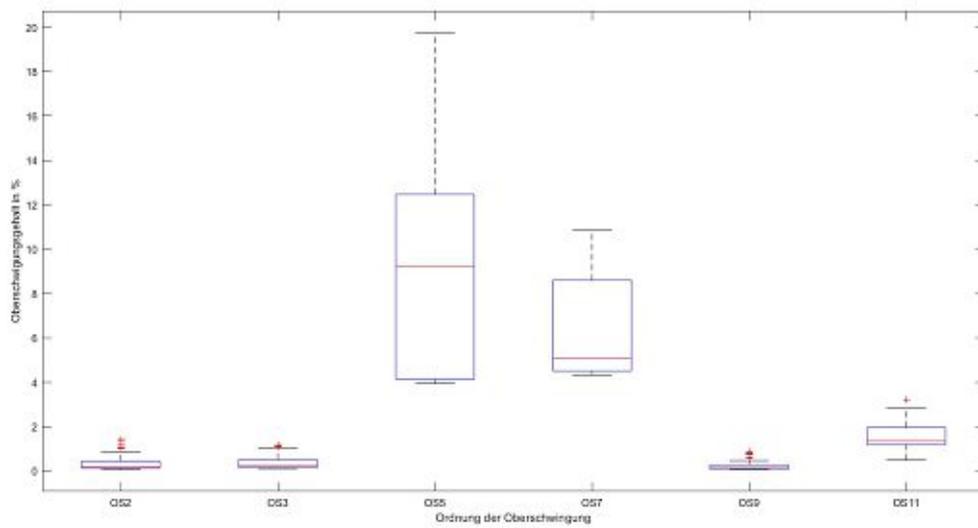


Abbildung 4.63: Boxplot OS BMW i3 an 150 kW Ladepunkten

## 5 Auswertung der Messergebnisse

### 5.1 Lademanagement

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die Ladevorgänge durch Lademanagement optimiert werden können. Dazu werden die aufgezeichneten Ladevorgänge aus Abschnitt 4.3.2 herangezogen. Ziel des Lademanagements ist es, die Belastung des Netzes, welche durch die Ladevorgänge entsteht, zu verringern. In diesem Abschnitt wird die Analyse des Lademanagements schrittweise beschrieben.

#### 5.1.1 Definition und Ziele von Lademanagement

Um die Auswirkung von Lademanagement im Fuhrpark untersuchen zu können, muss im ersten Schritt definiert werden, was durch das Lademanagement erreicht werden soll.

##### Definition und Begriffe zu Lademanagement

Allgemein bezeichnet der Begriff Lademanagement das Regeln der Ladeleistung der vorhandenen Ladepunkte. Das Lademanagement hängt unmittelbar mit dem Lastmanagement zusammen, bei dem die Leistung im Netz durch Ausgleich von Erzeugung (bzw. Einspeisung) und Verbrauch optimiert wird. Lademanagement ist ein statisches Verfahren, da die Leistung unabhängig von anderen Verbrauchern und Einspeisern im Netz reguliert wird. Das primäre Ziel dabei ist es, Ladevorgänge zu regeln, wobei einerseits auf die maximale Belastung durch die Ladeleistung und andererseits auf ausreichend hohes Aufladen des Fahrzeuges geachtet wird. Bei Lastmanagement handelt es sich im Gegensatz dazu um ein dynamisches Verfahren, bei dem auch Parameter berücksichtigt werden, die nicht unmittelbar mit den Ladevorgängen zusammenhängen [89].

Beide Verfahren sind notwendig, da Elektrofahrzeuge Verbraucher mit hoher Leistung sind, und da durch deren steigende Anzahl das Verteilnetz immer stärker ausgelastet wird. Durch Verhindern eines gleichzeitigen Ladens kann die Leistung zu einzelnen Zeitpunkten verringert werden. Sie wird dadurch zu anderen Zeitpunkten, an denen das Netz weniger ausgelastet ist, erhöht. Damit den Ladesäulen kommuniziert werden kann, wann die Ladevorgänge aus der Sicht des Netzes am besten begonnen werden können, sind intelligente Algorithmen notwendig, mit denen die Ladevorgänge anhand verschiedenster Mess- und

Einstellparameter gesteuert werden können. Weiters ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen Netz und Ladesäulen notwendig. Bei Lademanagement ist es wichtig, dass die Fahrzeugnutzer vorgeben, wann das Fahrzeug wieder benötigt wird, und bis zu welchem SOC das Fahrzeug mindestens geladen werden soll. Lademanagement darf nicht dazu führen, dass die Fahrzeuge nicht ausreichend geladen werden [90].

## Demand-Side-Management

Im Zusammenhang mit Lastmanagement wird oft der Begriff Demand Side Management (DSM) genannt, welcher im folgenden Punkt beschrieben wird.

DSM dient wie Lademanagement zur Vermeidung von Lastspitzen im Netz. Dazu werden die Fahrzeuge in der Regel nicht direkt nach der Fahrt, sondern zu Schwachlast Zeitpunkten geladen. Das Netz muss den Ladesäulen mitteilen, wann diese Schwachlastzeitpunkte sind. Weiters werden bei DSM andere Lasten und Einspeiser im Netz berücksichtigt. Teilweise ist es auch zusätzlich möglich, die Strompreise zu berücksichtigen, sodass den Kunden ein Laden zu den günstigsten Zeitpunkten ermöglicht wird.

Weiters ist es wichtig, den Bedarf der Nutzer mitberücksichtigen zu können. Kleinere Verteilnetzabschnitte, in welchen das DSM anhand dieser beschriebenen Parameter implementiert ist, werden als Microgrids bezeichnet. Dies wird in Abbildung 5.1 verdeutlicht [91], [92].

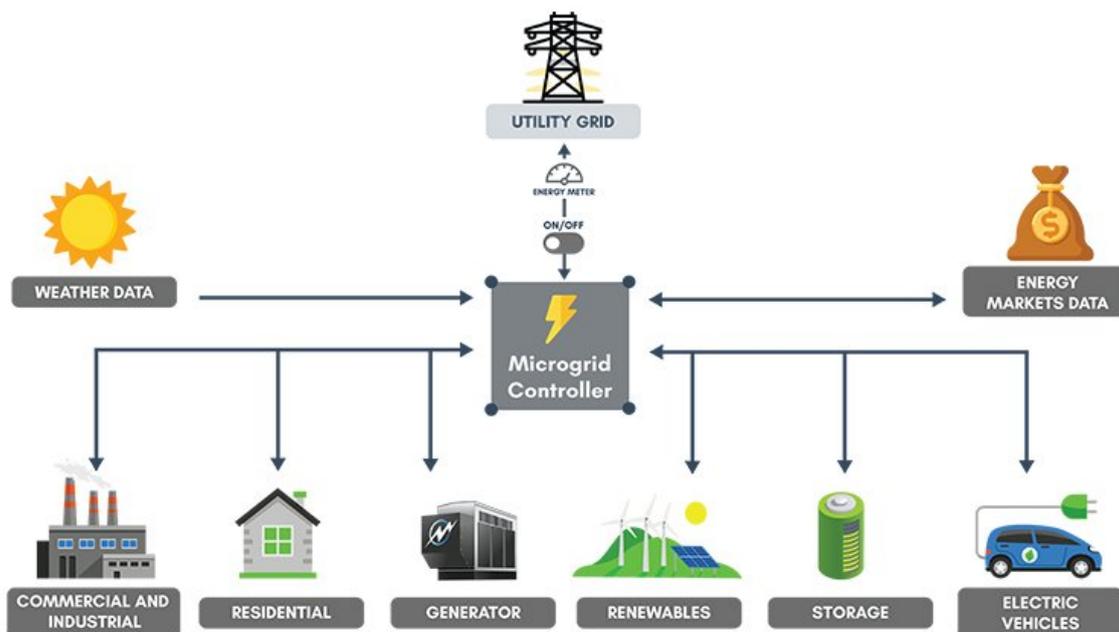


Abbildung 5.1: Microgrid Konzept [92]

Es gibt verschiedene Arten von DSM. Diese sind „Peak Clipping“, was bedeutet, dass Spitzenlasten vermieden werden, während „Valley Filling“ bedeutet, dass Lasten zu Schwachlastzeiten gezielt erhöht werden. „Peak Clipping“ in Kombination mit „Valley Filling“ ergibt das „Load Shifting“ und beschreibt das Verschieben der Ladevorgänge in Schwachlastzeiten beim Lademanagement. Mit der „Flexible Load Shape“ werden die Ladevorgänge durch das Lastprofil des Netzes gesteuert. „Strategic Growth“ und „Conservation“ bedeutet, dass die Ladevorgänge bei unzulässig hoher Netzauslastung gedrosselt (oder gestoppt) und bei geringer Netzlast (wenn möglich) mit höherer Ladeleistung durchgeführt werden. Bei der Untersuchung des Fuhrparks wird das DSM in Form von „Load Shifting“ untersucht. Die anderen Möglichkeiten werden nicht berücksichtigt [93].

### Gründe für Lade- und Lastmanagement

In den vorherigen Punkten wurde beschrieben, dass die Netzauslastung durch die beiden Verfahren reduziert werden soll. Bei unzulässiger Netzauslastung kann es passieren, dass die erlaubten Spannungsbänder im Netz nicht mehr eingehalten werden können.

Bei unzulässig hoher Belastung des Netzes durch Verbraucher mit hoher Leistung kann das (laut EN 50160) zulässige Spannungsband unterschritten werden. Vor allem bei hoher Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge kann es zu dieser Unterschreitung kommen. Wenn zu viele dezentrale Energieerzeuger Leistung in das Netz einspeisen, wird das erlaubte Spannungsband überschritten. Eine Möglichkeit dagegen vorzugehen wäre die Leistung der Einspeiser zu drosseln, oder Blindleistung statt Wirkleistung zur Spannungshaltung einzuspeisen [94]. Die weitaus bessere Lösung stellt das Anpassen der Ladevorgänge an die Energieeinspeisung dar, welche „Load Shifting“ entspricht. Aus der Sicht der Ladevorgänge ist es wichtig, das Unterschreiten des Spannungsbandes zu verhindern.

### Zusammenfassung

Um das Netz nicht unzulässig hoch auszulasten, und dadurch das erlaubte Spannungsband zu unterschreiten, müssen Ladevorgänge gesteuert werden. Die Lösungen dazu sind Lade- und Lastmanagement. In den weiteren Schritten werden die gewonnenen Erkenntnisse aus Abschnitt 5.1.1 auf die aufgenommenen Ladevorgänge aus Abschnitt 4.3.2 angewendet.

#### 5.1.2 Betrachtung der Ladevorgänge

Im zweiten Schritt werden die aufgenommenen Ladevorgänge betrachtet. 11 kW Ladepunkte bieten den besten Kompromiss zwischen Ladeleistung und Ladedauer. Teilweise werden die 3,7 kW-Ladepunkte in der Garage bereits auf 11 kW-Ladepunkte umgebaut. Bei den Ladepunkten, bei denen dies noch nicht der Fall war, sollte dies in naher Zukunft in

Erwägung gezogen werden. An den Ladepunkten der Schnellladesäule hat Lademanagement wenig Sinn, da die Ladevorgänge an diesen nur dann durchgeführt werden, wenn es zwingend notwendig ist. In der Datenerhebung konnte erkannt werden, dass dies sehr selten der Fall ist. Aus diesen Gründen wird das Lademanagement nur an den 11 kW-Ladepunkten untersucht.

In Abschnitt 5.1.1 wurden einige Konzepte des Lade- und Lastmanagements untersucht. Diese Konzepte werden auf die aufgenommenen Ladevorgänge angewendet. Eine Berücksichtigung anderer Einspeiser und Lasten im Netz ist im Projekt nicht vorgesehen, da keine Messung diesbezüglich vorhanden ist. Auf eine Verwendung von Standarderzeugungs- oder Lastprofilen wird in diesem Zusammenhang verzichtet. Durch das Lademanagement im Fuhrpark sollen so wenig Ladevorgänge wie möglich gleichzeitig, und so viele wie möglich in der Nacht in Schwachlastzeiten stattfinden.

Aus den in Abschnitt 4.3.2 betrachteten Zeitperioden wurden drei Tage herangezogen, die spezielle Merkmale aufzeigen. An zwei dieser drei Tage wurden überdurchschnittlich viele Ladevorgänge aufgezeichnet, weswegen diese als Referenz dienen sollen. Am dritten betrachteten Tag kam es zu zwei dringenden Ladevorgängen an zwei verschiedenen Fahrzeugen, die notwendig waren, da bald darauf weitere Fahrten mit den beiden Fahrzeugen durchgeführt werden mussten. Es wird dabei betrachtet, ob Lademanagement trotz diesem zeitlichen Konflikt möglich ist.

### 5.1.3 Regeln für das Lademanagement im Fuhrpark

Schritt drei besteht darin, Regeln festzulegen, nach denen die Ladevorgänge durchgeführt werden sollen. Die Hauptziele des Lademanagements im Fuhrpark sind das Aufteilen gleichzeitiger Ladevorgänge, welche nicht zwingend gleichzeitig stattfinden müssen, und das Verschieben der Ladevorgänge in Schwachlastzeiten. Diese beiden Ziele sind der Bedingung, dass die Ladevorgänge vollständig durchgeführt werden müssen, untergeordnet.

Für das Lademanagement muss ein Prioritätenschema entwickelt werden. Im Allgemeinen haben Fahrzeuge, die zuerst angesteckt werden, eine höhere Priorität. Es herrscht in diesem Fall das Warteschlangen-Prinzip. Damit ein funktionierendes Lademanagement implementiert werden kann muss es für jedes Fahrzeug möglich sein vorzugeben, bis zu welchem Zeitpunkt dieses spätestens vollgeladen sein muss. Das dient dazu, die Hauptbedingung zu erfüllen. Für die Fahrzeuge aus dem Pool muss diese Information vom Fuhrpark-Management vorgegeben werden. Lademanagement kann damit nur bei ausreichend guter Planung der Zuordnungen Fahrt - Fahrzeug - Zeitpunkt umgesetzt werden.

Für die Anpassung an die Last gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits können Stunden vorgegeben werden, in denen die Fahrzeuge wenn möglich nicht geladen werden. Diese

Stunden, in denen die Netzlast im Allgemeinen am höchsten ist, müssen im Vorhinein vorgegeben werden, sodass das Laden durch den Algorithmus in diesen Stunden wenn möglich gesperrt wird. In Österreich treten diese Spitzen an Wochentagen zwischen 18 und 20 Uhr am Abend auf [95]. Bei dieser Variante handelt es sich um statisches Lastmanagement. Das große Problem dabei ist, dass nicht auf unvorhersehbare Änderungen des Lastprofils oder auf erhöhte Einspeisung volatiler Energieerzeuger reagiert werden kann. Um kurzfristige Änderungen zu berücksichtigen wird die zweite Möglichkeit des Lademanagements benötigt, was oft als dynamisches Lastmanagement bezeichnet wird. Bei diesem handelt es sich jedoch um eine Variante, die erst in naher Zukunft implementiert werden kann, da im Moment noch nicht ausreichend Messsysteme vorhanden sind, welche die für dynamisches Lastmanagement erforderlichen Netzdaten liefern können. Für das Lademanagement im Fuhrpark erfolgt somit eine Beschränkung auf die statische Variante.

Zusammenfassend bedeutet das, dass die Ladevorgänge nacheinander durchgeführt werden, wobei dringende Ladevorgänge priorisiert durchgeführt werden. Wenn es möglich ist, werden Ladevorgänge in den Abendstunden zu Lastspitzen vermieden.

#### 5.1.4 Prüfung der Auswirkung von Lademanagement

Im vierten Schritt werden die drei Tage betrachtet, welche in Schritt 2 herangezogen wurden. Die beiden Tage, an denen viele Ladevorgänge durchgeführt wurden werden in diesem Zusammenhang als Starklasttage bezeichnet. Die Ladevorgänge an diesen Tagen, welche an 3,7 kW-Ladepunkten durchgeführt wurden, werden auf äquivalente Ladevorgänge an 11 kW-Ladepunkten umgerechnet. Es ist durch Aufteilung der Ladevorgänge an beiden Tagen möglich, dass immer nur ein Ladevorgang zur selben Zeit durchgeführt wird. Am ersten der beiden Tage sind alle Ladevorgänge um 06:00 Uhr beendet. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Ladevorgänge bis spätestens 06:00 Uhr in der früh abgeschlossen sein sollen, dann ist erkennbar dass es möglich ist, alle Ladevorgänge rechtzeitig abzuschließen. Werden in der Nacht gleichzeitige Ladevorgänge zugelassen, dann sind die Ladevorgänge um etwa 04:30 Uhr abgeschlossen. Dadurch ergibt sich eine Reserve von 1,5 h, wodurch es möglich ist, Ladevorgänge in den Abendstunden teilweise zu vermeiden. Auch am zweiten der Starklasttage ist es möglich, nur jeweils einen Ladevorgang zur selben Zeit durchzuführen. Durch das Verschieben der Ladevorgänge bleibt an diesem Tag ebenfalls eine Reserve von 1,5 h übrig, womit Laden in den Abendstunden erneut teilweise vermieden werden kann. Ein Ladevorgang zur selben Zeit bedeutet nicht, dass nur ein Ladepunkt belegt ist, da alle Fahrzeuge, die im betrachteten Zeitraum geladen werden sollen, an den Ladepunkten angesteckt sein müssen. Das Steuern dieser Ladepunkte erfolgt softwareseitig.

Da Lademanagement an Starklasttagen möglich ist, kann darauf geschlossen werden, dass dies auch an Tagen mit weniger Ladevorgängen möglich ist. Am dritten betrachteten

Tag kam es zu dem Fall, dass zwei Fahrzeuge zeitgleich geladen werden mussten, da beide für Fahrten gebucht waren. Das Verschieben der Ladevorgänge ist in diesem Fall nicht möglich. Werden alle Fahrzeuge betrachtet so fällt auf, dass viele der anderen Fahrzeuge vollgeladen sind, und nicht benutzt werden. Durch Benutzung eines vollgeladenen Fahrzeuges, anstatt eines der beiden Fahrzeuge, bei denen es zu einem Lade-Konflikt kommt, ist es weiterhin möglich, immer nur einen Ladevorgang zu einer bestimmten Zeit durchzuführen. Damit Lademanagement optimal implementiert werden kann ist auch eine organisierte Koordinierung seitens des Fuhrpark-Managements erforderlich.

### 5.1.5 Betrachtung der Extremfälle

Nachdem im vierten Schritt reale Fälle betrachtet wurden werden im fünften und letzten Schritt mögliche Extremfälle betrachtet. In diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass die notwendige Infrastruktur für die betrachteten Fälle vorhanden ist. Die Schnellladesäulen werden wie schon in den letzten Abschnitten nicht berücksichtigt. Für die Betrachtung des Extremfalls mit 11 Elektrofahrzeugen wird angenommen, dass alle Fahrzeuge komplett leergefahren werden, und um 16:00 Uhr zurück zur Garage kommen. Es bleiben damit 14 h übrig, um die Fahrzeuge vollständig (an 11 kW Ladepunkten) aufzuladen. Für die Betrachtung des Extremfalles werden die Vollladezeiten nach Tabelle 4.16 verwendet. Es ist durch Lademanagement möglich, nur maximal 5 der 11 Ladevorgänge gleichzeitig durchzuführen. Die maximale Summenleistung dieser Ladevorgänge beträgt etwa 44 kW, wobei diese etwa 3 Stunden lang im Netz auftritt. Dies entspricht in etwa der Leistung eines Ladevorganges an der Schnellladesäule. Ein Ladestop zu Spitzenlastzeiten am Abend ist bei diesem Extremfall nur auf Kosten einer höheren Summenleistung zu einem anderen Zeitpunkt möglich. Die Spitzenleistung steigt damit auf über 50 kW an. Wenn nicht alle Fahrzeuge vollständig geladen werden müssen (z.B. nur zu 75 %, da für die Fahrt am folgenden Tag nicht mehr benötigt wird) kann die Spitzenleistung auf unter 30 kW abgesenkt werden. Dazu ist eine gut organisierte Fahrten-Ladevorgang-Koordination über mehrere Tage erforderlich, was auch softwareseitig aufwändig zu implementieren ist.

Die weiteren Extremfälle, welche untersucht wurden, beziehen sich auf eine Erhöhung des Elektromobilitätsanteils. Genauer dazu wird in Abschnitt 5.2 erklärt. Da durch die Konstanz der Gleichzeitigkeitsfaktoren bei höheren Fahrzeugzahlen (siehe Abbildung 5.2) davon ausgegangen werden kann, dass die Ladeleistungen linear in Abhängigkeit der Fahrzeuganzahl steigen, können die Ergebnisse aus den Erkenntnissen für den momentanen Elektroauto-Anteil abgeleitet werden. Bei einer Steigerung auf 60 % (Verdoppelung der Elektroautos) werden im Extremfall 10 Fahrzeuge bei einer Summenleistung von etwa 88 kW gleichzeitig geladen. Eine Steigerung von 90 % (Verdreifachung) bewirkt damit 15 gleichzeitige Ladevorgänge mit 132 kW Ladeleistung. In beiden Fällen kann die Ladeleistung

durch organisierte Ladevorgang-Koordinierung noch weiter abgesenkt werden.

Werden die Starklasttage betrachtet, so treten ohne Lademanagement Summenleistungen von über 30 kW auf. Der betrachtete Extremfall mit Lademanagement kann somit durchaus als Normalfall bei nicht vorhandenem Lademanagement auftreten. Aus diesem Grund werden in der Szenarienanalyse die Maximalleistungen aus dieser Untersuchung herangezogen.

### 5.1.6 Zusammenfassung Lademanagement

Lademanagement bietet die Möglichkeit, die maximale Summenleistung im Netz zu reduzieren. Weiters können Ladevorgänge zu Schwachlastzeiten verschoben werden. Für gutes Lademanagement ist die Kenntnis der momentanen Parameter im Netz erforderlich. Es ist damit notwendig, ausreichend Messungen durchzuführen, und die Messwerte weiterzuverarbeiten.

Für Lademanagement sind umfangreiche Überlegungen bei der Implementierung und gute Koordinierung bei der Ausführung notwendig. Wenn dies gegeben ist, kann durch Lademanagement eventuell notwendige Netzausbaumaßnahmen ersetzen, und einen weiteren Ausbau der Elektromobilität begünstigen.

## 5.2 Szenarienanalyse

Basierend auf den im Fuhrpark vorhandenen Fahrzeugen wird in diesem Abschnitt eine Szenarienanalyse durchgeführt, bei der die Auswirkung einer unterschiedlichen Anzahl an Elektrofahrzeugen untersucht wird. Der Fahrzeug-Pool besteht insgesamt aus 36 Fahrzeugen, von denen 11 Elektrofahrzeuge und 25 Verbrennungs-Fahrzeuge sind. Das entspricht einem Elektromobilitätsanteil von 30,6%. Die Auswertungen bezüglich der Ladevorgänge in Abschnitt 4.3.2 und die Auswertung der Gleichzeitigkeiten in Abschnitt 4.3.3 wurden für einen Elektromobilitätsanteil von 30,6% durchgeführt. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich eine Erhöhung des Elektromobilitätsanteils auf die Prozesse im Fuhrpark auswirkt. Dazu ist es zu Beginn wichtig, die Gleichzeitigkeitskurve der 11 kW-Ladepunkte aus Abbildung 4.29 für mehrere Fahrzeuge darzustellen. Wie in Abschnitt 5.1.2 erwähnt wurde, sind 11 kW-Ladepunkte für den Fuhrpark die geeignetste Wahl, weswegen diese für die Szenarienanalyse betrachtet werden. Ein Ausbau auf 22 kW-Ladepunkte hätte nur dann Sinn, wenn die Ladezeit der Ladevorgänge verkürzt werden sollte - bezüglich Ladeenergie ergeben sich keine Vorteile, da die Ladezeit zwar halbiert wird, aber gleichzeitig auch die Ladeleistung verdoppelt wird, und die Ladeenergie somit gleichbleibt (bei Vernachlässigung der Verluste). Abbildung 5.2 zeigt die erweiterte Gleichzeitigkeitskurve für die 11 kW-Ladepunkte.

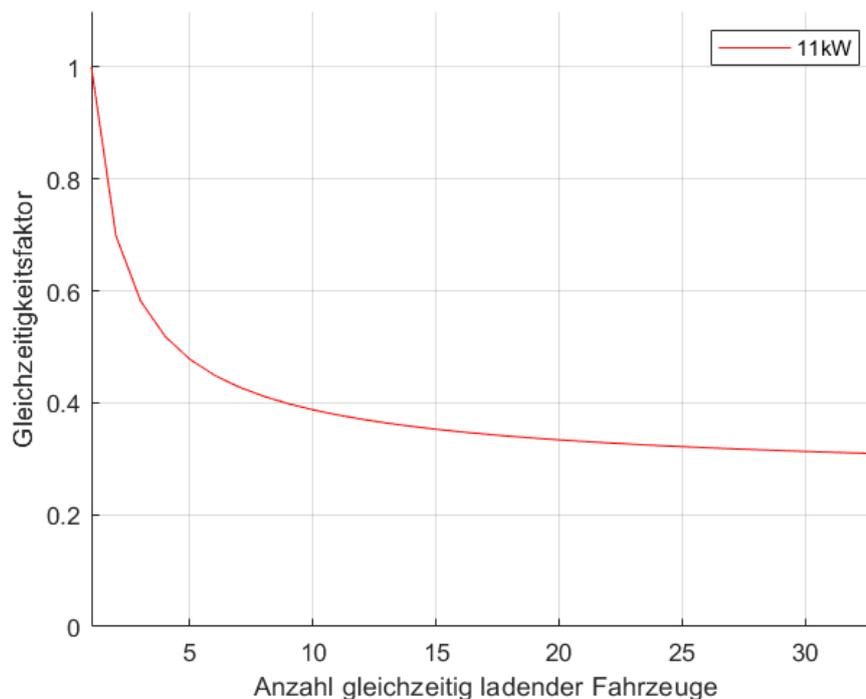


Abbildung 5.2: Erweiterte Gleichzeitigkeitskurve 11 kW

In der Abbildung ist erkennbar, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor bei höheren Fahrzeugzahlen im Vergleich zu den gegebenen 11 Fahrzeugen nicht mehr signifikant absinkt, wodurch

eine Vernachlässigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren bei der Erhöhung des Elektromobilitätsanteils gegeben ist. Es kann damit eine lineare Steigerung der zu untersuchenden Parameter bei einer Steigerung der Elektrofahrzeug-Anzahl angenommen werden.

In den folgenden Unterpunkten wird eine Erhöhung auf 60 % und 90 % untersucht. Zum Abschluss folgt eine Optimierung der Elektrofahrzeug-Anzahl.

### 5.2.1 Umstellung auf 60 Prozent Elektromobilität

Eine Umstellung auf 60 % bedeutet, dass 22 Fahrzeuge im Fuhrpark Elektrofahrzeuge und 14 Fahrzeuge Verbrennungs-Fahrzeuge sind. Im Vergleich zum Ausgangszustand bedeutet das eine Verdoppelung der Elektroauto-Anzahl. In der Garage sind 12 Ladepunkte mit einer Leistung von 11 kW vorhanden (wenn berücksichtigt wird, dass die 3,7 kW-Ladepunkte zeitnah ausgebaut werden). Die im Außenbereich liegenden Ladepunkte werden für die Szenarienanalyse nicht berücksichtigt, da an diesen auch Fahrzeuge geladen werden, die nicht aus dem Fahrzeug-Pool des Fuhrparks stammen. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Ladepunkte im Außenbereich ausreichend ist, falls einzelne Fahrzeuge nach Dienstschluss des Fuhrparks zurückkommen, und somit draußen geladen werden müssen. Laut der Erhebung der Ladevorgänge in Abschnitt 4.3.2 wurden bei der ursprünglichen Fahrzeug-Konstellation maximal fünf Fahrzeuge gleichzeitig mit einer maximalen Summenleistung (laut Abschnitt 5.1.5) von etwa 44 kW geladen. Das bedeutet jedoch nicht, dass nur fünf Ladepunkte besetzt sind, da vollgeladene Fahrzeuge nicht koordiniert abgesteckt werden. Auch bei vorhandenem Lademanagement sind mehr Fahrzeuge gleichzeitig angesteckt, obwohl diese nicht gleichzeitig laden. Für die Analyse sollte deswegen eine Reserve berücksichtigt werden. Bei einem Anteil von 60 % ist diese Reserve mit einer Anzahl von zwölf Ladepunkten gegeben. Da es mehr Ladepunkte als Fahrzeuge gibt liegt in dem Fall eine Überdimensionierung vor. Der Grund dafür ist, dass bei der Planung eine etwaige Erhöhung des Elektromobilitäts-Anteils schon berücksichtigt wurde.

Die Gleichzeitigkeitsfaktoren können laut Abbildung 5.2 bei einer Erhöhung des Elektroauto-Anteils vernachlässigt werden. Eine Verdoppelung der Fahrzeuge bewirkt somit eine Verdoppelung der Ladevorgangs-Parameter. Bei einem Anteil von 60 % kann damit (ohne Lademanagement oder beim Extremfall mit Lademanagement) von maximal zehn gleichzeitigen Ladevorgängen mit einer Leistung von ca. 88 kW ausgegangen werden. Eine Verstärkung der Anschlussleitung kann durch die erhöhte Leistung eventuell notwendig werden, je nachdem, wie viele Ladepunkte von einem Abgang im Verteiler versorgt werden. Bei einer Erhöhung der Abgangs-Anzahl und einer Versorgung von zwei Ladepunkten je Abgang ist keine Verstärkung der Anschlussleitungen notwendig. Weiters ist wichtig, dass der Transformator der Garage auf die höhere Leistung ausgelegt ist, und dass das Netz

durch die erhöhte Leistung der Ladevorgänge nicht unzulässig hoch belastet wird. Sollte die Erhöhung des Anteils umgesetzt werden muss dies durch eine Berechnung überprüft werden.

Bei einer entsprechenden Koordinierung der Ladevorgänge durch den Fuhrpark (Abstecken vollgeladener Fahrzeuge während der Fuhrpark-Betriebszeiten) ist eine Erhöhung der Ladepunkte bei Verdoppelung der Elektrofahrzeuge (durch die ursprüngliche Überdimensionierung) nicht zwingend notwendig. Es ist empfehlenswert, dennoch mehr Ladepunkte zu installieren, um eine Reserve für etwaige Probleme bei der Koordinierung einzubauen. Weiters ist eine erneute Überdimensionierung für zukünftige Erweiterungen des Fuhrparks sinnvoll. Mit einer Erhöhung von vier weiteren 11 kW-Ladepunkten auf insgesamt 16 Ladepunkte in der Garage sollte diese Reserve zumindest mittelfristig gegeben sein. Es ist erkennbar, dass trotz Verdoppelung der Fahrzeuge keine Verdoppelung der Ladepunkt-Anzahl notwendig ist.

### 5.2.2 Umstellung auf 90 Prozent Elektromobilität

Diese Umstellung bedeutet, dass 33 Fahrzeuge im Fuhrpark Elektroautos sind. Die restlichen drei Fahrzeuge sind Verbrennungs-Fahrzeuge. Bezogen auf die ursprüngliche Situation liegt damit eine Verdreifachung der Elektrofahrzeug-Anzahl vor, wodurch gleich vorgegangen werden kann, wie in Abschnitt 5.2.1, wobei statt einer Verdoppelung eine Verdreifachung betrachtet wird.

Es ist davon auszugehen, dass maximal 15 Ladevorgänge gleichzeitig stattfinden. Die Summenleistung dieser Ladevorgänge beträgt (wie in Abschnitt 5.1.5 beschrieben) in etwa 132 kW. Wie bei der Verdoppelung ist es wichtig, dass die Betriebsmittel durch die Erhöhung der maximalen Leistung nicht unzulässig hoch belastet werden, was bei einer Umsetzung durch eine Berechnung kontrolliert werden muss. Trotz der hohen Anzahl der gleichzeitigen Ladevorgänge ist diese Leistung geringer, als die Nennleistung der Schnellladesäule (mit 150 kW).

Da bei einem Elektroauto-Anteil von 90 % bis zu 15 Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden ist es notwendig, die Anzahl der Ladepunkte zu erhöhen. Bei gut organisierter Koordinierung durch das Fuhrpark-Personal reicht eine Erhöhung auf 16 Ladepunkte (15 notwendige und ein Ladepunkt als Reserve) aus. Auch bei dieser Umstellung ist es empfehlenswert, eine zusätzliche Reserve einzubauen. Wird (prozentuell) dieselbe Reserve, wie bei einer Umstellung auf 60 % berücksichtigt, erfolgt eine Erhöhung der Anzahl der Ladepunkte auf 24. Das ist bezogen auf die ursprüngliche Situation eine Verdoppelung der Ladepunkte in der Garage. Eine weitere mögliche Reserve ist das Erweitern der außenstehenden Ladepunkte, um später zurückkehrende Fahrzeuge problemlos laden zu können. Es ist damit

ersichtlich, dass trotz Verdreifachung der Fahrzeug-Anzahl nur etwa eine Verdoppelung der Ladepunkte notwendig ist.

### 5.2.3 Optimierung des Fuhrparks

Wie in den Szenarien beschrieben wurde, besteht der Fuhrpark nicht nur aus Elektroautos, sondern auch aus 25 Verbrennungs-Fahrzeugen (VW Golf TDI). Nachdem in den beiden letzten Punkten untersucht wurde, wie sich verschiedene Szenarien auswirken, wird in diesem Abschnitt beschrieben, welches Szenario das Optimum für den Betrieb im Fuhrpark darstellt. Es ist dabei zu beachten, dass die Optimierung hierbei nur eine Näherung ist, da die gesamten Fahrprozesse rein statistisch betrachtet werden.

#### Durchführung

Für die Optimierung ist es wichtig, das Fahrverhalten der Mitarbeiter mit den konventionellen Fahrzeugen zu untersuchen. Das Fahrverhalten mit den Elektrofahrzeugen kann aus Abschnitt 4.3.1 übernommen werden. Um das Fahrverhalten der Verbrennungskraftfahrzeuge zu untersuchen werden drei zufällige Fahrtenbücher aus dem Monat September 2020 ausgewertet. Dabei wird untersucht, welche der Fahrten ersatzweise durch Elektrofahrzeuge durchgeführt werden können, und bei welchen Fahrten die gefahrene Strecke weiter ist, als die maximale Reichweite der vorhandenen Fahrzeuge. Nach Abschnitt 3.4 wird bei allen Elektrofahrzeugen (unabhängig ob VW e-Golf oder BMW i3) von einer Reichweite von 200 km ausgegangen. Damit müssen alle Fahrten mit einer längeren Strecke weiterhin mit konventionellen Fahrzeugen durchgeführt werden.

Aus den Auswertungen konnte erkannt werden, dass knapp mehr als zwei Drittel der Fahrten der Verbrennungsfahrzeuge auch mit Elektrofahrzeugen durchgeführt werden können. Das bedeutet, dass 17 Verbrennungskraftfahrzeuge durch Elektroautos ersetzt werden könnten. Mit den ursprünglich vorhandenen elf Elektrofahrzeugen ergibt sich damit ein Gesamtanteil von 28 Elektrofahrzeugen, was 78 % des gesamten Fuhrparks entspricht.

Werden die Fahrten der Verbrennungs-Fahrzeuge betrachtet so kann festgestellt werden, dass diese den gesamten Tag gebucht werden. Es kommt damit nur selten zu zwei Fahrten mit demselben Fahrzeug am selben Tag. Durch die Nichtverfügbarkeit über einen gesamten Tag kann auch durch die Substitution mit Elektrofahrzeugen kein Fahrzeug eingespart werden kann. Die Gesamtzahl der Fahrzeuge muss somit unverändert bleiben.

Als problematisch stellt sich bei der Auswertung heraus, dass an einem Tag zeitgleich mit jedem der drei ausgewerteten Fahrzeuge eine Fahrt mit mehr als 200 km durchgeführt wurde. Anhand der durchgeführten Auswertung würde dies eine Gleichzeitigkeit von 1 bedeuten. Da nach Abbildung 4.28 die Gleichzeitigkeiten bei mehr betrachteten

Einheiten sinken (gilt auch für Fahrten) kann davon ausgegangen werden, dass nicht alle 25 Fahrzeuge gleichzeitig Fahrten mit mehr als 200 km durchführen müssen. Wichtig ist jedoch die Erkenntnis, dass zwischenzeitliches Laden während längerer Fahrten (oder während eines Aufenthaltes) wenn möglich durchgeführt werden sollte, um die Erhöhung des Elektromobilitätsanteils gewährleisten zu können. Für eine entsprechende Koordinierung seitens des Fuhrpark-Management sollte damit vorher angegeben werden können, ob die Möglichkeit des zwischenzeitlichen Ladens besteht. Weiters ist eine Bereitschaft dafür seitens der Mitarbeiter notwendig.

### Weitere Optimierung

In der vorherigen Betrachtung wurden nur die Elektrofahrzeugmodelle betrachtet, welche schon Bestandteil des Fahrzeugpools sind. Laut Tabelle 2.2 gibt es schon ausreichend Marktreife Modelle mit höheren Reichweiten. Für die weitere Optimierung wird der VW ID.3 herangezogen. Es wird dabei die Fahrzeug-Variante mit einer Batteriekapazität von 58 kWh untersucht, mit der Reichweiten über 300 km möglich sind [96].

Für alle aufgenommenen Fahrten mit Strecken zwischen 200 km und 300 km wird angenommen, dass diese mit einem VW ID.3 durchgeführt werden. Es ist damit möglich, 90 % der aufgenommenen Fahrten (mit Verbrennungskraftfahrzeugen) ersatzweise mit Elektrofahrzeugen durchzuführen. Damit können 22 der 25 Verbrennungs-Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden. In Summe ergibt das einen Elektroautoanteil von 90 % (33 Fahrzeuge), was genau dem betrachteten Szenario in Abschnitt 5.2.2 entspricht. Von den 22 Elektrofahrzeugen müssen 8 der Modelle VW ID.3 sein. Für die restlichen 14 Modelle können wahlweise VW e-Golf oder BMW i3 verwendet werden. Das sind weniger als bei der Optimierung ohne VW ID.3, da durch gleichzeitige weitere Fahrten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor mehr VW ID.3 notwendig sind, welche zu anderen Zeitpunkten die ursprünglichen Elektrofahrzeug-Modelle ersetzen können. Zu beachten ist, dass viele der Verbrennungs-Fahrzeuge für ganztägige Ausfahrten gebucht wurden, wodurch diese spät zum Dienstart zurückkommen. Es ist daher sinnvoll, die Anzahl der Ladesäulen außen (vor der Garage) zu erhöhen, damit diese Fahrzeuge problemlos geladen werden können.

Weiters konnte durch die Substitution verhindert werden, dass die gleichzeitigen langen Fahrten mit drei verschiedenen Verbrennungsfahrzeugen notwendig sind. Bei einer Erweiterung des Fuhrparks ist damit ein höherer Elektroautoanteil möglich.

### Mögliche Einsparungen

Um die Optimierung abschließen zu können wird untersucht, ob die Gesamtanzahl der Fahrzeuge reduziert werden kann. Da mit den (ursprünglichen) Verbrennungskraftfahrzeugen hauptsächlich ganztägige Ausfahrten durchgeführt werden, müssen diese in derselben

Anzahl durch Elektroautos ersetzt werden. Bei den ursprünglich vorhandenen elf Elektrofahrzeugen wäre eine Reduzierung nur ohne Berücksichtigung von Lademanagement sinnvoll. Um Lademanagement gewährleisten zu können, und somit die Netze zu entlasten, ist es notwendig, einen Anteil als Reserve einzuplanen. Laut den Untersuchungen in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 sind im Extremfall acht der elf ursprünglich vorhandenen Elektrofahrzeuge ausgelastet. Die restlichen drei Fahrzeuge werden als Reserve eingeplant. Bei den durch die Substitution neu hinzugekommenen Elektrofahrzeugen ist ebenfalls davon auszugehen, dass diese nicht zu jeder Zeit vollständig ausgelastet sind. Auch hierbei dienen die zusätzlichen Fahrzeuge als Reserve, um Lademanagement gewährleisten zu können.

Durch die negative Korrelation zwischen Optimierung der Anzahl und Entlastung der Netze durch Lademanagement können keine Fahrzeuge eingespart werden und die Gesamtanzahl der Fahrzeuge bleibt in jedem Fall unverändert.

### Zusammenfassung der Optimierung

Durch die Optimierung des Fuhrparks ergeben sich zwei mögliche Szenarien, bei denen unterschiedliche Elektroauto-Anteile möglich sind. Um den Anteil zu maximieren, müssen neue Elektroautomodelle im Fuhrpark verwendet werden. Durch die Implementierung ist ein Elektroautoanteil von 90 % möglich. Ohne diese Maßnahme ergibt sich ein maximaler Anteil von 78 %.

Die folgenden beiden Tabellen zeigen die beiden möglichen Szenarien.

Tabelle 5.1: Optimierung Fuhrpark

	VW e-Golf, BMW i3	VW Golf TDI	Gesamt
<b>Anzahl</b>	28	8	36
<b>Anteil/%</b>	78	22	100

Tabelle 5.2: Optimierung Fuhrpark inklusive VW ID.3

	VW e-Golf, BMW i3	VW ID.3	VW Golf TDI	Gesamt
<b>Anzahl</b>	25	8	3	36
<b>Anteil/%</b>	69	22	9	100

## 5.3 Erweiterung der Messungen

Aus den vorhergehenden Erkenntnissen wird untersucht, wie eine Erweiterung der Messung der Ladevorgänge Verbesserungen bewirken kann. Es wird dabei erläutert, wie die aktuellen Messungen erweitert werden müssen und welche Messungen zusätzlich sinnvoll wären. Weiters ist es wichtig, die Betriebsabläufe im Fuhrpark bezüglich der Ladevorgänge zu koordinieren, was ebenfalls kurz beschrieben wird.

### 5.3.1 Erweiterung der aktuellen Messung

Laut Abschnitt 5.2.3 ist es langfristig zielführend, den Elektromobilitätsanteil im Fuhrpark zu erhöhen. Bei einer größeren Anzahl an Elektrofahrzeugen sind gleichzeitig mehr Messgeräte notwendig. Um die Fahrten und Ladevorgänge direkt am Fahrzeug messen zu können müssen in jedem Fahrzeug die Aviloo-Messsysteme nach Abbildung 3.2 eingebaut sein, wodurch zusätzliche Aviloo-Messgeräte angeschafft werden müssen.

Durch die steigende Anzahl an Elektrofahrzeugen sind weiters mehr Ladesäulen in der Garage notwendig. Die zusätzlich notwendigen Abgänge im Verteiler müssen mit eigenen Stromwandlern ausgestattet werden, welche mit dem Siemens-Messsystem nach Abbildung 3.1 verbunden werden müssen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Messgeräte an den erweiterten Elektroauto-Anteil im Fuhrpark angepasst werden müssen.

### 5.3.2 Zusätzliche Messungen

Um einen optimalen Betrieb der Ladevorgänge gewährleisten zu können sind zusätzliche Messungen erforderlich. Primär geht es bei der Erweiterung der Messungen darum, das in Abschnitt 5.1 beschriebene Lademanagement im Fuhrpark umsetzen zu können.

Bei der Messung der Trafoabgänge im Niederspannungsverteiler werden mehrere Ladepunkte gleichzeitig erfasst. Um Lademanagement implementieren zu können ist es notwendig, zusätzlich jeden Ladepunkt einzeln zu messen. Es ist dahingehend sinnvoll, eine weitere Messung direkt an den Ladepunkten durchzuführen, um Kenntnis über die einzelnen Ladevorgänge zu erlangen. Darüber hinaus ist es notwendig, die Ladepunkte durch das Lademanagement-System steuern zu können.

Für die Entlastung des Netzes ist es sinnvoll, die Ladevorgänge an das momentane Lastprofil des Netzes anpassen zu können, was mit Lastmanagement gemacht wird. Um die Auslastung des Netzes zu jedem Zeitpunkt zu kennen ist eine Messung der Verbraucher und Einspeiser im Netz durch Smart Meter notwendig. Die von den Smart Metern gemessenen

Daten können in weiterer Folge für die Koordinierung der Ladevorgänge herangezogen werden. Eine Implementierung von Smart Metern in das Verteilnetz ist ein langfristiger Prozess.

Als Alternative können die Ladevorgänge im Fuhrpark anhand von Standard-Lastprofilen koordiniert werden, so lange noch keine ausreichenden Messungen mit Smart Metern im Netz vorhanden sind. Generell ist es sinnvoll, langfristig Lade- und Lastmanagement im Fuhrpark zu implementieren. Die zentrale Datenarchivierung im Datalab kann hierbei als erster Schritt in diese Richtung angesehen werden. Für die Implementierung von Lade- und Lastmanagement ist es notwendig, alle im Datalab archivierten Daten zusammen mit den koordinativen Vorgaben des Fuhrparks (siehe Abschnitt 5.3.3) mit einem intelligenten Lademanagement-Algorithmus zu verarbeiten, und damit die Ladevorgänge zu steuern. Es werden bereits viele Projekte zum Thema Lade- und Lastmanagement durchgeführt, wodurch die Implementierung in den kommenden Jahren erleichtert werden könnte.

### 5.3.3 Erweiterung der Koordinierung

Für die Optimierung der Ladevorgänge ist wie bereits erwähnt eine zusätzliche Koordinierung seitens des Fuhrpark Managements und seitens der Mitarbeiter notwendig. Es muss dabei vom Fuhrpark vorgegeben werden können, wann die Fahrzeuge wieder benötigt werden, um gegebenenfalls einzelne Fahrzeuge priorisiert aufzuladen. Weiters ist eine koordinierte Vergabe der einzelnen Fahrzeuge an die Mitarbeiter notwendig. Dabei gilt es, mehrere verschiedene Fahrzeuge zu verwenden, anstatt zwingend einen Ladevorgang durchzuführen, um dasselbe Fahrzeug ein weiteres Mal zu vergeben. Außerdem ist es sinnvoll, die Fahrzeuge für kurze Fahrstrecken auch dann an die Mitarbeiter zu vergeben, wenn diese nicht vollständig geladen sind. Zusätzlich ist es wichtig, dass das Fuhrpark Personal dafür sorgt, am Ende der Betriebszeit alle vollgeladenen Fahrzeuge abzustecken, und alle Fahrzeuge die über Nacht geladen werden müssen anzustecken, damit diese (koordiniert vom Lademanagement-System) bis zum nächsten Tag aufgeladen werden können.

Seitens der Mitarbeiter ist es notwendig, dass diese angeben, ob die Möglichkeit des zwischenzeitlichen Aufladens des Fahrzeuges besteht. Das Laden kann hierbei entweder am Zielort oder zwischendurch auf der Strecke erfolgen. In jedem Fall ist eine Kooperation der Mitarbeiter notwendig. Probleme könnten dadurch entstehen, dass nicht ausreichende Kenntnis zu Elektrofahrzeugen bei den Mitarbeitern besteht. Eine mögliche Lösung des Problems wären verpflichtende Schulungen, welche vor Ausborgen von Fahrzeugen absolviert werden müssen.

### 5.3.4 Zusammenfassung Erweiterungen

Durch die zusätzlichen Elektrofahrzeuge ist eine erhöhte Anzahl der entsprechenden Messgeräte notwendig. Um das langfristige Ziel der Implementierung von Lademanagement erreichen zu können ist es notwendig, alle Ladepunkte einzeln zu messen, und diese softwareseitig zu steuern.

Für Lastmanagement ist es notwendig, Kenntnis über den Lastzustand des Netzes zu haben, wofür Smart Meter notwendig sind. Zusätzlich zu den Erweiterungen der Messungen ist eine verbesserte Koordinierung der Ladevorgänge im Fuhrpark notwendig. All diese Vorkehrungen sind notwendig, um eine optimale Fahrzeuganzahl im Fuhrpark und minimale Auswirkungen auf das Bestandnetz gewährleisten zu können.

## 5.4 Auswirkung auf das Bestandsnetz

In diesem Abschnitt wird eine Lastflussrechnung basierend auf den bisherigen Messergebnissen durchgeführt. Dazu werden zuerst grundlegende Aspekte der Lastflussrechnung erläutert, welche für die weiteren Untersuchungen notwendig sind. Danach erfolgt eine Beschreibung der Vorgehensweise bei den Berechnungen. Aufbauend darauf werden die durchgeführten Szenarien beschrieben. Zum Abschluss des Kapitels erfolgt eine Ergebniszusammenfassung.

### 5.4.1 Einführung

In diesem Abschnitt werden Lastflussrechnungen umgesetzt. Um diese durchführen zu können müssen Knoten und Zweige definiert werden. Knoten dienen als Elemente, an die Einspeisungen und Lasten angeschlossen werden, während Zweige dazu dienen, die Knoten miteinander zu verbinden. Zu Beginn der Lastflussrechnung muss ein Slackknoten definiert werden, an dem der Betrag der Spannung und der Spannungswinkel vorgegeben werden. Bei der durchgeführten Lastflussrechnung wird die 20 kV-Netzeinspeisung als Slackknoten definiert. Das Ziel dieser Lastflussrechnungen ist es, die Zweigströme und Knotenspannungen in einem Netz zu berechnen. Die Zweigströme sind notwendig, um die Auslastung der Betriebsmittel (wie Leitungen und Transformatoren) zu ermitteln, wohingegen die Kenntnis der Knotenspannungen wichtig ist, um Spannungsbandverletzungen vorzubeugen [97]. Die Überprüfung, ob die Grenzwerte eingehalten werden erfolgt anhand der Spannungsbandaufteilung von Netz Niederösterreich.

Spannungsbandverletzungen treten durch zu hohe Spannungsabfälle an Kabeln und Leitungen auf. Vor allem bei Lasten mit hohen Strömen treten diese Spannungsbandverletzungen durch die höheren Spannungsabfälle auf.

Um die Spannungsänderung zu verringern kann Blindleistung in das Netz eingespeist werden. Werden zwei Sammelschienen (Spannungen  $U_A$  und  $U_B$ ) mit einer Leitung dazwischen betrachtet, welche über einen ohmschen Widerstand  $R$  und eine Reaktanz  $X$  verfügt, so kann deren Spannungsabfall wie folgt berechnet werden [94].

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \frac{R \cdot P_1 + X \cdot Q_1}{U_1} \approx \frac{R \cdot P_2 + X \cdot Q_2}{U_2} \quad (5.1)$$

Um den Spannungsabfall komplett zu kompensieren ( $\Delta U$  von Null) ist folgende Blindleistung notwendig.

$$Q_2 = -\frac{R}{X} \cdot P_2 \quad (5.2)$$

Eine Blindleistungseinspeisung trägt somit zur Spannungshaltung bei.

Für die Auslastung des Transformators ist dessen Nennleistung und dessen prozentuelle Kurzschlussspannung von Bedeutung. Als Kurzschlussspannung wird die Spannung bezeichnet, die an der Primärseite angelegt werden muss, damit auf der Sekundärseite des Transformators der Nennstrom fließt. Wichtig ist dabei, dass die Sekundärseite bei dieser Definition kurzgeschlossen sein muss. Andererseits bedeutet das, dass beim Betrieb mit Nennspannung an der Primärseite sekundärseitig der  $1/u_k$ -fache Nennstrom fließt. Bei Transformatoren mit geringerer Kurzschlussspannung sind damit die Ströme größer. Zusätzlich dazu gibt die Kurzschlussspannung das Verhalten des Transformators bei Belastung an [98]. Zusätzlich werden bei einzelnen Falluntersuchungen parallelgeschaltete Transformatoren betrachtet. Bei diesen ist zu beachten, dass diese in etwa gleiche Nennleistung (maximaler Unterschied von Faktor 3), die gleiche Kurzschlussspannung (um gleich ausgelastet zu sein), das gleiche Übersetzungsverhältnis und die gleiche Schaltgruppe besitzen [99].

Die Leitungen sind alle als Erdkabel ausgeführt. Hierbei ist es wichtig die Leitungslänge, den Widerstandsbelag, den Induktivitätsbelag und den Kapazitätsbelag anzugeben, um die Leistungsflüsse an den Leitungen korrekt zu berechnen. Außerdem ist die Angabe des thermischen Kurzschlussstromes  $I_{th}$  für die Berechnung der Auslastung wichtig. Als zusätzlicher Parameter wird der Anfangskurzschlusswechselstrom  $I_k$  angegeben.

Damit sind alle Grundlagen erläutert, und es wird mit der Beschreibung der Vorgehensweise fortgesetzt.

### 5.4.2 Vorgehensweise

Es werden verschiedene Fälle untersucht. Manche davon sind in der Realität bereits aufgetreten, bzw. können jederzeit auftreten. Bei anderen handelt es sich um Szenarien, welche zukünftig auftreten können. Weiters werden Extremfälle untersucht, die in der Regel nicht in der Realität auftreten werden.

Für die Berechnung wird ein vorhandenes Mittelspannungsnetz modelliert. Die Lasten, Kabeltypen und Kabellängen, sowie die Netzeinspeisung (Slack) werden aus der Lastflussrechnung eines früheren Projektes entnommen. Tabelle 5.3 zeigt die dabei verwendeten Mittelspannungskabel, und deren wichtigste Parameter. Diese werden aus dem Kabelhandbuch von Netz Niederösterreich entnommen.

Außerdem werden die verwendeten Niederspannungskabel und deren Parameter nach [100] und der PSS-Sincal Hilfe in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.3: Verwendete Mittelspannungskabel

Typ	$I_{th}$	$R'$	$X_L'$	$C'$	$I_k''$
N-A2XS(F)2Y 1x150RM/25	319 A	206 mΩ/km	118 mΩ/km	266 nF/km	14,1 kA
N-A2XS(F)2Y 1x240RM/25	417 A	125 mΩ/km	109 mΩ/km	306 nF/km	22,6 kA
E-PHMBU 3x50	175 A	387 mΩ/km	117 mΩ/km	270 nF/km	6,0 kA

Tabelle 5.4: Verwendete Niederspannungskabel

Typ	$I_{th}$	$R'$	$X_L'$	$C'$	$I_k''$
NYY-J 5x25mm <sup>2</sup>	133 A	727 mΩ/km	88 mΩ/km	0 nF/km	2,87 kA
NYY-O 1x95mm <sup>2</sup>	479 A	75,4 mΩ/km	77 mΩ/km	0 nF/km	27,60 kA
NYY-O 1x240mm <sup>2</sup>	280 A	193 mΩ/km	80 mΩ/km	0 nF/km	10,90 kA

Im Garagenverteiler befindet sich ein Transformator für Elektromobilität mit einer Nennleistung von 400 kVA, einer prozentuellen Kurzschlussspannung von 3,94 % sowie Schaltgruppe Dyn5. Die Tap-Position ist so eingestellt, dass ein Übersetzungsverhältnis von 52 vorliegt. Auf dem Typenschild des Transformators sind keine Eisenverluste, und keine ohmsche Kurzschlussspannung angegeben (welche für die Lastflussrechnung notwendig sind). Durch Vergleich mit Typenschildern von Transformatoren gleicher Dimension (aber anderem Fabrikat) wird mit Eisenverlusten von 430 W gerechnet. Die ohmsche Kurzschlussspannung wird laut PSS-Sincal Hilfe mit einem Wert von 1 % berücksichtigt. Um beide Parameter bei der Lastflussrechnung nicht zu vernachlässigen, werden damit diese Annahmen getroffen.

Eine Möglichkeit der Modellierung der Ladesäulen besteht darin, diese als einzelne Last zu definieren. Diese Darstellung dient für einzelne Berechnungen, für die nicht alle Lasten einzeln modelliert werden müssen. Wichtig ist, dass die Schnellladesäulen als eigene Last betrachtet werden. Da hier nur zwei Ladepunkte vorhanden sind, werden bei diesen keine Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass in PSS-Sincal das Erzeugerbezugssystem als Konvention gilt. Das bedeutet, dass eine Last mit negativer Wirkleistung und ein Einspeiser oder Erzeuger mit positiver Wirkleistung angegeben wird. Bezüglich der Blindleistung bedeutet ein negatives Vorzeichen induktive Blindleistung und ein positives Vorzeichen kapazitive Blindleistung.

Abbildung 5.3 zeigt eine schematische Darstellung des modellierten Mittelspannungsnetzes inklusive Lasten im Niederspannungsnetz. Die Garage und die betrachteten Ladesäulen (dargestellt als einzelne Last) sind in dieser Abbildung explizit hervorgehoben.

Werden alle Ladepunkte einzeln betrachtet erfolgt die Modellierung der Lasten nach Abbildung 3.4. Für die Berechnung werden die bereits ermittelten Gleichzeitigkeitskur-

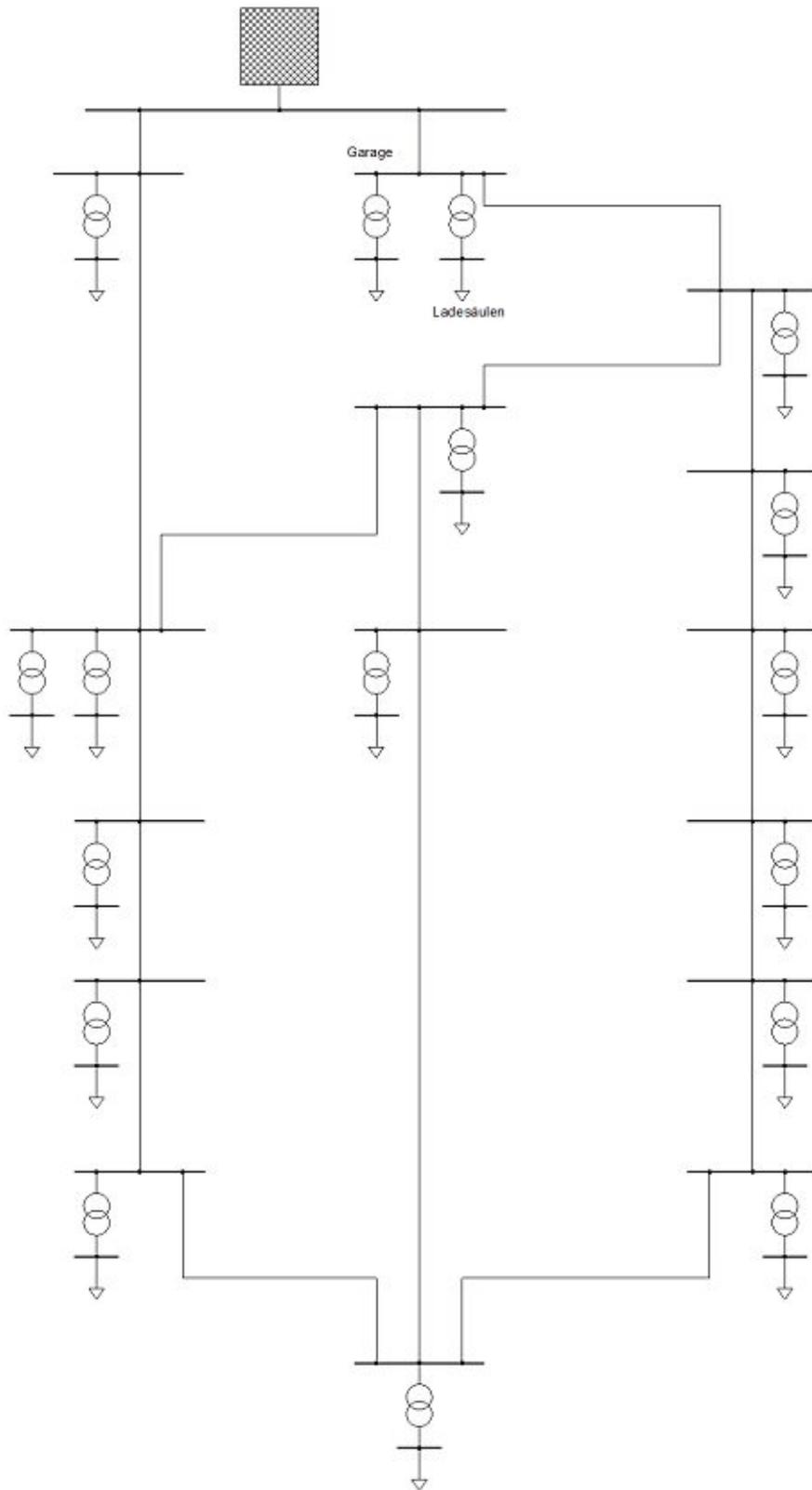


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau betrachtetes Netz

ven herangezogen. In den folgenden Unterpunkten werden die untersuchten Szenarien beschrieben.

### 5.4.3 Berechnung durchschnittlicher Tag

Durchschnittlicher Tag bedeutet, dass ein Tag aus den Messungen mit dem Aviloo Messsystem herangezogen wird, an dem es zu einer durchschnittlichen Auslastung (im Vergleich mit anderen Tagen) der Ladesäulen kam. Es werden zwei VW e-Golf gleichzeitig geladen. Einer der beiden lädt zweiphasig mit 7,2 kW ( $-625 \text{ var}$ ) und der andere einphasig mit 3,4 kW ( $-365 \text{ var}$ ). In der ersten Untersuchung werden die Fahrzeuge an zwei verschiedenen Ladesäulen geladen. Da es zu keinen signifikanten Änderungen im Mittelspannungsnetz kommt, werden nur die Abgänge zur Garage dargestellt. Es wird in der weiteren Beschreibung nur auf das Mittelspannungsnetz eingegangen, wenn signifikante Änderungen auftreten. Ansonsten wird auf eine Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

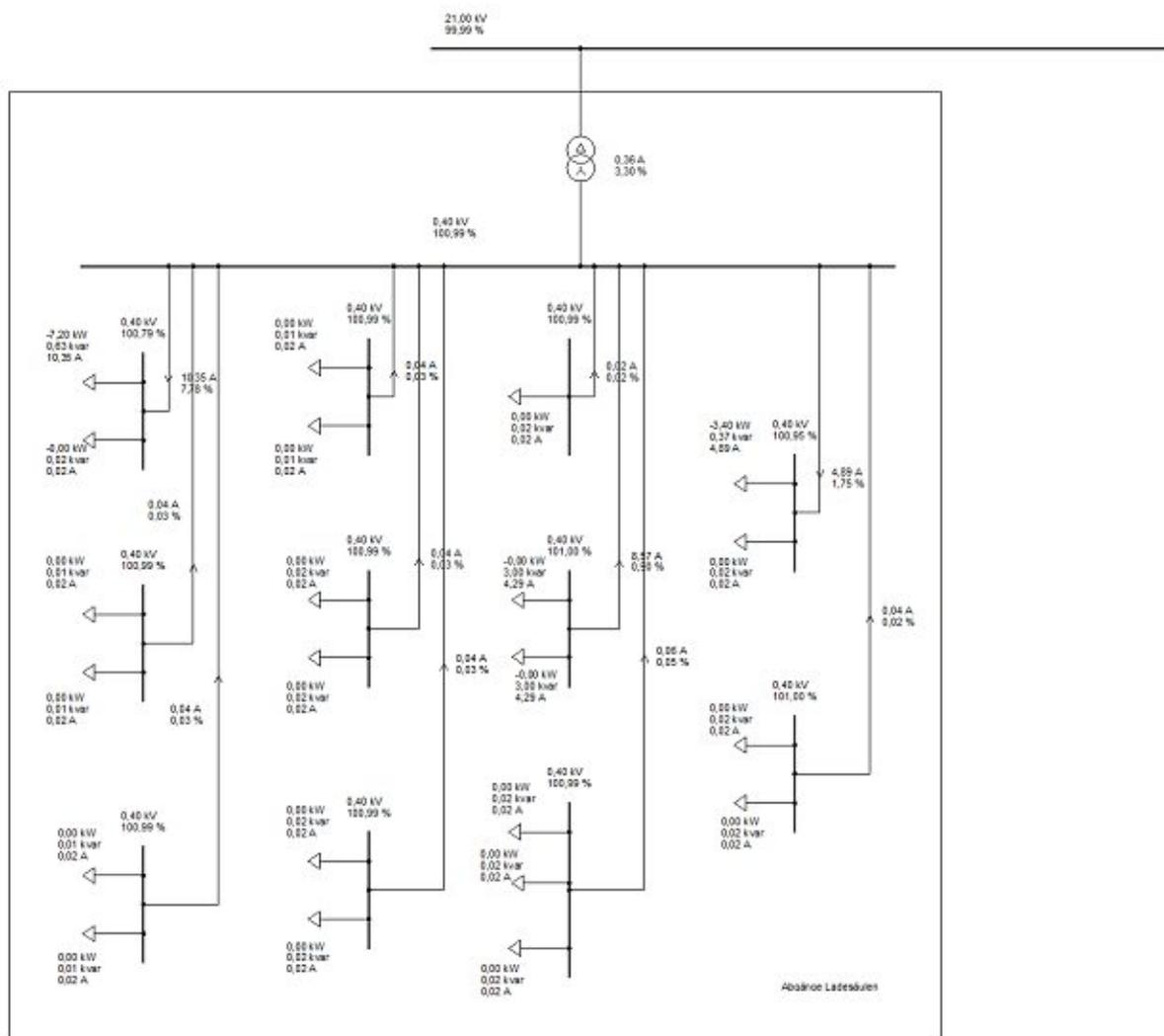


Abbildung 5.4: Durchschnittlicher Tag

Es kommt zu keinen Spannungsbandverletzungen. Die Knotenspannung auf der Niederspannungsseite des Transformators sinkt um 1 % gegenüber dem unbelasteten Fall ab. Die Knotenspannung an der Ladesäule, an der zweiphasig geladen wird, sinkt stärker ab (0,22 %) als bei der Ladesäule, wo einphasig geladen wird (0,05 %). Dasselbe gilt für die Leitungen. Der Transformator ist um etwa 1,7 % mehr ausgelastet, wobei die Auslastung mit 3,3 % sehr gering ist.

Dieselbe Untersuchung wurde durchgeführt für den Fall, dass beide Fahrzeuge an derselben Ladesäule laden.

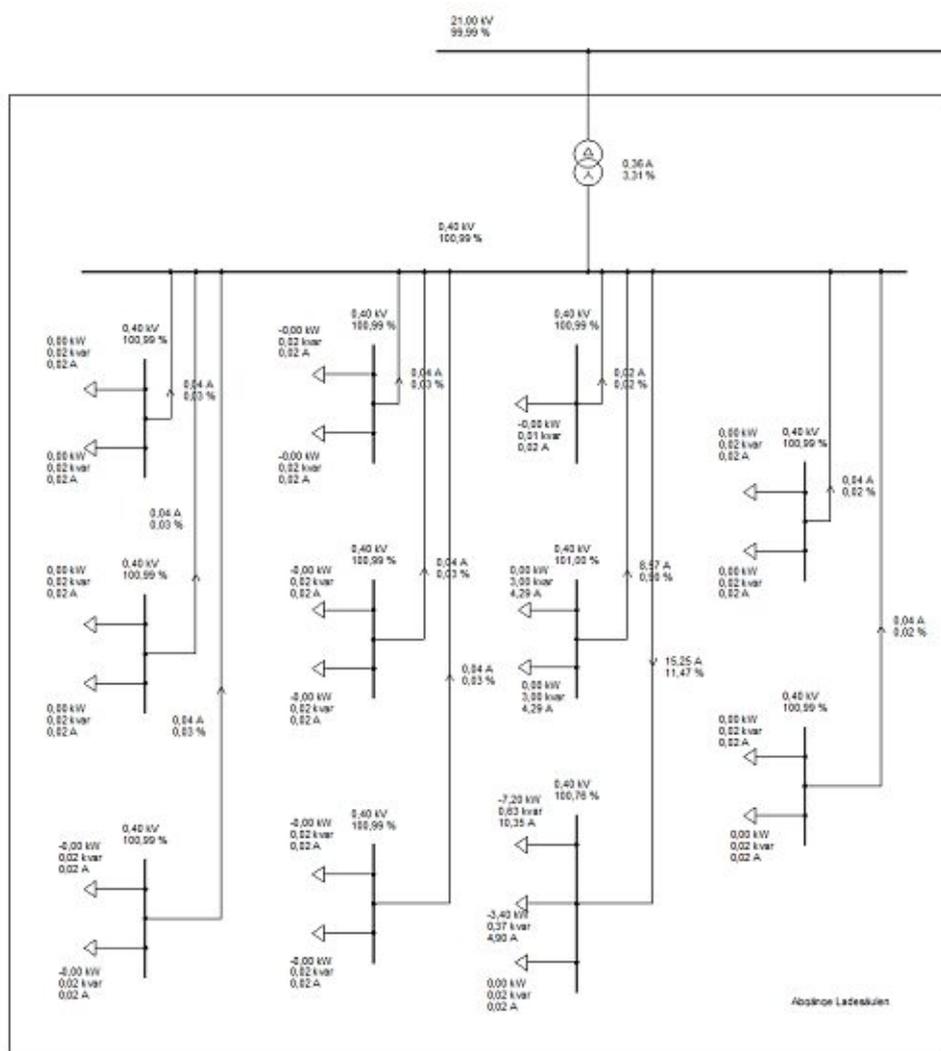


Abbildung 5.5: Durchschnittlicher Tag eine Ladesäule

Hier wird an LS9 geladen. Die Knotenspannung an dieser sinkt stärker ab, da zwei Ladevorgänge gleichzeitig an dieser stattfinden und somit mehr Strom über die Zuleitung zur Ladesäule fließt. Aus diesem Grund ist auch die Leitung stärker ausgelastet.

### 5.4.4 Stark frequenzierter Tag

An diesem Tag wurden zwei BMW i3 dreiphasig (Wirkleistung von 10,7 kW und Blindleistung von  $-525 \text{ var}$ ) und zwei VW e-Golf zweiphasig (Wirkleistung von 7,2 kW; Blindleistung von  $-625 \text{ var}$ ) geladen. Es wird dabei wieder untersucht, welche Unterschiede beim Laden an verschiedenen Ladesäulen auftreten.

In der ersten Untersuchung lädt der BMW i3 an zwei verschiedenen Ladesäulen, und der VW e-Golf lädt an zwei weiteren Ladesäulen.

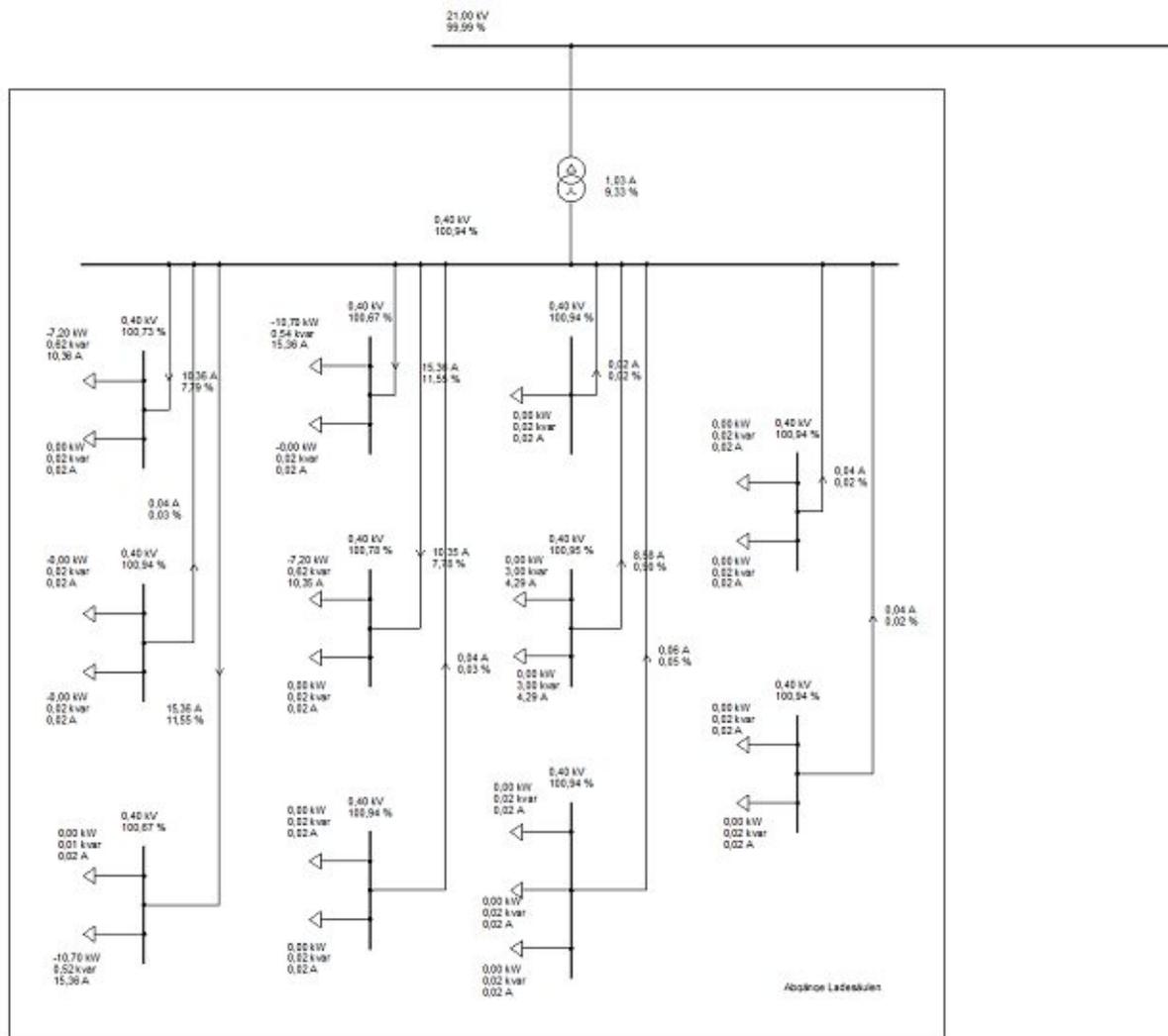


Abbildung 5.6: Stark frequenzierter Tag

Der Transformator ist zu 9,33 % ausgelastet. Auch in diesem Fall kommt es zu keinen Spannungsbandverletzungen. Die Knotenspannungen der Ladesäulen, an denen geladen wird, sinken beim BMW i3 stärker ab als beim VW e-Golf, da der Spannungsabfall an der Leitung durch den größeren Ladestrom beim BMW i3 höher ist, als beim VW e-Golf. Aus demselben Grund ist auch die Zuleitung der Ladesäule, an der der BMW i3 geladen

wird mit 11,55% mehr ausgelastet, als die Zuleitung der Ladesäule, an der der VW e-Golf geladen wird (7,79%). Dieselbe Untersuchung wird für den Fall durchgeführt, dass die Ladevorgänge nur auf zwei Ladesäulen aufgeteilt sind, wobei die unterschiedlichen Fahrzeugmodelle an verschiedenen Ladesäulen geladen werden.

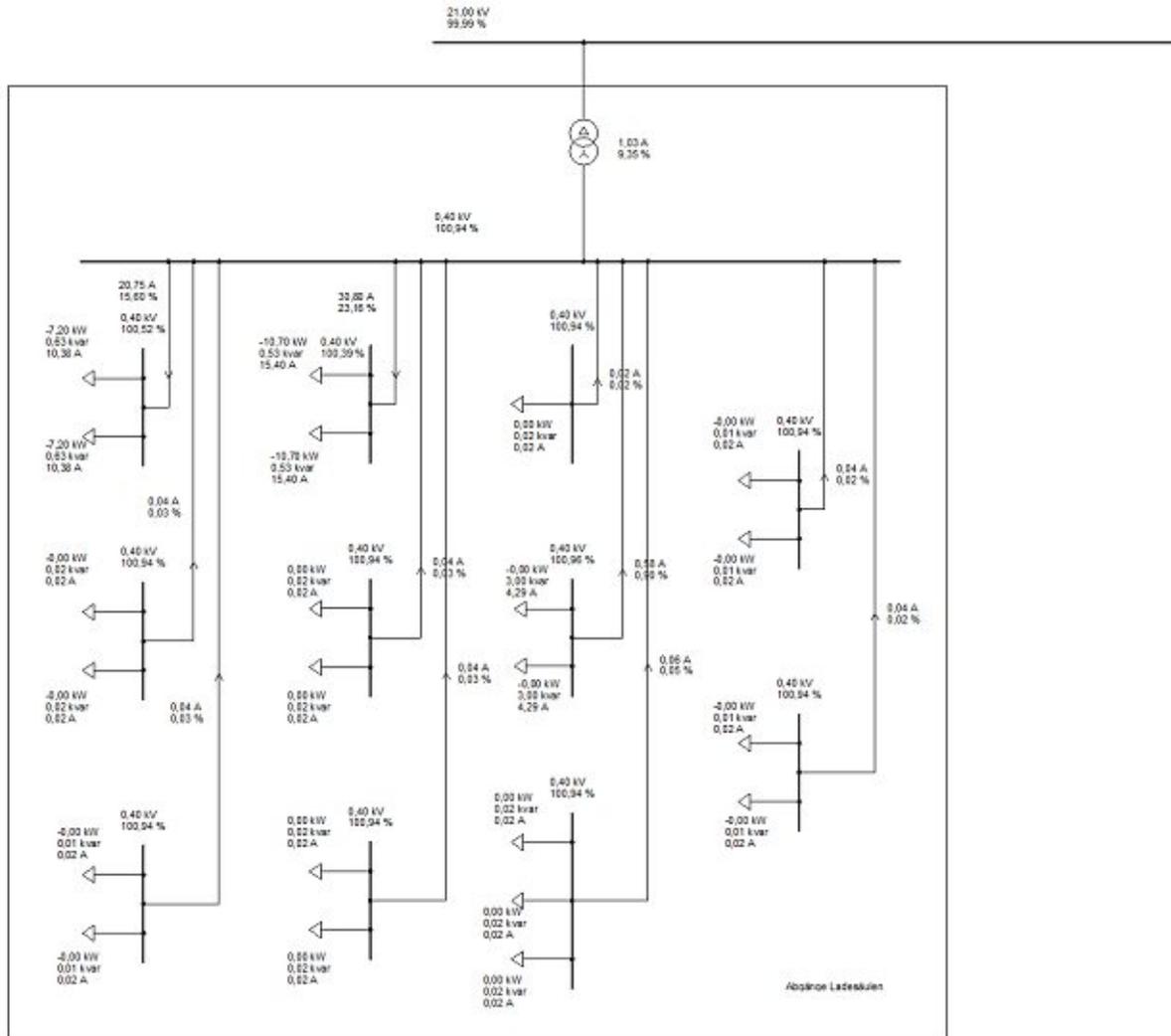


Abbildung 5.7: Stark frequentierter Tag 2 Ladesäulen

Im Vergleich zum aufgeteilten Laden kommt es zu keinen signifikanten Änderungen der Transformatorauslastung. Die Knotenspannungen an den betroffenen Ladesäulen sinken um etwa 0,2% - 0,3% stärker ab, als wenn nur ein Ladepunkt belastet wird. Die Zuleitungen sind doppelt so stark ausgelastet. Es ergeben sich damit Auslastungen von 15,6% (VW e-Golf) und 23,16% (BMW i3). Die Knotenspannungen an der Oberspannungs- und Unterspannungsseite des Transformators bleiben unverändert.

### 5.4.5 Extremfall - alle 11 Fahrzeuge laden gleichzeitig

#### 11 Kilowatt Ladevorgänge

Es wird hierbei der theoretische Fall betrachtet, dass alle Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden.

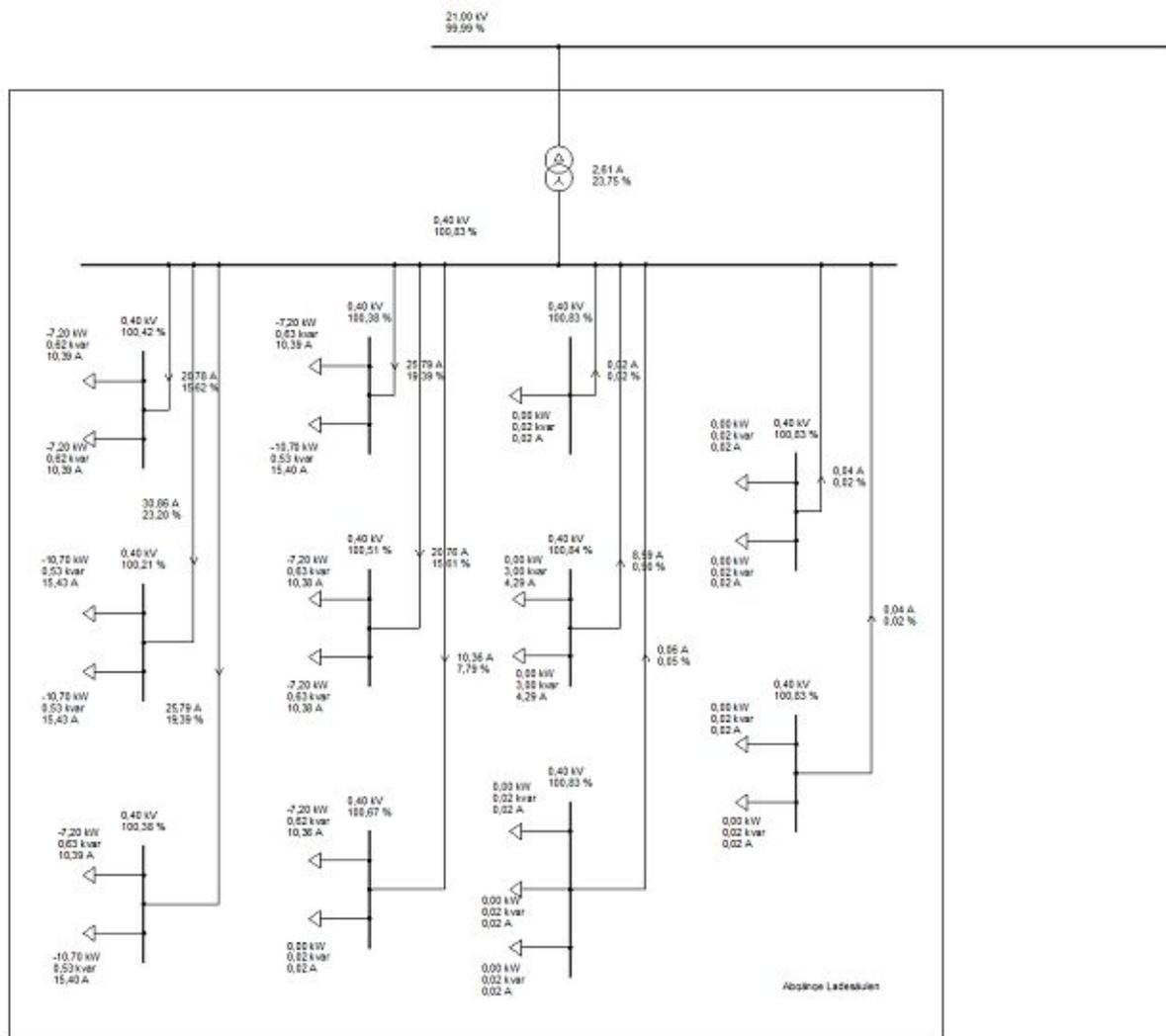


Abbildung 5.8: Extremfall - alle 11 kW

Der Transformator ist zu 23,75 % ausgelastet. Für die Zuleitungen zu den Ladesäulen ergibt sich eine maximale Auslastung von 23,2 %, welche bei der Versorgungsleitung der Ladesäule an welcher zwei BMW i3 geladen werden, auftritt. Die Knotenspannungen sinken nicht kritisch ab.





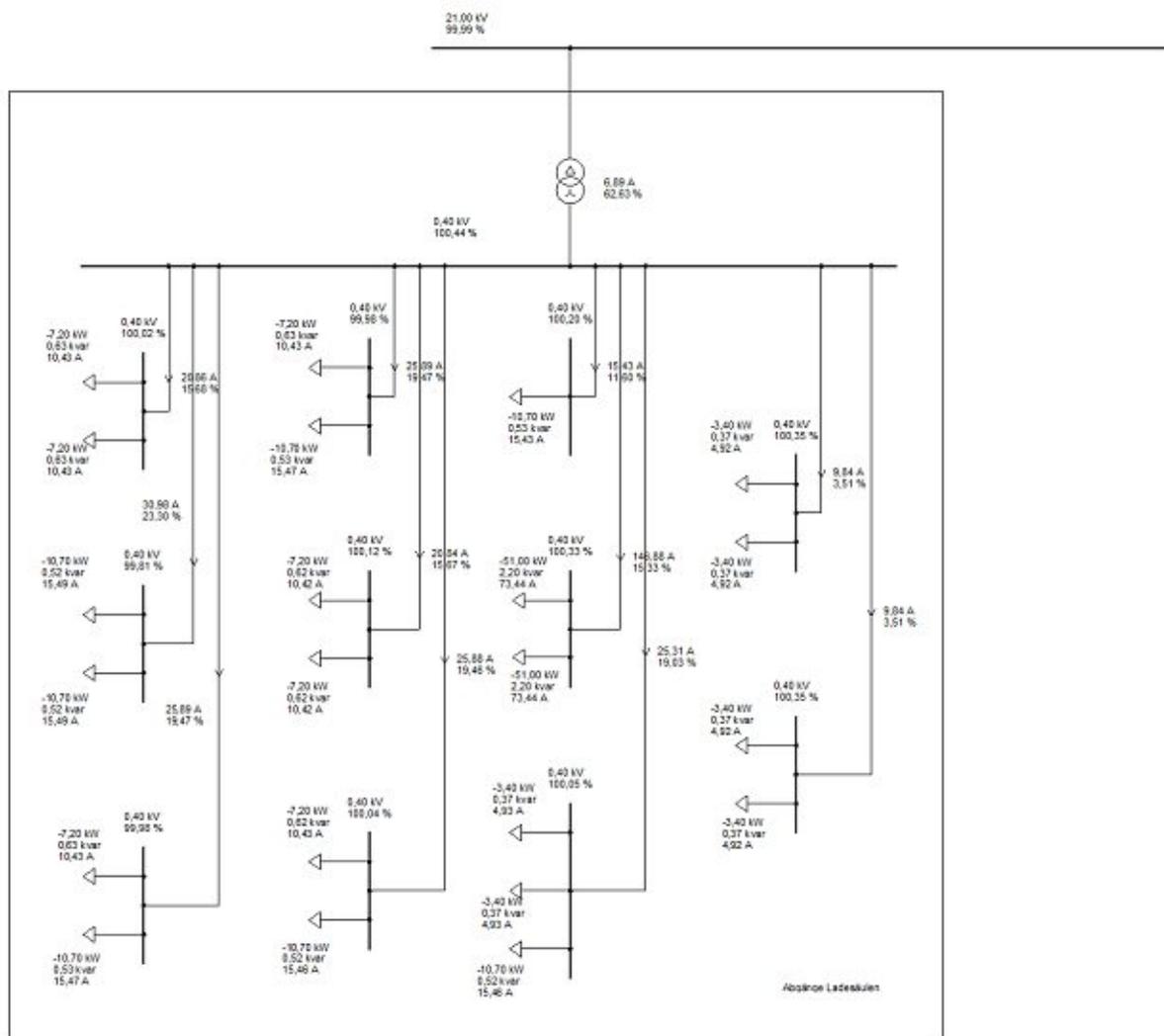


Abbildung 5.11: Extremfall - alle Ladepunkte belastet

### Schnellladevorgänge mit mehr Ladeleistung

An der Schnellladesäule ist es theoretisch möglich, mit bis zu 150 kW Ladeleistung zu laden. Mit den Poolfahrzeugen (VW e-Golf und BMW i3) sind Ladeleistungen von bis zu 51 kW möglich. Es könnte jedoch theoretisch vorkommen, dass externe Fahrzeuge mit Leistungen von 150 kW laden. Dieser theoretische Fall wird hierbei überprüft. Da keine Messwerte für diese Untersuchung vorliegen wird mit derselben Blindleistung 2,2 kVar kapazitiv) wie beim VW e-Golf und BMW i3 gerechnet. An den restlichen Ladesäulen werden nur Ladevorgänge von Poolfahrzeugen durchgeführt.

Für diesen theoretischen Fall ist der Transformator mit einer Auslastung von 99,77% beinahe überlastet. Es wäre somit notwendig, den Transformator gegen einen Transformator mit höherer Nennleistung auszutauschen oder einen zweiten Transformator gleicher Bauart parallel zu schalten, um die Auslastung des Transformators zu senken. Letzteres bewirkt eine Auslastung von etwa 50% pro Transformator, womit die Auslastung im zulässigen Bereich

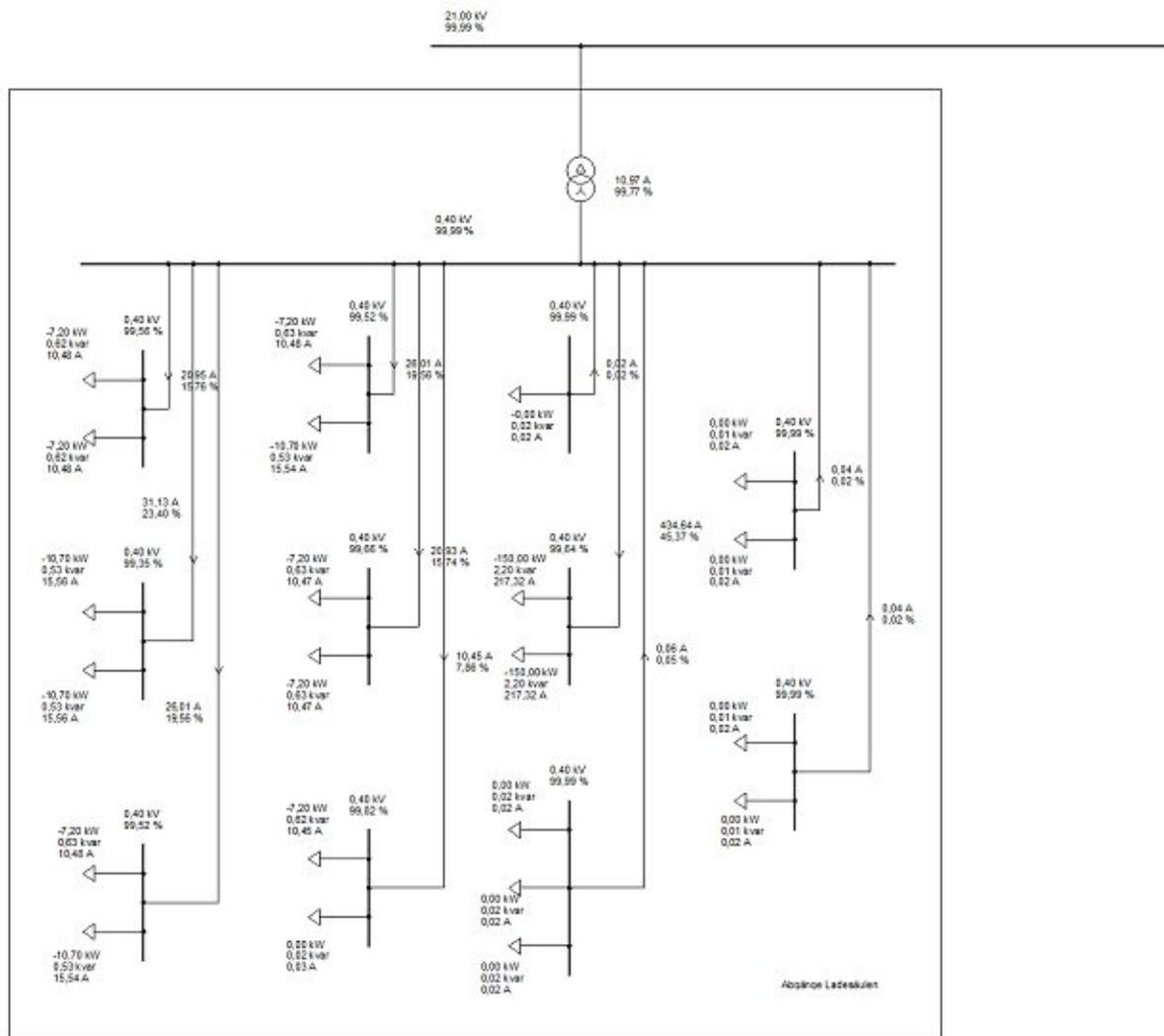


Abbildung 5.12: Extremfall - Schnellladevorgänge mit mehr Leistung

ist. Die Zuleitungen zu der Schnellladesäule sind zu 45,37 % ausgelastet. Ladevorgänge bei den Poolfahrzeugen mit einer Ladeleistung von 50 kW dauern in etwa eine Stunde. Bei Fahrzeugen mit ähnlicher Batteriekapazität dauert damit ein Ladevorgang mit 150 kW Ladeleistung nur etwa 20 min. Die Zuleitung ist damit nur kurze Zeit zu 45 % ausgelastet. Aufbauend auf diesen Fall wird untersucht welche Änderungen auftreten, wenn zusätzlich an den restlichen freien Ladepunkten Ladevorgänge durchgeführt werden.

Der Transformator ist dabei zu 113,22 % ausgelastet, was der maximal möglichen Auslastung der vorhandenen Konstellation entspricht. Wie bei der vorherigen Betrachtung ist es notwendig, den Transformator zu verstärken. Da in Zukunft mit einem Ausbau der Elektromobilität zu rechnen ist, wird die Transformatorverstärkung bei den Szenarien genauer beschrieben.

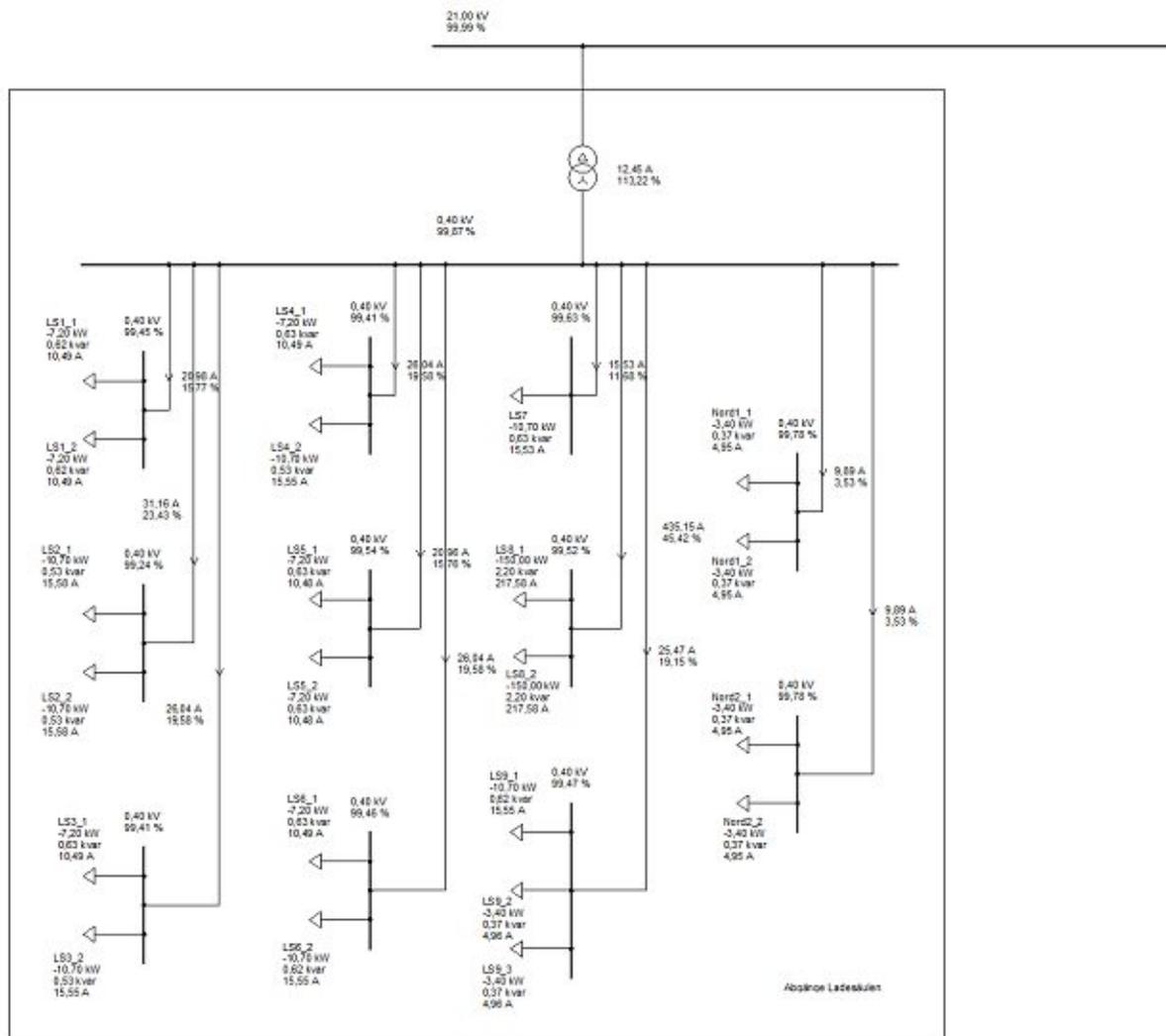


Abbildung 5.13: Extremfall - maximale Belastung

#### 5.4.6 Vergleich Laden an 11 Kilowatt Ladepunkten

Diese Untersuchung dient dazu herauszufinden, wie sich die Ladevorgänge des BMW i3 und des VW e-Golf auf das Netz auswirken. Beide Fahrzeuge haben unterschiedliche Ladeleistungen, wodurch mit leichten Abweichungen der Parameter zu rechnen ist. Die meisten Erkenntnisse bezüglich Auslastung der Betriebsmittel und Auswirkung auf die Knotenspannungen wurden bereits in vorhergehenden Untersuchungen erläutert. Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf den Unterschieden der beiden Ladevorgänge. In Abbildung 5.14 ist die Lastflussrechnung der Ladevorgänge beim VW e-Golf ersichtlich. Bei der Lastflussrechnung der BMW i3 laut Abbildung 5.15 Ladevorgänge wurden lediglich die Lastparameter geändert. Aus den Berechnungen erfolgt eine Gegenüberstellung der Auswirkungen in Tabelle 5.5.

Durch die höheren Ladeleistungen und den daraus resultierenden höheren Ladeströmen sind die Betriebsmittel beim BMW i3 Ladevorgang stärker ausgelastet als beim VW

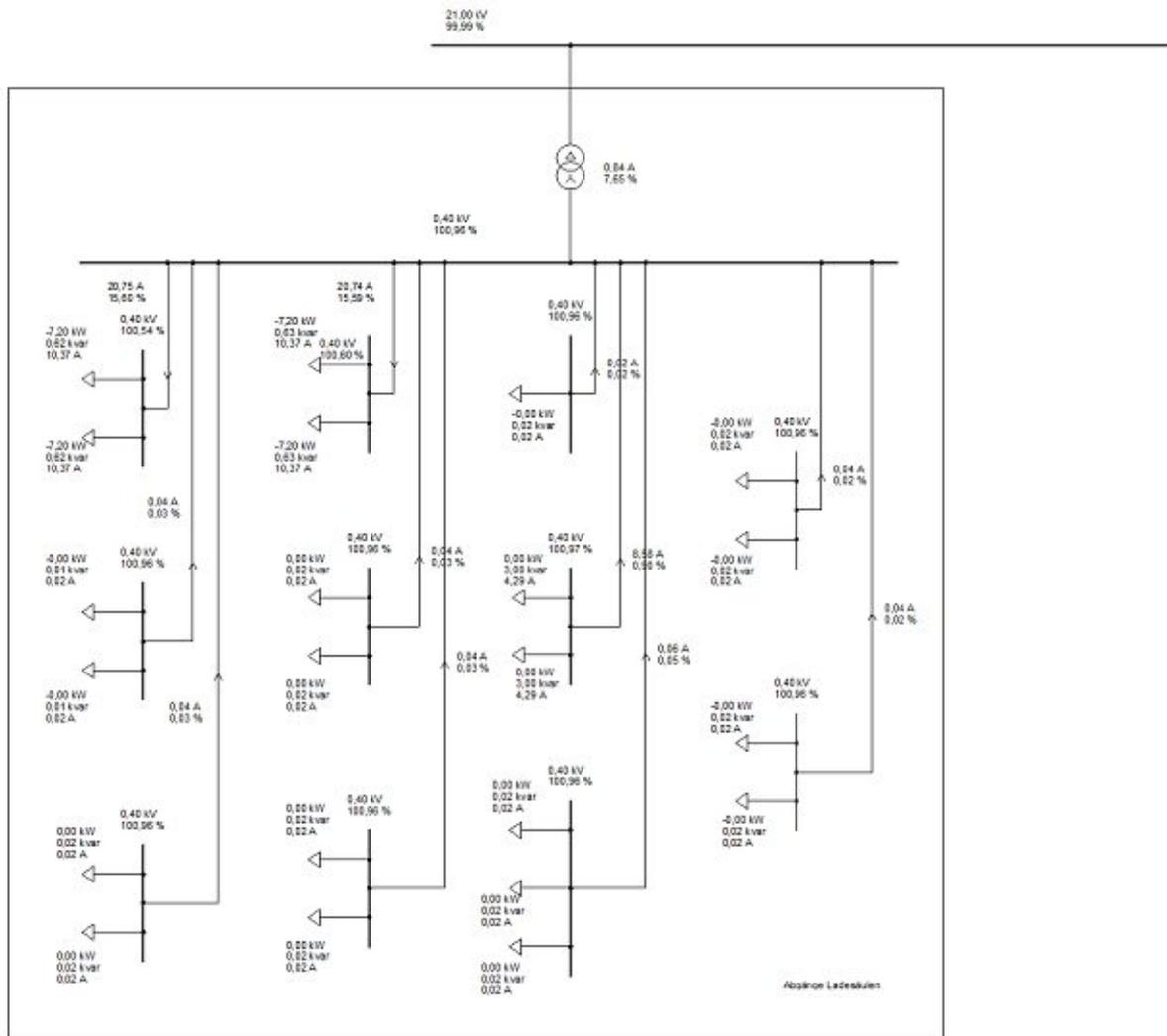


Abbildung 5.14: 11 kW VW e-Golf

Tabelle 5.5: Vergleich Netzauswirkung VW e-Golf - BMW i3

	VW e-Golf	BMW i3
Auslastung Transformator/%	7,65	11,07
$\Delta U_{\max}/\%$	0,42	0,62
max. Auslastung Zuleitung/%	15,60	23,18

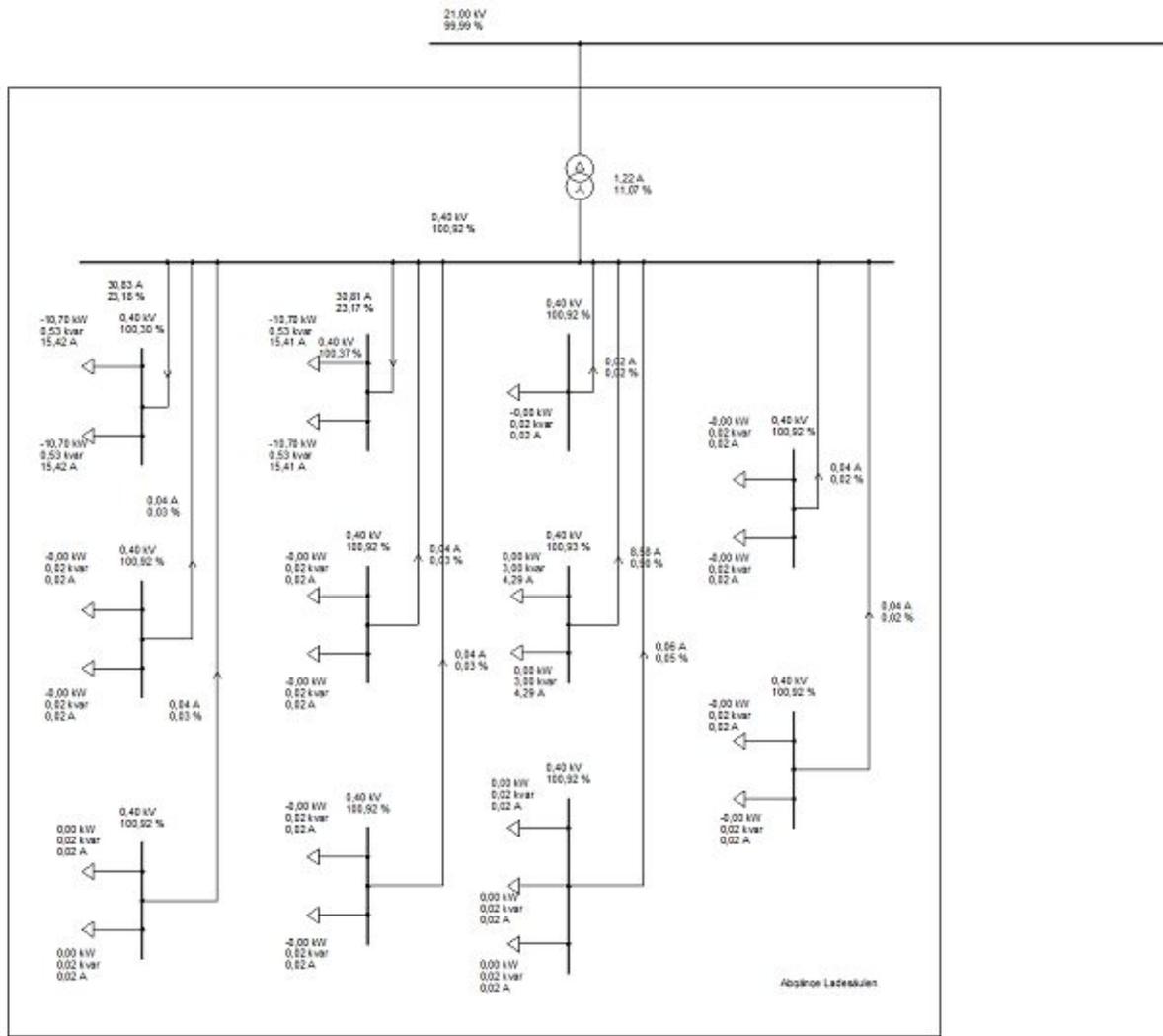


Abbildung 5.15: 11 kW BMW i3

e-Golf Ladevorgang. Bezüglich der Knotenspannungen kommt es beim BMW i3 durch die höheren Ladeströme zu höheren Spannungsabfällen. Es folgt daraus die Erkenntnis, dass sich die Ladevorgänge des VW e-Golf weniger stark auf das Netz auswirken. Wird jedoch betrachtet, dass die Ladevorgänge in der Regel länger dauern, so ist das Netz zwar weniger stark, aber länger belastet.

#### 5.4.7 Auswirkung Ladepunkte mit unterschiedlicher Nennleistung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Auswirkung unterschiedlicher Fahrzeugmodelle untersucht wurde, wird in diesem Abschnitt die Auswirkung unterschiedlicher Nennleistungen der Ladepunkte untersucht. Es werden dabei die Ladevorgänge der Poolfahrzeuge untersucht. Für die Betrachtung werden somit 11 Ladepunkte herangezogen.

## Alle Ladepunkte mit 3,7 Kilowatt Nennleistung

Alle elf Fahrzeuge laden einphasig an 3,7 kW Ladepunkten. Um diesen Fall in der Realität umsetzen zu können, müsste die Leistung seitens der Fahrzeuge begrenzt werden, da in der Garage Ladepunkte mit 11 kW Ladeleistung vorhanden sind. Abbildung 5.16 zeigt die Berechnung. Für die Modellierung der VW e-Golf Ladevorgänge werden den Lasten Leistungen von 3,4 kW und  $-365 \text{ var}$  zugeordnet. Die BMW i3 Ladevorgänge werden mit 3,7 kW ( $-485 \text{ var}$ ) Lasten modelliert. Nicht verwendete Ladesäulen werden als Lasten mit einer Blindleistung von  $-15 \text{ var}$  (kapazitiv) modelliert.

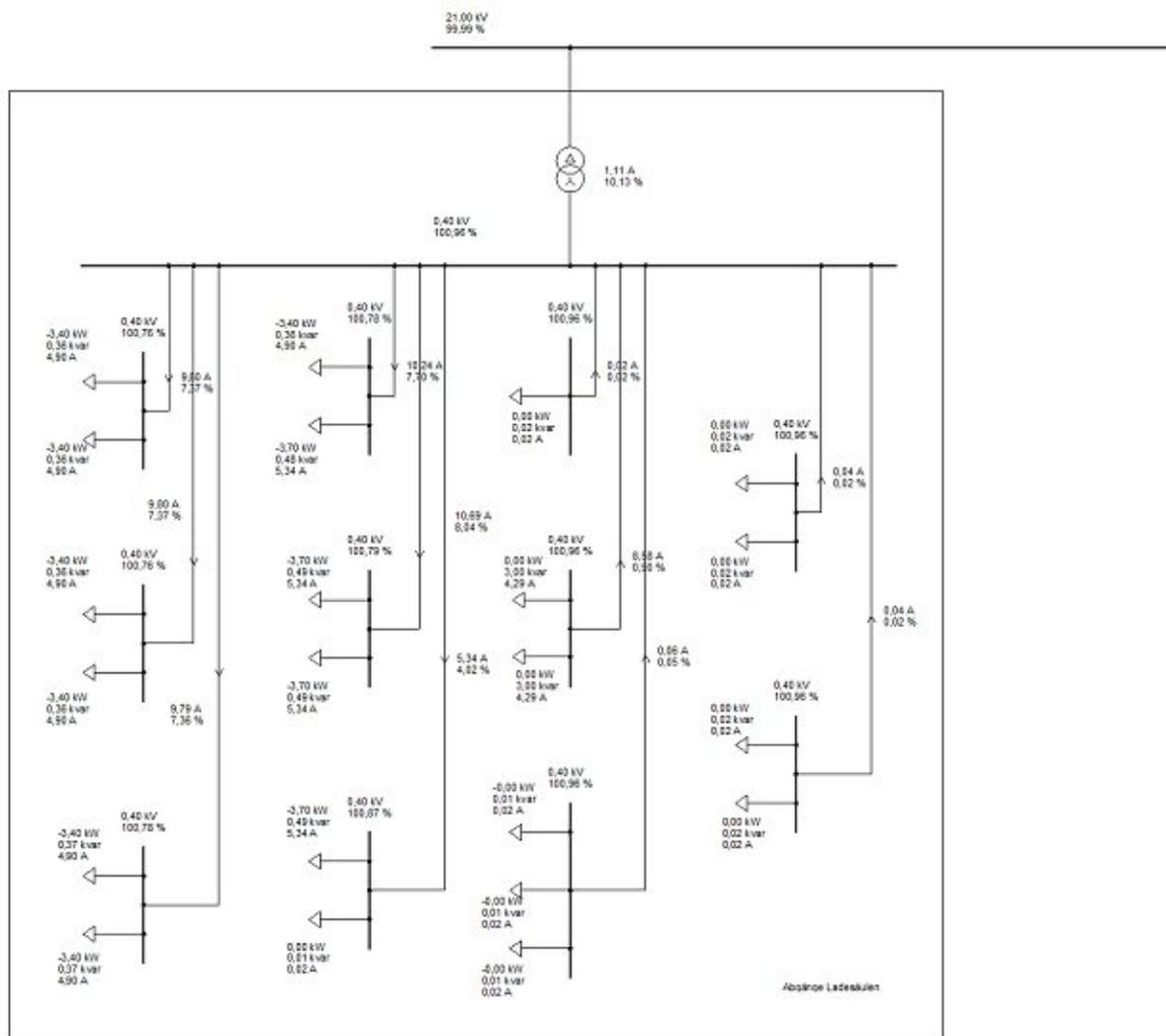


Abbildung 5.16: 3,7 kW Auswirkung

Hierbei ist der Transformator zu etwa 10 % ausgelastet. Für die Leitungen ergibt sich eine maximale Auslastung von 8,04 % (beim BMW i3 Ladevorgang). Der maximale Knotenspannungsabfall beträgt 0,2 %.

### Alle Ladepunkte mit 11 Kilowatt Nennleistung

Dieselbe Untersuchung wird mit 11 kW Ladepunkten durchgeführt. Die Wirkleistung des VW e-Golf Ladevorganges beträgt 7,2 kW und die Blindleistung beträgt  $-365 \text{ var}$ . Für den BMW i3 betragen diese Parameter  $-10,7 \text{ kW}$  und  $-15 \text{ var}$ . Weiters wird für die nicht verwendeten Ladesäulen eine Blindleistung von  $-15 \text{ var}$  (kapazitiv) angenommen. In Abbildung 5.17 ist die Berechnung ersichtlich.

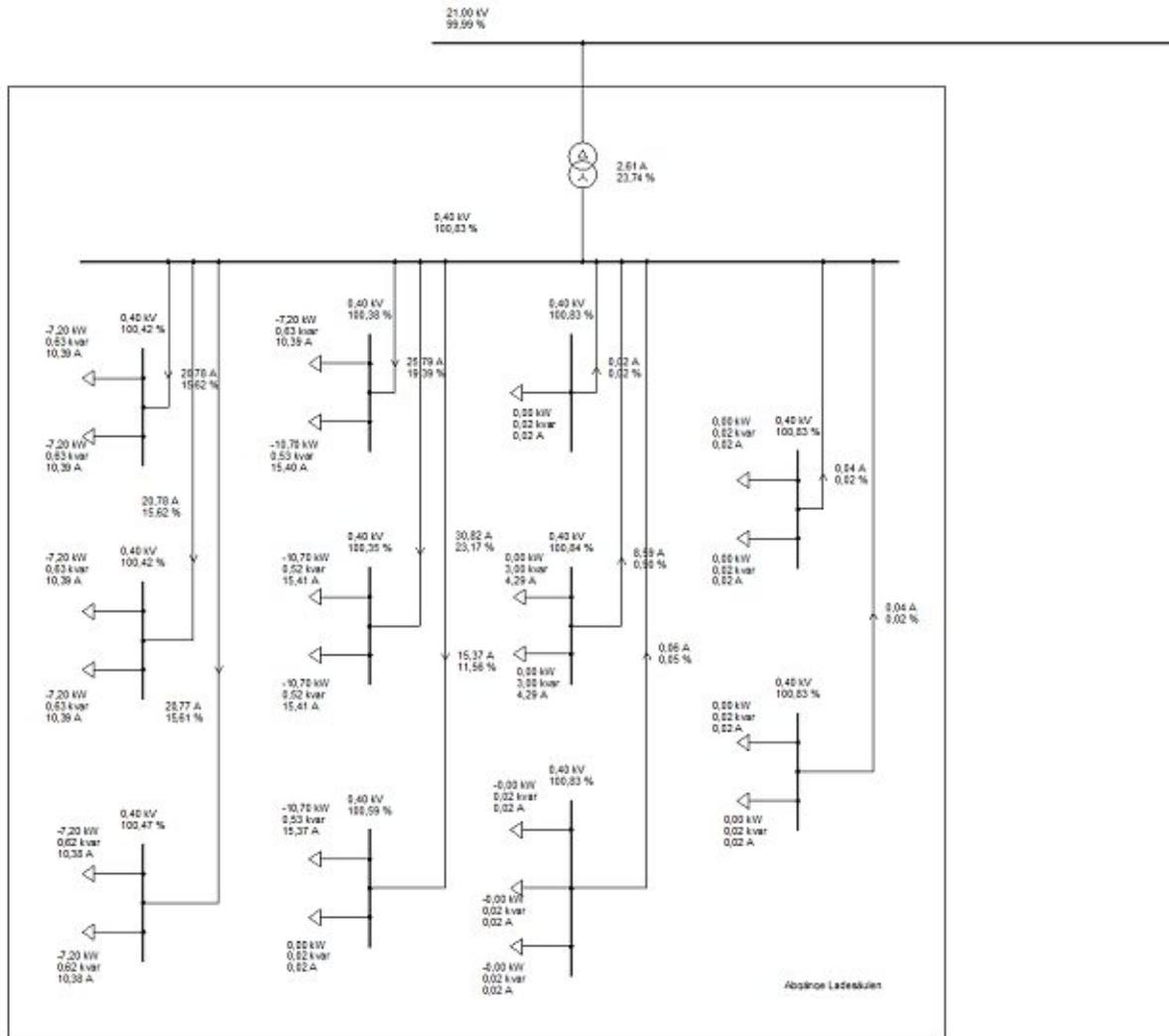


Abbildung 5.17: 11 kW Auswirkung

Der Transformator ist mit 23,74% mehr als doppelt so stark ausgelastet wie bei den Ladevorgängen an 3,7 kW Ladepunkten. Für die Leitungen ergibt sich (beim BMW i3 Ladevorgang) eine maximale Auslastung von 23,17%, womit diese fast dreimal so stark ausgelastet ist im Vergleich zum 3,7 kW-Ladevorgang. Der Spannungsabfall ist mit etwa 0,5% ebenfalls höher als bei den 3,7 kW-Ladevorgängen.

## Alle Ladepunkte mit 150 Kilowatt Nennleistung

Dieser theoretische Fall wird nur zum Vergleich herangezogen. Für diesen muss die Anzahl der Schnellladesäulen sechsfacht werden, damit alle elf Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden können. Der VW e-Golf lädt an der Schnellladesäule mit 42 kW, wohingegen der BMW i3 mit 51 kW lädt. Die Blindleistung ist mit  $-2,2$  kvar (kapazitiv) an beiden Ladesäulen gleich. Nicht belastete Ladesäulen beziehen eine kapazitive Blindleistung von  $-3$  kvar. Damit ergibt sich folgende Lastflussrechnung.

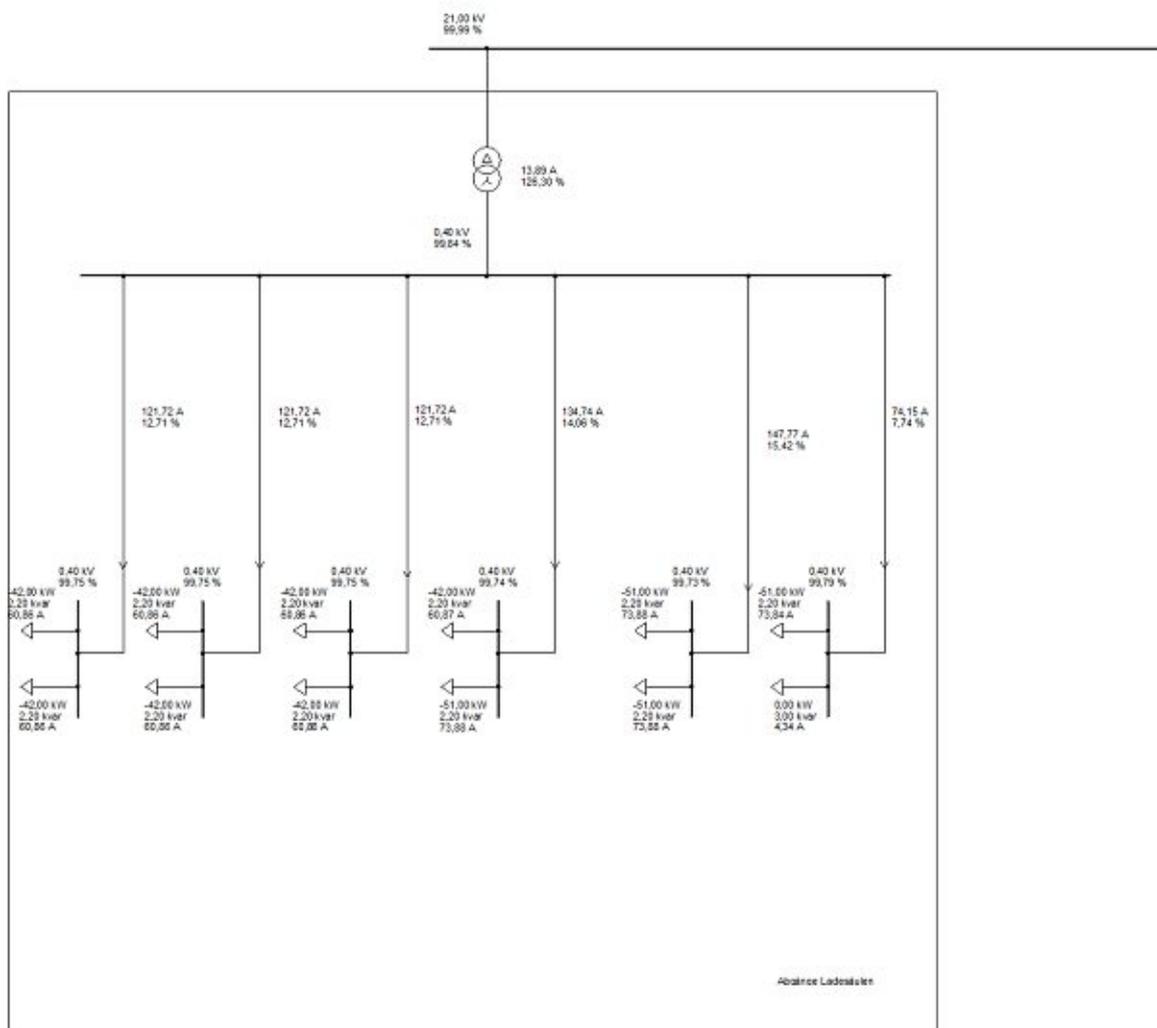


Abbildung 5.18: 150 kW Auswirkung

Für den Transformator ergibt sich eine Auslastung von 126,3 %, womit dieser deutlich überlastet ist. Die maximale Leitungsauslastung beträgt 15,42 %. Mit einem Spannungsabfall von 0,11 % zwischen Unterspannungsseite des Transformators und Ladesäule ist dieser geringer, als bei den 11 kW Ladevorgängen, was durch die höhere kapazitive Blindleistung der Schnellladesäulen erklärbar ist.

## Vergleich der Parameter

Tabelle 5.6 zeigt den Vergleich der Parameter

Tabelle 5.6: Vergleich Ladeleistungen

	3,7 kW	11 kW	150 kW
Auslastung Transformator/%	10,13	23,74	126,30
$\Delta U_{\max}/\%$	0,2	0,48	0,11
Auslastung Zuleitung/%	8,04	23,17	15,42

Je höher die Nennleistung der Ladepunkte ist, desto höher sind die Betriebsmittel ausgelastet. Weiters sinkt die Knotenspannung durch die stärkeren Spannungsabfälle an den Leitungen bei höheren Ladeleistungen bedingt durch die höheren Ladeströme stärker ab. Es ist damit ersichtlich, dass Ladepunkte mit geringerer Nennleistung eine geringere Auswirkung auf das Verteilnetz haben. Durch die längere Dauer der Ladevorgänge wird das Netz jedoch über einen längeren Zeitraum belastet. Bei den 3,7 kW und 11 kW Fällen kommt es bei keinen Betriebsmitteln zu unzulässig hohen Auslastungen. 400 kVA Transformatoren können laut Trafostationshandbuch von Netz Niederösterreich je nach Bauweise bei einer Auslastung von 70 % kritisch ausgelastet sein. Dieser Grenzwert tritt bei einer kompakten Bauweise auf, wenn die Transformatoren nicht ausreichend gekühlt werden können. Beim betrachteten 150 kW Szenario wird dieser Grenzwert überschritten. Da dieser Fall nur rein theoretisch ist, und in der Realität nicht auftritt, werden bei diesem Fall keine weiteren Untersuchungen bezüglich Transformatorverstärkung durchgeführt.

### 5.4.8 Auswirkung Schnelladesäule und Gleichzeitigkeiten

In Abschnitt 4.3.3 wurden Gleichzeitigkeitsfaktoren für Elektromobilität ermittelt. Diese werden für die Untersuchungen in diesem Abschnitt herangezogen. Außerdem wird überprüft, wie stark sich die Verwendung der Schnellladesäule auf das Netz auswirkt. Für diese Untersuchungen wird die Modellierung der Ladesäulen als einzelne Last nach Abbildung 5.3 herangezogen. Es wird somit nur die Auswirkung der Ladevorgänge auf die Transformatorauslastung untersucht. Vorhergehende Analysen haben gezeigt, dass es durch die Ladevorgänge zu keinen Spannungsbandverletzungen und zu keinen Kabelüberlastungen kommt.

Tabelle 5.7 fasst die Annahmen für die Modellierung der Ladesäulen zusammen. Diese Werte stammen aus der Power Quality Messung nach Abschnitt 4.4. Das negative Vorzeichen der Blindleistung ergibt sich durch den kapazitiven Blindleistungsbezug.

Tabelle 5.7: Vergleich Ladeleistungen

Ladepunkt	$P_{eGolf}$	$Q_{eGolf}$	$P_{i3}$	$Q_{i3}$
3,7 kW	3,4 kW	-365 var	3,7 kW	-485 var
11 kW	7,2 kW	-625 var	10,7 kW	-525 var
150 kW	42 kW	-2,2 kvar	51 kW	-2,2 kvar
150 kW Unbelastet	0 kW	-3,0 kvar	0 kW	-3,0 kvar

## 11 Kilowatt Ladevorgänge

Im ersten Unterpunkt werden 11 kW Ladevorgänge untersucht. Dazu wird angenommen, dass alle Fahrzeuge an 11 kW Ladepunkten mit deren maximal möglicher Leistung (an diesen Ladepunkten) geladen werden. Gleichzeitigkeitsfaktoren und das Laden an einer Schnellladesäule werden in diesem Fall nicht berücksichtigt. Damit ergeben sich mit Tabelle 5.7 eine Wirkleistung von 93,2 kW und eine Blindleistung von -6,475 kvar, wobei berücksichtigt wird, dass 9 der 20 Ladesäulen unbelastet sind, und damit eine kapazitive Blindleistung von jeweils -15 var beziehen. Abbildung 5.19 zeigt die Ergebnisse der Lastflussrechnung.

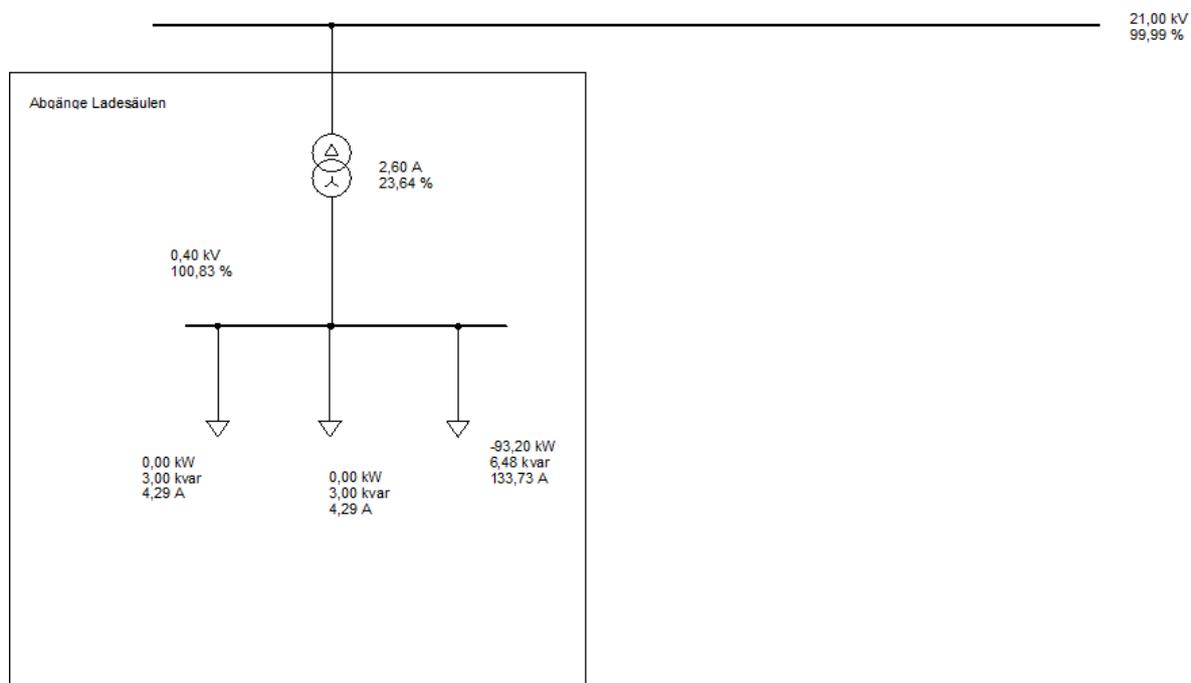


Abbildung 5.19: 11 kW Ladevorgänge

Der Transformator ist zu 23,64 % ausgelastet. Genauere Untersuchungen erfolgen beim Vergleich mit den anderen Fällen (Berücksichtigung Schnellladesäule und Gleichzeitigkeiten). Die Spannung an der Unterspannungsseite des Transformators beträgt 403 V.

## 11 Kilowatt Ladevorgänge inklusive Gleichzeitigkeitsfaktoren

Dieselbe Analyse wie im vorherigen Abschnitt wird jetzt mit Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren durchgeführt. Nach Gleichung 4.12 beträgt diese für 11 Fahrzeuge 0,37833. Mit den Werten aus Tabelle 5.7 ergeben sich damit eine Wirkleistung von 35,26 kW und eine Blindleistung von -2,687 kvar, wobei die Blindleistung mit Berücksichtigung der Gleichzeitigkeiten folgendermaßen berechnet wird.

$$Q_{GLZ} = Q_{LS} \cdot GLZ + n \cdot Q_{unbelastet} \cdot (1 - GLZ) + (20 - n) \cdot Q_{unbelastet} \quad (5.3)$$

$Q_{GLZ}$  entspricht hierbei der berechneten Blindleistung mit Gleichzeitigkeitsfaktoren, welche für die Modellierung herangezogen wird.  $GLZ$  ist der Gleichzeitigkeitsfaktor für die entsprechende Anzahl an ladenden Fahrzeugen.  $Q_{unbelastet}$  ist die Blindleistung der unbelasteten Ladepunkte. Für den betrachteten Fall beträgt sie -15 var. Der Faktor  $n$  entspricht der Anzahl der ladenden Fahrzeuge, wobei dieser im betrachteten Fall 11 beträgt. Nachdem die Schnellladesäule als eigene Last modelliert ist, werden die Ladevorgänge an dieser nicht zu  $n$  gezählt. Mit dem zweiten Term der Gleichung wird somit die Blindleistung der Ladesäulen, welche durch die Gleichzeitigkeiten unbelastet sind, berücksichtigt. Der dritte Term der Gleichung berücksichtigt die unbenutzten Ladesäulen, wobei hier davon ausgegangen wird, dass es 20 Ladepunkte gibt.

Mit diesen Annahmen kann eine Lastflussrechnung durchgeführt werden.

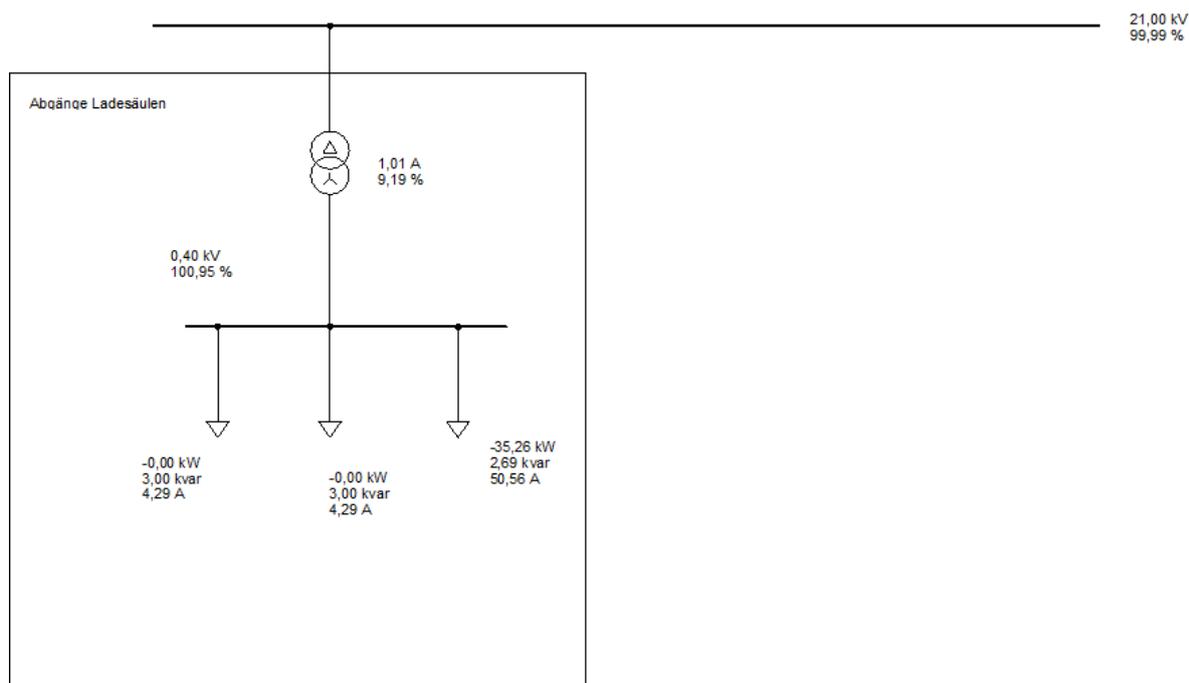


Abbildung 5.20: 11 kW Ladevorgänge inklusive GLZ

Die Transformatorauslastung sinkt mit der Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren auf unter 10 %.

## 11 Kilowatt Ladevorgänge inklusive einem Schnellladevorgang

Einer der vier BMW i3 lädt bei dieser Betrachtung an einem Ladepunkt der Schnellladesäule. Die restlichen zehn Fahrzeuge laden weiterhin an 11 kW Ladepunkten. Diese werden somit weiterhin als eigene Last modelliert. Für die zehn Fahrzeuge ergeben sich eine Wirkleistung von 82,5 kW und eine Blindleistung von  $-6,1$  kvar. Abbildung 5.21 zeigt die Lastflussrechnung des Schnellladevorganges.

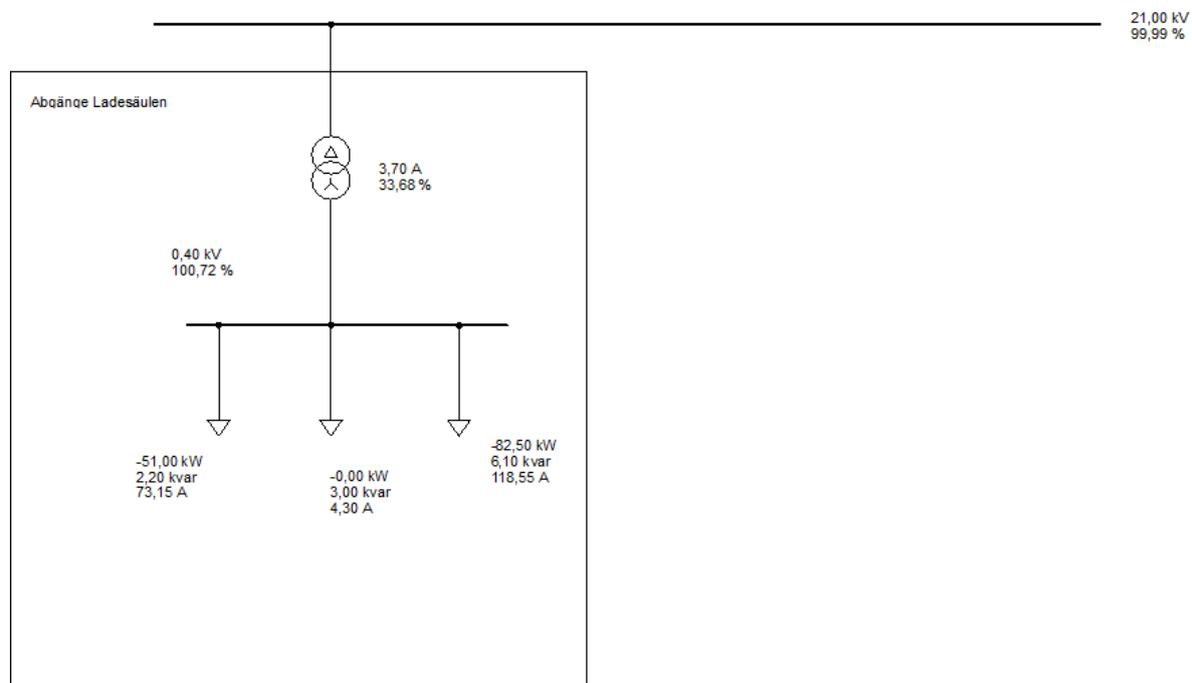


Abbildung 5.21: 11 kW Ladevorgänge inklusive einem HPC

Der Transformator ist in diesem Fall zu 33,68 % ausgelastet.

## 11 Kilowatt Ladevorgänge inklusive einem Schnellladevorgang und Gleichzeitigkeitsfaktoren

Nachdem an den 11 kW Ladepunkten in diesem Fall zehn anstatt elf Fahrzeuge (durch den Ladevorgang an der Schnellladesäule) geladen werden erhöht sich der Gleichzeitigkeitsfaktor auf 0,38747. Dieser wird mit der im vorigen Abschnitt ermittelten Wirkleistung von 82,5 kW multipliziert, wodurch sich eine Wirkleistung von 31,97 kW ergibt. Die Blindleistung wird nach Gleichung 5.3 berechnet, wobei der Faktor  $n$  in diesem Fall 10 beträgt. Es ergibt sich damit eine Blindleistung von  $-2,55$  kvar. Die Lastflussrechnung kann mit Kenntnis der Parameter durchgeführt werden.

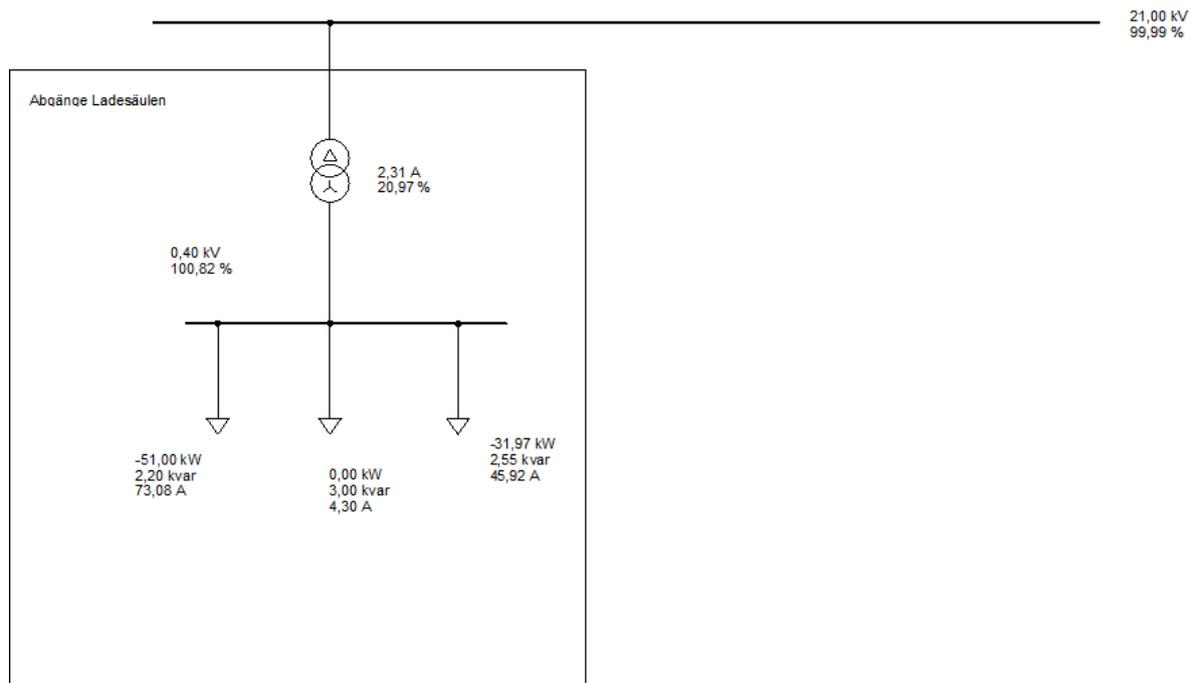


Abbildung 5.22: 11 kW Ladevorgänge inklusive einem HPC und GLZ

Mit einer Auslastung von 20,97 % ist der Transformator um mehr als 12 % weniger stark ausgelastet, als bei der Betrachtung ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren. Im Vergleich zur Betrachtung ohne Ladevorgang an der Schnellladesäule (inklusive Gleichzeitigkeitsfaktoren) sind diese jedoch mehr als doppelt so stark ausgelastet.

### 11 Kilowatt Ladevorgänge inklusive zwei Schnellladevorgängen

Bei dieser Falluntersuchung wird davon ausgegangen, dass ein weiterer BMW i3 am zweiten Ladepunkt der Schnellladesäule geladen wird, wodurch beide Ladepunkte der Ladesäule belastet sind. Die restlichen neun Fahrzeuge werden an 11 kW Ladepunkten geladen, wodurch sich eine Wirkleistung von 71,8 kW und eine Blindleistung von  $-5,59$  kvar ergeben. Abbildung 5.23 zeigt die mit diesen Parametern durchgeführte Lastflussrechnung.

Es kommt zu einer Auslastung des Transformators von 43,78 %. Die Knotenspannung an der Unterspannungsseite des Transformators beträgt 402 V. Obwohl die Wirkleistungen der Ladepunkte deutlich höher sind, als beim Laden aller elf Fahrzeuge an 11 kW Ladepunkten ist die Knotenspannung vergleichsweise nur um ein Volt geringer. Dies ist durch die kurzen Abstände zwischen Verteiler und Ladesäule bedingt. Die Leitungsimpedanz ist damit gering, und es treten nur geringe Spannungsabfälle auf. Weiters kann die Knotenspannung durch Einspeisung kapazitiver Blindleistung nach Gleichungen 5.1 und 5.2 erhöht werden.

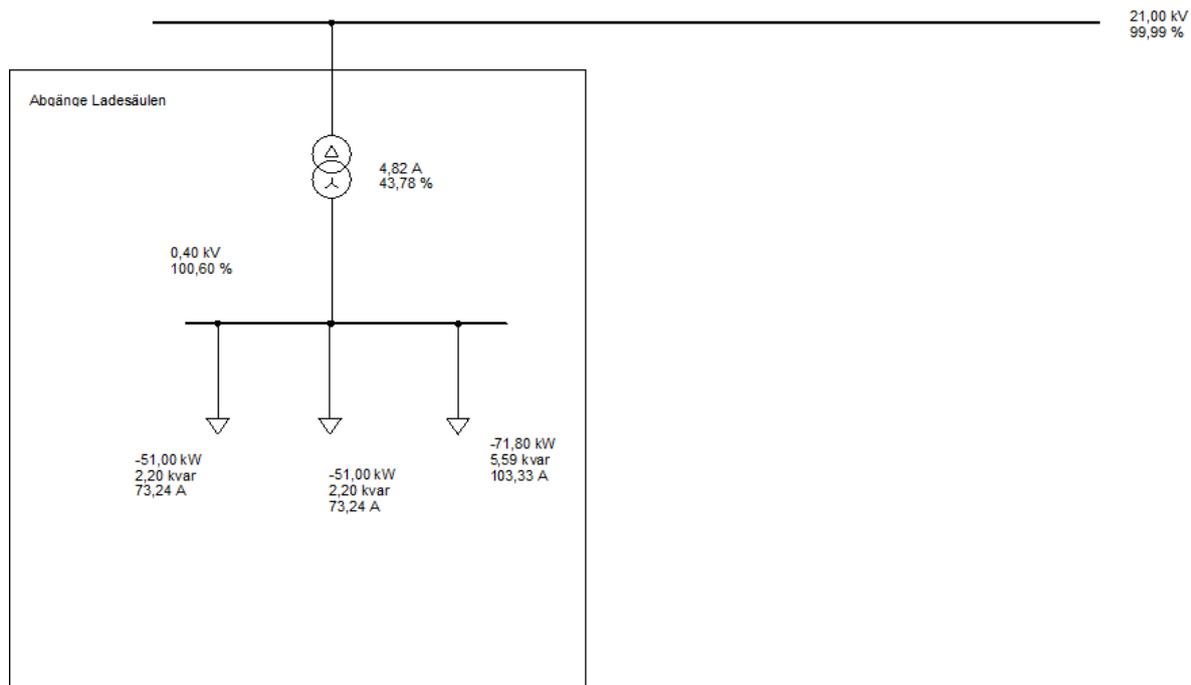


Abbildung 5.23: 11 kW Ladevorgänge inklusive zwei HPC

### 11 Kilowatt Ladevorgänge inklusive zwei Schnellladevorgängen und Gleichzeitigkeitsfaktoren

Bei diesem betrachteten Fall werden zusätzlich zum vorherigen Fall Gleichzeitigkeitsfaktoren betrachtet. Für die neun an den 11 kW Ladepunkten ladenden Fahrzeuge resultiert ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,39836. Damit ergeben sich (für die zu modellierende Last) eine Wirkleistung von 28,6 kW und eine Blindleistung von -2,41 kvar. Da die Anzahl der Schnellladepunkte mit zwei gering ist, werden für diese keine Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt. Es wird damit angenommen, dass die beiden Ladevorgänge an der Schnellladesäule gleichzeitig stattfinden. Abbildung 5.24 zeigt die Lastflussrechnung für den betrachteten Fall.

Die Trafoauslastung von 32,89 % ist annähernd gleich wie die Auslastung der Betrachtung mit einem Schnellladevorgang und ohne Gleichzeitigkeiten. Dies verdeutlicht den Einfluss der Gleichzeitigkeitsfaktoren.

### Übersicht der Fälle

Tabelle 5.8 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass die Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren einen hohen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

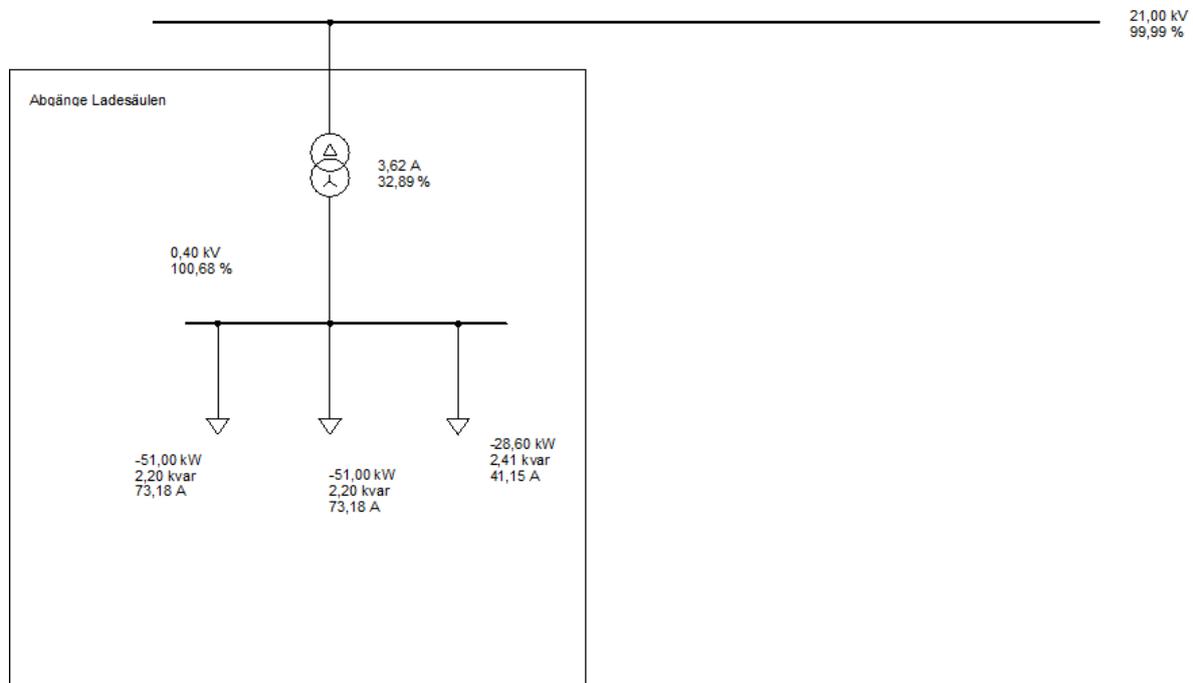


Abbildung 5.24: 11 kW Ladevorgänge inklusive zwei HPC und GLZ

Tabelle 5.8: Vergleich Ladeleistungen

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	93,20 kW	-12,48 kvar	23,64
11 kW + GLZ	35,26 kW	-8,69 kvar	9,19
11 kW + 1HPC	133,50 kW	-11,30 kvar	33,68
11 kW + 1HPC + GLZ	83,00 kW	-7,8 kvar	20,97
11 kW + 2HPC	173,80 kW	-10,0 kvar	43,78
11 kW + 2HPC + GLZ	130,6 kW	-6,8 kvar	32,89

Weiters ist es für die Auslastung des Transformators ausschlaggebend, ob Schnellladevorgänge durchgeführt werden. Die Auslastung des Transformators steigt um etwa 10 % pro durchgeführtem Schnellladevorgang. Bezüglich der Knotenspannung an der Unterspannungsseite des Transformators ergeben sich aufgrund der kurzen Leitungslängen nur sehr geringe Änderungen zwischen den betrachteten Fällen. Für Elektromobilitätsprojekte ist es somit ausschlaggebend, welche Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt werden können, und ob Ladevorgänge mit einer hohen Ladeleistung (an einer Schnellladesäule) durchgeführt werden.

#### 5.4.9 Szenarienanalyse

In diesem letzten Fall werden die Auswirkungen der Szenarien aus Abschnitt 5.2 untersucht. Es wird dabei auf eine Umstellung des Fahrzeugpools auf 60 % und 90 % Elektromobilität eingegangen. Weiters werden die beiden optimalen Fälle nach den Tabellen 5.1 und 5.2 untersucht (mit und ohne VW ID.3). Die Untersuchung wird äquivalent zu Abschnitt 5.4.8 durchgeführt, wobei statt der beiden Fälle mit einer Schnellladesäule ein Fall untersucht wird, bei dem alle Fahrzeuge an 3,7 kW Ladepunkten geladen werden. Diese Falluntersuchung dient dazu herauszufinden, wie stark das Netz bei den Szenarien bei niedrigerer Ladeleistung belastet wird. Durch die gleiche Vorgehensweise wie im vorherigen Abschnitt wird auf eine genauere Beschreibung der Methodik in diesem Abschnitt verzichtet. Für jedes Szenario wird exemplarisch die Lastflussrechnung der Falluntersuchung für das Laden an 11 kW Ladepunkten mit zusätzlichem Laden an zwei Ladepunkten der Schnellladesäule, und ohne Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren dargestellt. Bei dieser Falluntersuchung treten die maximalen Transformatorauslastungen und die minimalen Knotenspannungen (aller untersuchten Fälle) auf, weshalb dieser im weiteren Verlauf der Untersuchungen als Extremfall bezeichnet wird. Die Blindleistung der unbelasteten Ladesäulen wird für diese Betrachtungen vernachlässigt, da diese bei der Betrachtung einer höheren Anzahl an Fahrzeugen keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat.

#### Momentaner Elektroautobestand

Die Messergebnisse des momentanen Elektroautobestands im Fuhrpark entsprechen den Ergebnissen laut Abschnitt 5.4.8, wobei der Fall mit Laden an 3,7 kW Ladepunkten ergänzt wird. Da die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt übernommen werden, ist in diesem Fall die Blindleistung der unbelasteten Ladesäulen noch berücksichtigt. In den weiteren Fällen wird diese vernachlässigt. Der Extremfall des momentanen Elektrofahrzeugbestands im Fuhrpark ist in Abbildung 5.23 im vorherigen Abschnitt ersichtlich. Tabelle 5.9 fasst diese Ergebnisse zusammen.

Tabelle 5.9: Ergebnisse Momentaner Elektroautobestand

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	93,20 kW	-12,48 kvar	23,64
11 kW + GLZ	35,26 kW	-8,69 kvar	9,19
11 kW + 2HPC	173,80 kW	-10,0 kvar	43,78
11 kW + 2HPC + GLZ	130,6 kW	-6,8 kvar	32,89
3,7 kW	38,60 kW	-10,63 kvar	10,11

Wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben kommt es zu maximalen Transformatorauslastungen von etwa 44 %.

## 60 Prozent Elektromobilität

Im zweiten untersuchten Fall dieses Unterpunktes wird die Umstellung des Fuhrparks auf 60 % Elektromobilität betrachtet. Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, entspricht diese Umstellung einer Verdoppelung des Elektrofahrzeugbestands. Für die Berechnung wird davon ausgegangen, dass die prozentuellen Anteile der verschiedenen Fahrzeugmodelle gleich bleiben. Von den 22 Elektrofahrzeugen sind damit 14 Fahrzeuge VW e-Golf und 8 Fahrzeuge BMW i3. Diese Aufteilung ist wichtig, da beide Fahrzeuge mit unterschiedlichen Ladeleistungen geladen werden. Weiters werden für die Berechnungen Gleichzeitigkeitsfaktoren für die neue Anzahl an Fahrzeugen anhand von Gleichung 4.12 ermittelt. Abbildung 5.25 zeigt die Berechnung des Extremfalles (mit zwei Schnellladevorgängen und ohne Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren).

Es ist ersichtlich, dass der Transformator zu mehr als zwei Drittel ausgelastet sind. Laut der Dimensionierungsrichtlinie von Netz Niederösterreich beträgt die minimale Auslastungsgrenze eines 400 kVA Transformators 70 %. Diese Auslastung gilt bei Kompaktbauweise. Im Falle des 60 %-Szenarios wird diese Grenze auch im betrachteten Extremfall nicht überschritten. Werden zusätzlich Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt, sinkt die Transformatorauslastung auf unter 40 %. Aus diesem Grund ist bei dem betrachteten Szenario keine Transformatorverstärkung notwendig. In Tabelle 5.10 sind die Ergebnisse aller Fallberechnungen zusammengefasst.

Bei den Betrachtungen ohne Schnellladesäulen und Gleichzeitigkeitsfaktoren ist die Verdoppelung der Fahrzeuganzahl in der Verdoppelung der Auslastung ersichtlich. Auch bei dieser Betrachtung ist die Auswirkung der Gleichzeitigkeitsfaktoren gut erkennbar, da die Auslastungen durch deren Berücksichtigung stark vermindert werden. Die 3,7 kW Ladevorgänge bewirken eine deutlich niedrigere Auslastung der Transformatoren als die 11 kW Ladevorgänge. Durch die langen Ladezeiten könnte es jedoch notwendig sein, dass ein

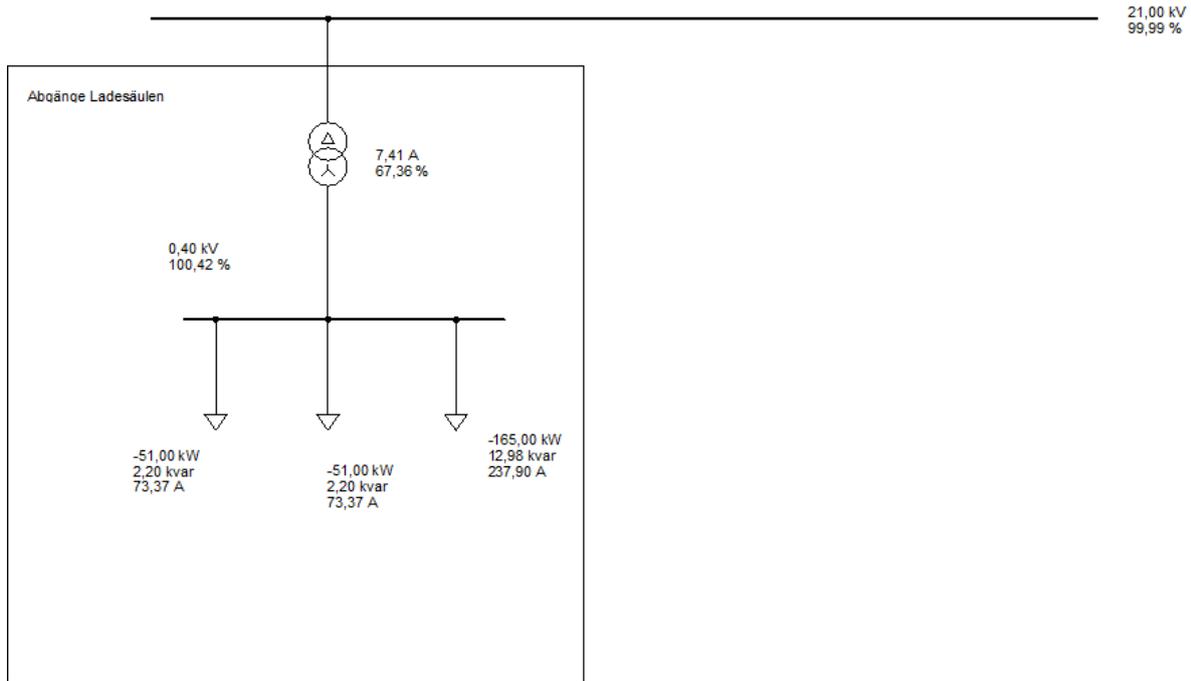


Abbildung 5.25: 60 % Szenario Lastflussrechnung

Tabelle 5.10: Ergebnisse 60 % Szenario

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	186,40 kW	-18,95 kvar	47,09
11 kW + GLZ	61,24 kW	-10,47 kvar	15,64
11 kW + 2HPC	267,00 kW	-17,38 kvar	67,36
11 kW + 2HPC + GLZ	157,07 kW	-8,96 kvar	39,56
3,7 kW	77,20 kW	-14,99 kvar	19,78

Ausbau der Ladeinfrastruktur notwendig wird, weswegen es trotz der höheren Auslastung des Netzes bei 11 kW Ladevorgängen ratsam ist, Ladepunkte mit 11 kW Ladeleistung zu installieren. Eine Umstellung auf 60 % Elektromobilität kann aus der Sicht des Netzes durchgeführt werden.

### 90 Prozent Elektromobilität

Eine Umstellung auf 90 % Elektromobilität entspricht einer Verdreifachung des Elektrofahrzeugbestands. Damit sind von den 33 Elektrofahrzeugen im Fuhrpark 21 Modelle VW e-Golf und 12 Modelle BMW i3. Für die Untersuchung werden dieselben Fälle wie in den beiden vorherigen Abschnitten betrachtet, wobei wieder neue Gleichzeitigkeitsfaktoren (für 33 Elektrofahrzeuge) für die Berechnungen berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 5.26 ist die Berechnung des Extremfalles für das 90 % Szenario dargestellt.

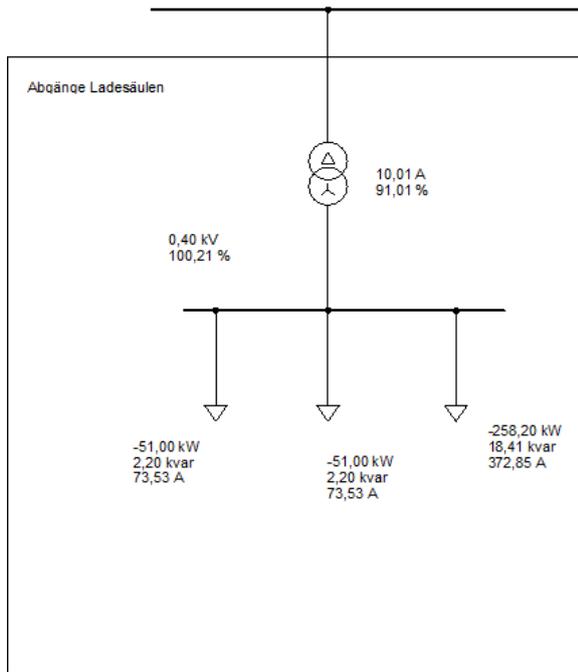


Abbildung 5.26: 90 % Szenario Lastflussrechnung

Bei diesem Fall ist der Transformator zu mehr als 90 % ausgelastet. In diesem Fall werden die zulässigen 70 % (laut Trafostationshandbuch Netz Niederösterreich - Annahme Kompaktbauweise) der Auslastungen deutlich überschritten. Werden jedoch die Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt, so ergibt sich eine Auslastung des Transformators von 45,97 %. Um jedoch zu vermeiden, dass zu einzelnen Zeitpunkten bei einer stärkeren Auslastung der Ladepunkte solch hohe Transformatorauslastungen auftreten, ist beim 90 %-Szenario von einer notwendigen Transformatorverstärkung auszugehen. In den Optimierungen (welche die angestrebten Szenarien darstellen) wird genauer auf diese Verstärkungen eingegangen. Eine Zusammenfassung der Lastflussrechnungen der betrachteten Fälle ist in Tabelle 5.11 ersichtlich.

Tabelle 5.11: Ergebnisse 90 % Szenario

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	279,6 kW	-25,42 kvar	70,64
11 kW + GLZ	86,42 kW	-12,23 kvar	21,95
11 kW + 2HPC	360,20 kW	-22,80 kvar	91,01
11 kW + 2HPC + GLZ	182,48 kW	-10,49 kvar	45,97
3,7 kW	115,00 kW	-19,49 kvar	29,30

Wie in den vorherigen Abschnitten, haben die Gleichzeitigkeitsfaktoren einen hohen Einfluss auf die Auslastungen. Durch die höhere Anzahl an Fahrzeugen sind diese Faktoren

geringer, weswegen sich eine noch deutlichere Abweichung von den Fällen ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren ergibt. Bei den untersuchten Fällen ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren und ohne Schnellladevorgänge ist in diesem Fall die Verdreifachung der Elektrofahrzeuge in den Transformatorauslastungen ersichtlich. Aus der Sicht des Netzes ist eine Umstellung auf 90 % Elektromobilität grundsätzlich kein Problem. Wenn davon auszugehen ist, dass es zeitweise zu einer hohen gleichzeitigen Auslastung der Ladesäulen kommt, ist eine Transformatorverstärkung in Erwägung zu ziehen. Durch Implementierung von Lademanagement kann solch ein Fall verhindert werden, und damit auf eine Transformatorverstärkung verzichtet werden. Weiter muss (wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben) zusätzlich berücksichtigt werden, dass ein Ausbau der Infrastruktur notwendig ist.

### Optimalfall exklusive VW ID.3

In dieser Falluntersuchung wird die Optimierung nach Tabelle 5.1 betrachtet, wobei in diesem Fall eine Anschaffung von VW ID.3 Modellen nicht berücksichtigt wird. Es ergibt sich damit eine Anzahl von 18 VW e-Golf und 10 BMW i3. Für die in Summe 28 Fahrzeuge werden mit Gleichung 4.12 entsprechende Gleichzeitigkeitsfaktoren ermittelt. Die Untersuchung erfolgt äquivalent zu den vorherigen Falluntersuchungen. Weiters erfolgt die Darstellung der Lastflussrechnung des Extremfalles in Abbildung 5.27.

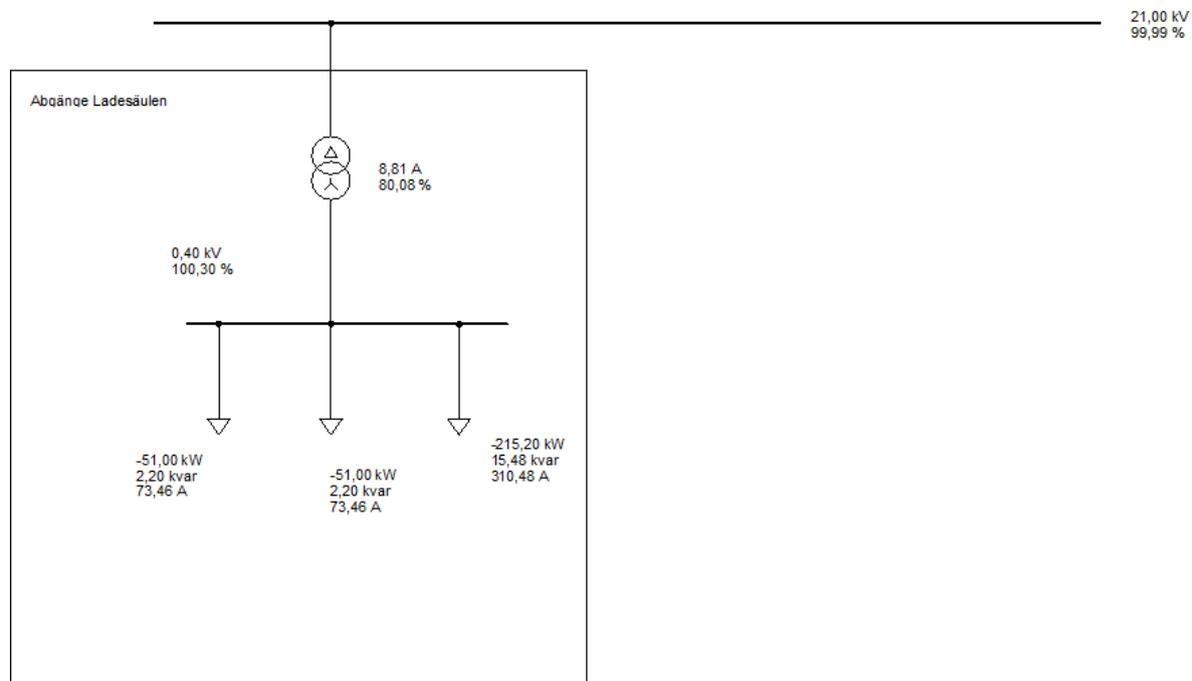


Abbildung 5.27: Optimierung Szenario Lastflussrechnung

Da in diesem Fall weniger Elektrofahrzeuge vorhanden sind als beim 90 % Szenario ist die Transformatorauslastung mit 80,08 % geringer als im vorherigen Abschnitt.

Die Ergebnisse aller betrachteten Fälle sind in Tabelle 5.12 dargestellt.

Tabelle 5.12: Ergebnisse Optimierung

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	236,60 kW	-22,50 kvar	59,76
11 kW + GLZ	74,81 kW	-11,50 kvar	19,05
11 kW + 2HPC	317,00 kW	-19,88 kvar	80,08
11 kW + 2HPC + GLZ	170,80 kW	-9,64 kvar	43,20
3,7 kW	98,20 kW	-17,42 kvar	25,06

Durch die geringeren Auslastungen als beim 90% Szenario ist auch die Optimierung (ohne VW ID.3) aus der Sicht des Netzes umsetzbar. Aus denselben Aspekten wie im vorherigen Abschnitt ist eine Transformatorverstärkung in Erwägung zu ziehen, welche jedoch durch Lademanagement vermieden werden kann. Die restlichen Erkenntnisse aus den Berechnungsergebnissen sind äquivalent zu den vorherigen Abschnitten.

### Optimalfall inklusive VW ID.3

In der Optimierung nach Tabelle 5.2 werden VW ID.3 berücksichtigt, da diese eine höhere Reichweite als die vorhandenen Modelle besitzen, und damit der Elektrofahrzeuganteil im Fuhrpark erhöht werden kann. Da es sich dabei um ein Zukunftsszenario handelt, liegen keine Messwerte für dieses Fahrzeugmodell vor. Für die Auswirkung auf das Netz wird der Extremfall angenommen. Bei diesem laden die VW ID.3 mit der maximal möglichen Ladeleistung des entsprechenden Ladepunktes (z.B. 11 kW an 11 kW Ladepunkten).

Laut Tabelle 2.2 lädt der VW ID.3 an Schnellladesäulen mit bis zu 50 kW. Es ist damit irrelevant, ob bei den Untersuchungen mit Schnellladevorgängen BMW i3 oder VW ID.3 an der Schnellladesäule geladen werden. Da von den BMW i3 genaue Messwerte vorhanden sind wird angenommen, dass zwei dieser Modelle an der Schnellladesäule geladen werden. Von den in Summe 33 Elektrofahrzeugen sind 16 Modelle VW e-Golf, 9 Modelle BMW i3 und 8 Modelle VW ID.3. Dieser Optimalfall unterscheidet sich vom 90% Szenario nur dadurch, dass beim VW ID.3 die maximale Leistung an den Ladepunkten angenommen wird, und damit die Gesamtleistung der Ladevorgänge in Summe etwas höher ist. Das ist auch im betrachteten Fall mit zwei Schnellladevorgängen (und ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren) ersichtlich, welcher in der Abbildung 5.28 dargestellt ist.

Der Transformator ist mit 96,06% beinahe vollständig ausgelastet. Da es sich dabei um einen Extremfall handelt ist der Transformator nicht permanent so hoch ausgelastet.

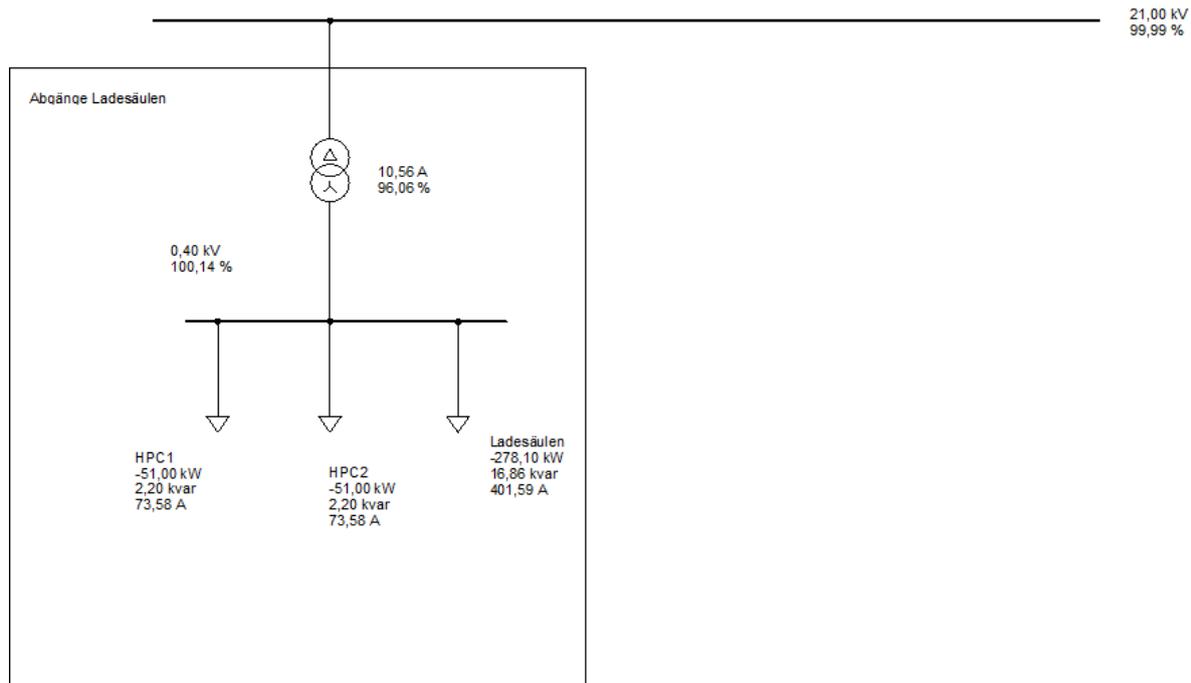


Abbildung 5.28: Optimierung Szenario Lastflussrechnung - inklusive VW ID.3

Um zu untersuchen, wie der Transformator in der Regel ausgelastet sind werden Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt, was in den Ergebnissen laut Tabelle 5.13 ersichtlich ist.

Tabelle 5.13: Ergebnisse Optimierung Gleichzeitigkeitsfaktoren

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	299,50 kW	-24,92 kvar	75,66
11 kW + GLZ	92,57 kW	-12,19 kvar	23,48
11 kW + 2HPC	380,10 kW	-21,25 kvar	96,06
11 kW + 2HPC + GLZ	188,68 kW	-10,00 kvar	47,53
3,7 kW	117,30 kW	-20,09 kvar	29,89

Durch die höhere Summenleistung ist der Transformator mehr als dreimal so stark ausgelastet wie beim momentanen Elektroautobestand. Mit Berücksichtigung der Gleichzeitigkeiten ergibt sich eine Auslastung von etwa 23,5 % ohne HPC und etwa 47,5 % mit HPC. Werden die Extremfälle ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren betrachtet ergibt sich für die beiden betrachteten Fälle (11 kW mit und ohne Schnellladevorgang) eine Auslastung über 70 %. Wie schon beim 90 %-Szenario und bei der Optimierung ohne VW ID.3 kann eine Transformatorverstärkung durch Lademanagement, und damit durch verringern der gleichzeitig stattfindenden Ladevorgänge, vermieden werden. Für den Fall, dass kein funktionierendes Lademanagement vorhanden ist, und einer der betrachteten Extremfälle in der Realität auf-

treten kann, ist eine Transformatorverstärkung notwendig. In den folgenden Unterpunkten werden zwei Möglichkeiten der Verstärkung untersucht.

### Parallelschalten eines weiteren Transformators

In diesem Fall wird ein zusätzlicher Transformator parallel geschaltet. Für diese Falluntersuchung wird angenommen, dass dieser derselbe Typ wie der vorhandene Transformator ist. Die Summenleistung der Transformatoren ist damit 800 kVA. In Abbildung 5.29 ist der Extremfall der Lastflussrechnung mit zwei parallel geschalteten Transformatoren dargestellt.

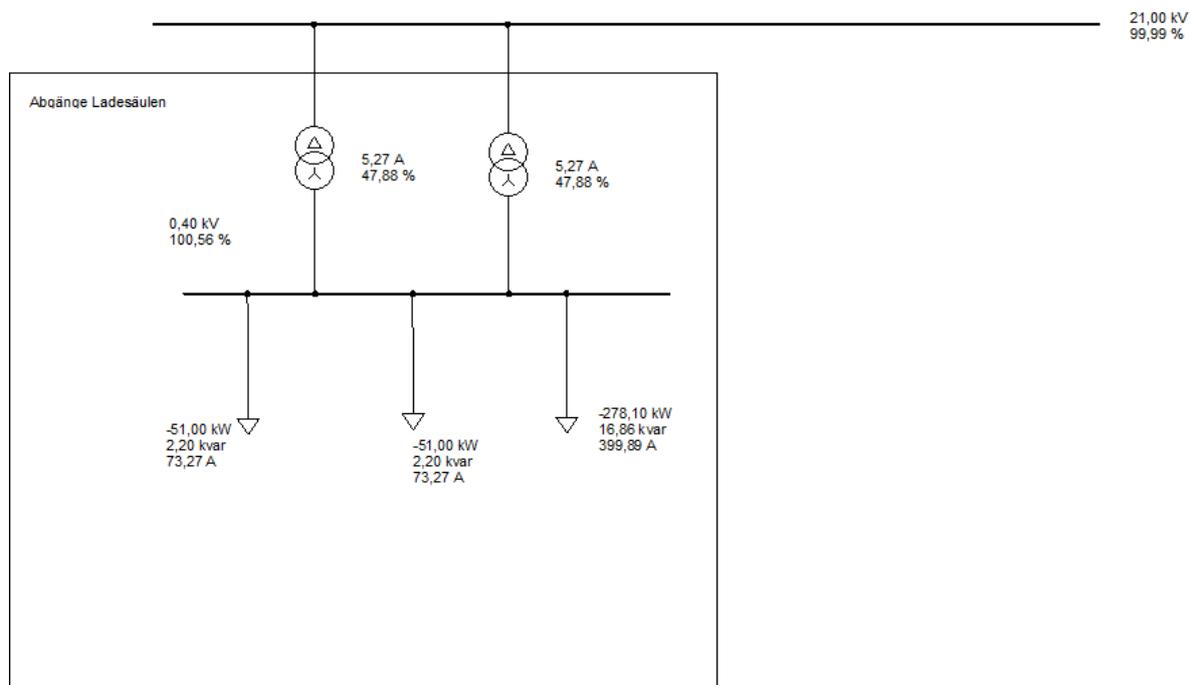


Abbildung 5.29: Parallelschalten eines weiteren Transformators

Die Transformatoren sind damit zu weniger als 50 % ausgelastet. Die Auslastung wird auf die beiden Transformatoren aufgeteilt. Da der zusätzlich parallel geschaltete Transformator gleich dimensioniert ist wie der vorhandene Transformator sind deren Kurzschlussspannungen gleich. Damit teilen sich die Ströme gleichmäßig auf die Transformatoren auf.

Für eine genauere Untersuchung der Parallelschaltung eines weiteren Transformators werden dieselben Falluntersuchungen wie in den vorherigen Abschnitten durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5.14 ersichtlich, wobei bei den Wirk- und Blindleistungswerten keine Unterschiede zu Tabelle 5.13 auftreten, da die Belastung gleichbleibt.

Durch die Parallelschaltung eines zweiten Transformators betragen die Transformatorauslastungen beim Extremfall mit Gleichzeitigkeitsfaktoren 23,77 %. Auch im Extremfall

Tabelle 5.14: Ergebnisse Parallelschalten Transformator

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	299,50 kW	-24,92 kvar	37,77
11 kW + GLZ	92,57 kW	-12,19 kvar	11,79
11 kW + 2HPC	380,10 kW	-21,25 kvar	47,88
11 kW + 2HPC + GLZ	188,68 kW	-10,00 kvar	23,77
3,7 kW	117,30 kW	-20,09 kvar	14,99

ohne Gleichzeitigkeitsfaktoren sind die Auslastungen mit 47,88 % noch deutlich unter dem zulässigen Grenzwert. Damit ist eine Implementierung von Lademanagement für eine Fuhrparkerweiterung nicht zwingend notwendig. Dasselbe gilt für das 90 %-Szenario und für die Optimierung ohne VW ID.3. Weiters ergibt sich durch einen zusätzlichen Transformator mehr Reserve für Fuhrparkerweiterungen, die über die Optimierungen hinausgehen (z.B. Erweiterung der Schnellladesäulen) gegeben, und die Transformatoren sind weniger stark ausgelastet. Das einzige Problem an der Parallelschaltung eines zusätzlichen Transformators besteht darin, dass dieser Anschaffungs- und Umbaukosten verursacht.

### Austausch der bestehenden Transformatoren

Eine weitere Möglichkeit der Verminderung der Transformatorauslastungen besteht darin, den vorhandenen Transformator gegen einen Transformator mit einer höheren Nennleistung zu tauschen. Durch Vergleich mit Typenschildern von Transformatoren verschiedener Hersteller wird ein Transformator mit einer Nennleistung von 630 kVA und einer prozentuellen Kurzschlussspannung von 3,92 %, sowie der Schaltgruppe Dyn5 verwendet. Da aus dem Typenschild keine Eisenverluste ablesbar sind werden durch Literaturrecherche Eisenverluste von 600 W für einen Transformator mit 630 kVA Nennleistung angenommen [101]. Für die ohmsche Kurzschlussspannung wird nach der PSS-Sincal Hilfe wie in den vorherigen Abschnitten ein Wert von 1 % angenommen. In Abbildung 5.30 ist die Lastflussrechnung des Extremfalles mit den beiden neuen Transformatoren dargestellt.

Der Transformator ist in diesem Fall maximal zu 60,85 % ausgelastet. Diese Auslastung ist höher als bei der Parallelschaltung eines zusätzlichen Transformators, da die gesamte Nennleistung der Transformatoren in diesem Fall 630 kVA und bei der Parallelschaltung eines zusätzlichen Transformators 800 kVA beträgt. Die Berechnungsergebnisse der durchgeführten Falluntersuchungen sind in Tabelle 5.15 ersichtlich.

Es ist ersichtlich, dass die Auslastungen des Transformators etwas höher als bei der vorherigen Untersuchung mit der Parallelschaltung eines zusätzlichen Transformators sind. Aus der Sicht des Netzes sind somit beide Methoden wirksam. Aus wirtschaftlicher Sicht

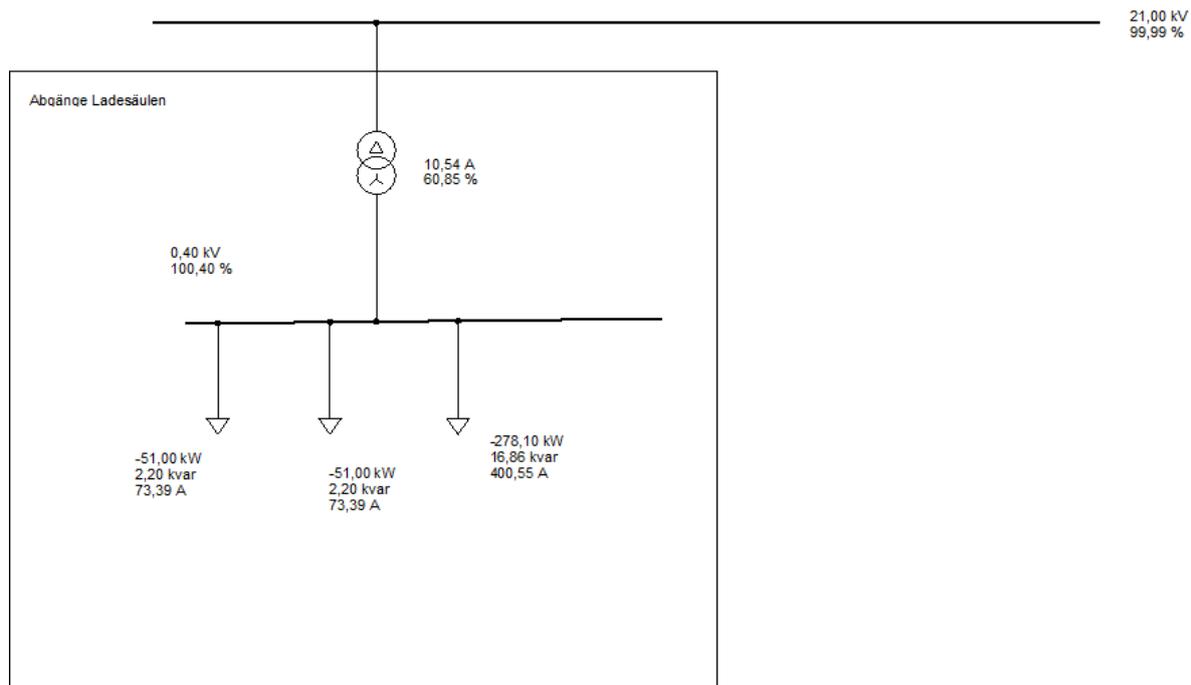


Abbildung 5.30: Austausch der Transformatoren

Tabelle 5.15: Ergebnisse Austausch Transformatoren

Leistung	$P_{\text{ges}}$	$Q_{\text{ges}}$	$T_{\text{Auslastung}}/\%$
11 kW	299,50 kW	-24,92 kvar	47,97
11 kW + GLZ	92,57 kW	-12,19 kvar	15,07
11 kW + 2HPC	380,10 kW	-21,25 kvar	60,85
11 kW + 2HPC + GLZ	188,68 kW	-10,00 kvar	30,16
3,7 kW	117,30 kW	-20,09 kvar	18,99

muss berücksichtigt werden, dass beim Austausch der Transformatoren Anschaffungskosten für einen Transformator mit 630 kVA Nennleistung anfallen. Im Vergleich dazu fallen bei der Parallelschaltung eines zusätzlichen Transformators nur Anschaffungskosten eines 400 kVA Transformators an. Welche Transformatoren in solch einem Fall verwendet werden, hängt von vielen weiteren Parametern, wie zum Beispiel Platzbedarf und vorhandenem Platz in der Umspann-Station ab.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Transformator so dimensioniert ist, dass eine Erhöhung des Elektroautoanteils im Fuhrpark möglich ist. Bei einem hohen Anteil an Elektrofahrzeugen besteht die Notwendigkeit der Implementierung von Lademanagement. Wenn dies nicht möglich ist sollte eine Transformatorverstärkung vorgenommen werden. Durch Parallelschalten eines weiteren Transformators oder Austausch der vorhandenen Transformatoren kann die Auslastung der Transformatoren verringert werden.

### 5.4.10 Ergänzung Ladesäulen extern

Im letzten betrachteten Szenario wird eine Erhöhung der Ladesäulenanzahl an anderen Standorten (als der Garage) im betrachteten Netzabschnitt untersucht.

#### Ausbau der Ladepunkte

Um Szenarien für den Ausbau der Ladesäulen an öffentlichen Plätzen simulieren zu können ist es notwendig, sinnvolle Annahmen für den Ausbau zu treffen. In Österreich gibt es 2020 insgesamt 6151 Ladepunkte [102]. Bis 2030 gibt es verschiedene Szenarien bei denen angegeben wird, wie stark die Anzahl der Ladepunkte gesteigert werden soll. In [103] wird von einem Ausbau auf 45.000 bis 101.000 Ladepunkte ausgegangen. Um ein Maximalszenario zu berücksichtigen wird von einem Ausbau auf 101.000 Ladepunkte ausgegangen, was in etwa einer Verzehnfachung der Ladepunkte entspricht. Für die Modellierung wird angenommen, dass die Last der momentanen vorhandenen Ladepunkte bereits bei der Modellierung laut Abbildung 5.3 berücksichtigt ist, womit die 15-fache Last für die Berechnung ergänzt wird. Etwaige geringe Abweichungen sind gerechtfertigt, da es sich um die Betrachtung möglicher Szenarien handelt, welche nicht genau in dieser Form eintreten werden. Des Weiteren ist aus den gegebenen Netzdaten nicht ersichtlich, inwiefern die vorhandene Ladeinfrastruktur bereits berücksichtigt wurde. Die Ladepunkte werden für die Modellierung nach der Ladestellenkarte in [104] angenommen und mit dem Faktor 15 multipliziert. Es werden dabei die Nennleistungen der Ladepunkte für die Modellierung herangezogen, da diese der maximalen Leistung des Ladepunktes entsprechen. Eine Angabe der Blindleistung ist insofern schwierig, da diese zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen variiert. Zur Modellierung wird dazu das Q/P-Verhältnis des BMW i3 (aus der Summenblind- und Summenwirkleistung) der Power Quality Messungen herangezogen. Darüber hinaus werden Gleichzeitigkeitsfaktoren nach Gleichung 4.12 für die entsprechende (neue) Anzahl an Ladepunkten ermittelt. Diese werden bei Berücksichtigung der Gleichzeitigkeiten mit den Wirk- und Blindleistungen des betrachteten Standortes multipliziert. Die Ergänzung mit der 15-fachen Leistung wird an allen Standorten mit öffentlich betretbaren Gebäuden angenommen. An einem Standort ist der Anteil an Ladepunkten schon so hoch, dass eine Steigerung um den Faktor 15 unrealistisch ist. Es wird damit eine Verdreifachung der Ladeleistung angenommen. Auch hier gilt, dass es sich um mögliche Szenarien handelt, weswegen viele Annahmen getroffen werden müssen. In Netzabschnitten, in denen sich ausschließlich Privatgebäude befinden wird nicht von einem Ausbau der öffentlichen Ladesäulen ausgegangen.

Abbildung 5.31 zeigt den schematischen Aufbau der Erweiterung im Vergleich zu Abbildung 5.3. Es wird dabei explizit angegeben, an welchen Sammelschienen Erweiterungen der

Ladesäulen berücksichtigt werden. In den folgenden Unterpunkten werden die betrachteten Fälle beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur auf die wichtigsten Ergebnisse eingegangen, und auf eine Darstellung der Lastflussrechnung verzichtet.

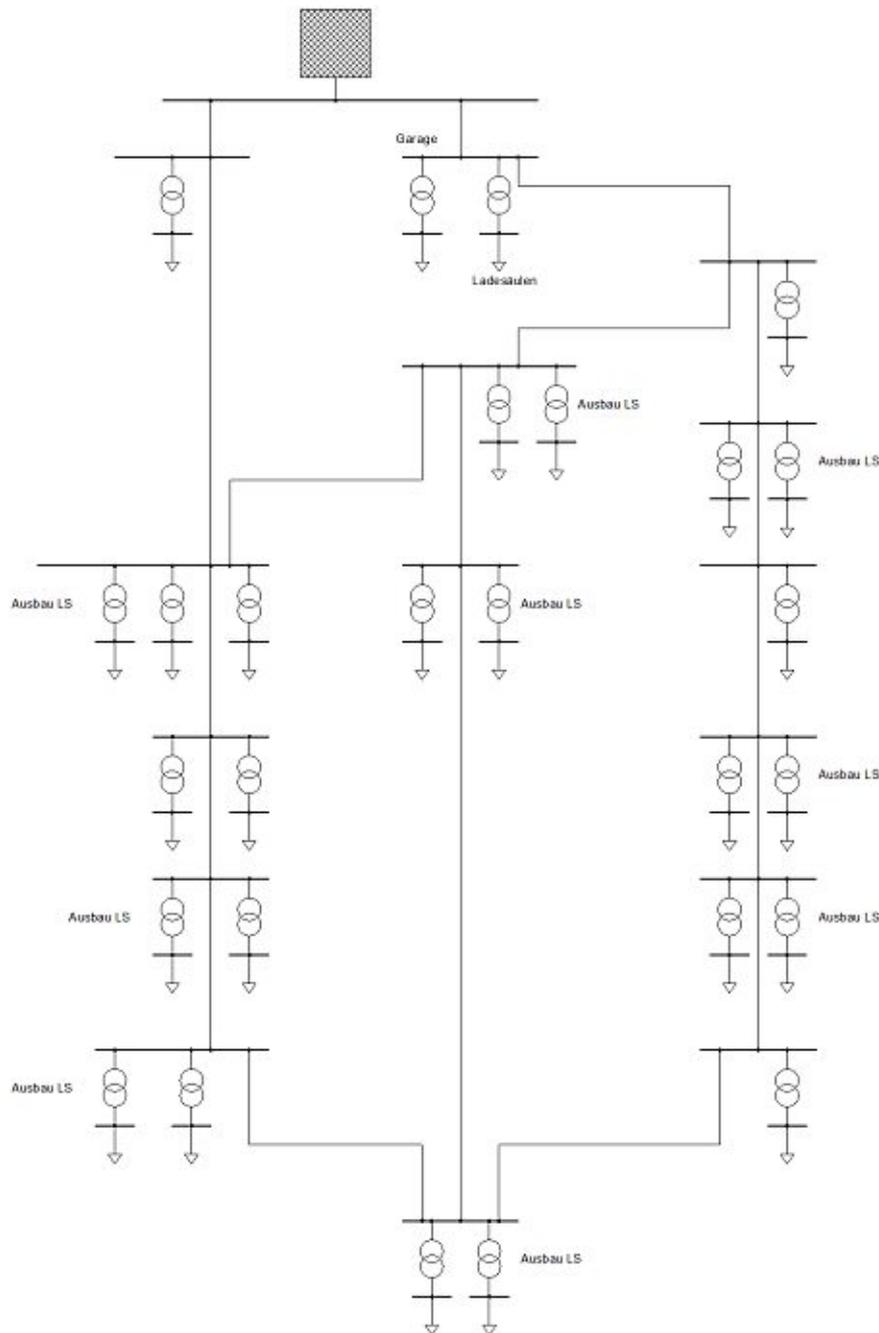


Abbildung 5.31: Schematischer Aufbau betrachtetes Netz inklusive Ausbau der Ladepunkte

### Ausbau mit Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren

Im ersten betrachteten Fall werden die ermittelten Gleichzeitigkeitsfaktoren mitberücksichtigt. Es wird weiters davon ausgegangen, dass in der Garage keine Ladevorgänge stattfinden, womit nur die Auswirkungen der restlichen Ladesäulen auf das 20 kV-Netz

berücksichtigt werden.

Die Einspeisewirkleistung des Netzes steigt gegenüber dem ursprünglichen Fall ohne Ladesäulenausbau um 1311,8 kW auf 5425,54 kW. Gleichzeitig sinkt die eingespeiste Blindleistung durch die kapazitiven Ladevorgänge um 108,53 kvar auf 105,61 kvar. Bei dieser Berechnung treten im gesamten Netz keine Spannungsbandverletzungen auf. Die Leitung von der Netzeinspeisung zur nächstgelegenen Last ist mit 27,28 % Auslastung am stärksten ausgelastet. Im Gegensatz zum Fall ohne Ausbau steigt die Auslastung der Leitung um etwa 6 %. Die Leitung von der Einspeisung zur Garage ist zu 9,92 % ausgelastet. Für die Berücksichtigung von Ladesäulen in der Garage ist die Auslastung dieser Leitung maßgebend.

### **Ausbau ohne Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren**

Bei dieser Betrachtung wird ebenfalls davon ausgegangen, dass in der Garage keine Ladevorgänge stattfinden. Für die restlichen Ladesäulen im Netz werden in diesem Fall keine Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt, womit bei dieser Betrachtung die maximalen Auslastungen untersucht werden.

Die Einspeisewirkleistung steigt in diesem Fall (gegenüber dem Fall ohne Ausbau) um 5893 kW auf 10,13 MW, und die Einspeiseblindleistung sinkt um 361,74 kvar auf 752,4 kvar. Es kommt weiterhin zu keinen Spannungsbandverletzungen. Dies ist wie in den vorherigen Abschnitten durch die kurzen Leitungslängen bedingt. Die Leitung zur nächstgelegenen Last ist mit einer Auslastung von 46,73 % auch in diesem Fall die am stärksten ausgelastete Leitung. Für die Leitung von der Einspeisung zur Garage ergibt sich eine Auslastung von 20,27 %.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung des Maximalfalles wird durch eine Simulation überprüft, wie stark die Ladesäulen an bestimmten Stellen ausgebaut werden können, bis eine Überlastung auftritt. Wird die Ladeleistung der Last direkt neben der Netzeinspeisung auf 11 MW erhöht (weitere Erhöhung um Faktor 11,75) so ergibt sich eine Auslastung der Zuleitung von mehr als 100 %. Bei einer Erhöhung der Ladesäulenleistung einer weiter entfernten Last auf 14 MW (Faktor 11,5) ergibt sich eine Überlastung derselben Leitung. Die restlichen Leitungen sind noch zulässig belastet.

Es ist damit ersichtlich, dass ein Ladesäulenausbau aus der Sicht des 20 kV-Netzes kein Problem darstellt. Die Leitungen, welche direkt von der Netzeinspeisung wegführen, sind in allen Fällen am stärksten ausgelastet. Durch die kurzen Leitungslängen kommt es zu keinen Spannungsbandverletzungen. Für weitere Untersuchungen in den folgenden Abschnitten werden Ladevorgänge in der Garage berücksichtigt.

### Optimierung VW ID.3 Maximalfall

In dieser Falluntersuchung wird das optimale Szenario, inklusive VW ID.3, nach Abbildung 5.28 betrachtet. Für diesen Fall werden keine Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt. Die restlichen Ladevorgänge im Mittelspannungsnetz werden nach dem Maximalszenario laut vorherigem Abschnitt berücksichtigt.

Die Leitung von der Netzeinspeisung zur Garage ist gegenüber dem Fall ohne Ladevorgänge in der Garage mit 22,53 % um 2,36 % mehr ausgelastet. Für die restlichen Kabel ergibt sich eine Auslastungssteigerung von etwa 0,25 %. Die Einspeisewirk- und Blindleistung verändern sich aufgrund der höheren Ladeleistungen in der Garage. Aus diesem Fall ist ersichtlich, dass die Ladevorgänge in der Garage auch im Extremfall eine vernachlässigbar kleine Auswirkung auf das Mittelspannungsnetz haben. Der Transformator für die Versorgung der Ladesäulen in der Garage ist in diesem Fall fast vollständig ausgelastet, während es bei anderen Betriebsmitteln im Netz zu keiner unzulässig hohen Auslastung kommt.

### Optimierung VW ID.3 inklusive Gleichzeitigkeitsfaktoren

Bei dieser Betrachtung werden bei allen Ladesäulen im Netz (Garage und Außenbereich) Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt.

Gegenüber dem Fall ohne Ladevorgänge in der Garage ist die Leitung von der Netzeinspeisung zur Garage um 1,11 % mehr ausgelastet. Es ergibt sich damit eine Auslastung von 11,03 %. Die Auslastungen der restlichen Leitungen steigen im Zehntel-Prozent Bereich, und sind damit vernachlässigbar. Aus den Analysen ist ersichtlich, dass eine Optimierung des Fuhrparks auch aus der Sicht des Mittelspannungsnetzes möglich ist. Alle anderen Szenarien, welche in den vorherigen Betrachtungen in der Garage durchgerechnet wurden, haben geringere Auswirkungen auf das Netz als die Optimierung inklusive VW ID.3. Aus der Sicht des Mittelspannungsnetzes sind diese Fälle damit alle zulässig, und es bedarf keiner weiteren Untersuchung dieser Fälle.

#### 5.4.11 Zusammenfassung Netzauswirkungen

Das Netz in der Südstadt ist so dimensioniert, dass ein Ausbau der Ladeeinrichtungen erfolgen kann. Je nach Elektrofahrzeuganteil im Fuhrpark ist eine Implementierung von Lademanagement oder eine Transformatorverstärkung zu berücksichtigen. Auch bei einer Steigerung der Ladeinfrastruktur um den Faktor 16 und der Optimierung des Fahrzeugpools ergeben sich keine unzulässigen Betriebsmittelauslastungen oder Spannungsbandverletzungen im Mittelspannungsnetz.

Ladevorgänge mit unterschiedlichen Ladeleistungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf das Verteilnetz. Bei Ladeleistungen von 3,7 kW sind die Betriebsmittel im Netz am geringsten ausgelastet. Durch die längere Dauer der Ladevorgänge ist das Netz jedoch länger mit dieser Ladeleistung belastet. Weiters können durch längere Ladezeiten Konzepte wie Lademanagement nicht so gut umgesetzt werden, wie bei kürzerer Ladedauer. Ladevorgänge an Schnellladesäulen haben die stärksten Auswirkungen auf das Netz. Diese Spitzenauslastung tritt aufgrund der kurzen Ladedauer nur in einem begrenzten Zeitraum auf.

Werden Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt, so sinkt die Auslastung des Netzes. Dies ist die Auslastung, mit der in der Regel zu rechnen ist. Zeitweise kann mit höheren Auslastungen gerechnet werden, und zu anderen Zeitpunkten ist die Auslastung geringer. Aus diesem Grund ist es wichtig, auch die maximalen Auslastungen zu betrachten. In den untersuchten Szenarien kommt es (mit Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren) nie zu einer unzulässig hohen Auslastung der Betriebsmittel. Der Transformator für die Versorgung der Garage ist damit ausreichend stark dimensioniert. Bei einem Ausbau oder einer Erweiterung dieser Transformatoren sinkt die Auslastung der einzelnen Transformatoren weiter ab, jedoch sind für den Umbau Investitionen notwendig.

Durch die kurze Entfernung zwischen Ladesäulen und Transformator, und durch die Überdimensionierung der Transformatoren können Elektromobilitätsprojekte am betrachteten Standort problemlos umgesetzt werden. Für vergleichbare Projekte ist es dennoch wichtig zu überprüfen, ob die Betriebsmittel (Leitungen und Transformatoren) für die hohen Ladeströme in der Elektromobilität geeignet sind, da nicht immer kurze Leitungen und Überdimensionierung der Transformatoren möglich sind.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse, sowie ein Ausblick in mögliche zukünftige Erweiterungen des Elektromobilitätsanteils, welche in den betrachteten Szenarien untersucht wurden.

### 6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

In diesem Unterpunkt werden die Erkenntnisse der bearbeiteten Themen beschrieben.

#### Notwendigkeit der Messungen

Um ausreichend Kenntnis über die elektrischen Parameter der Elektrofahrzeuge zu erlangen, sind sowohl Messungen direkt an der Batterie, als auch Messungen an den Ladepunkten notwendig. Erstere bestimmen, wie schnell die Batterie geladen wird, und wie stark diese belastet wird, wohingegen die Messungen an den Ladepunkten für die Bestimmung der Auswirkungen auf das Stromnetz notwendig sind. Um alle notwendigen Messwerte zu erhalten sind mehrere verschiedene Messsysteme notwendig.

#### Elektroauto Fahrverhalten

Die elektrischen Parameter sind stark abhängig davon, auf welchem Streckenprofil und mit welcher Geschwindigkeit gefahren wird. Bei entsprechend hoher Durchschnittsgeschwindigkeit und hügeligem Streckenprofil kommt es zu einer Verminderung der Reichweite der Fahrzeuge. Durch ökonomisches Fahren kann die Reichweite erhöht werden. Das bedeutet, dass bewusst auf Rekuperationsphasen und Fahren unter der maximal erlaubten Geschwindigkeit zur Effizienzerhöhung geachtet wird.

In den betrachteten Fällen wurden Elektroautos in erster Linie für Kurzstrecken verwendet, und teilweise wurden Verbrennungskraftfahrzeuge verwendet, obwohl die Reichweite der Elektrofahrzeuge für die gefahrene Strecke ausgereicht hätte. Das zeigt, dass das Vertrauen in Elektrofahrzeuge teilweise noch unausgereift ist.

### Ladevorgänge von Elektroautos

Die Ladevorgänge unterscheiden sich in erster Linie durch deren Ladeleistung. Weiters gibt es verschiedene Ladeprofile welche dazu dienen, die Batterie bei hohen Speicherständen nicht mehr mit dem maximal möglichen Ladestrom zu belasten. Bei den betrachteten Ladevorgängen wurden CCCV-Laden und MSCC-Laden beobachtet.

Fahrzeuge nutzen nicht die maximal mögliche Ladeleistung der Ladepunkte, da es zu Verlusten durch den Ladeumrichter kommt. Weiters ist nicht jedes Fahrzeugmodell zwingend auf jede Maximalleistung ausgelegt. Dies hat sich beispielsweise bei den Schnellladevorgängen gezeigt, bei denen die möglichen 150 kW Leistung der Schnellladesäule nur zu etwa einem Drittel genutzt wurden.

Die Ladedauer steigt mit sinkender Ladeleistung. Wird die Ladeenergie als Produkt der beiden Größen betrachtet, so ergibt sich die minimale Ladeenergie für Ladesessions an 11 kW Ladepunkten. Von den betrachteten Ladepunkten ist dieser in den meisten Fällen der bevorzugte, da dieser einen guten Kompromiss zwischen Ladezeit und Installationsaufwand bietet.

### Lademanagement zur Verringerung der Netzlast

Lademanagement kann dazu beitragen, gleichzeitig stattfindende Ladevorgänge durch Koordinierung dieser zu vermeiden. Eine Erweiterung dazu ist Lastmanagement, bei dem die Ladevorgänge anhand des Lastzustandes des Netzes koordiniert werden. Beide können langfristig dazu dienen, die Auslastung des Netzes zu verringern, und den Ausbau von Elektromobilität voranzutreiben.

### Auswirkungen auf das Netz

Ladevorgänge wirken ohmsch-kapazitiv auf das Netz. Im betrachteten Netzabschnitt kam es zu keinen unzulässig hohen Netzurückwirkungen durch Unsymmetrie oder Oberschwingungen. Um die Auswirkung der Ladevorgänge (als Lasten) auf das Netz bestimmen zu können werden Gleichzeitigkeitsfaktoren für Elektromobilität bestimmt. Da es dazu keine eindeutige Vorgehensweise gibt ist es wichtig anzugeben, wie diese berechnet wurden.

Die Auslastung der Betriebsmittel und die Wirkleistung des einspeisenden Netzes steigen bei erhöhtem Elektromobilitätsanteil. Es muss damit überprüft werden, ob die Betriebsmittel überlastet sind.

Der betrachtete Transformator ist überdimensioniert, weswegen dieser in den betrachteten Fällen nicht unzulässig hoch ausgelastet ist. Auch die Kabel im Netzabschnitt sind so dimensioniert, dass es zu keiner Überlastung kommt. Es kommt bei den betrachteten

Fällen zu keiner Über- oder Unterschreitung des zulässigen Spannungsbandes. Dies ist primär durch die kurzen Leitungslängen im Netzabschnitt bedingt. Weiters liefern die kapazitiven Ladevorgänge einen Beitrag zur Spannungshaltung. Ebenso teilen sich die Ströme durch die Ringtopologie (bzw. leicht vermaschte Topologie) auf mehrere Leitungen auf, wodurch die Spannungsabfälle an diesen geringer sind.

Zusammenfassend bedeutet das, dass ein Ausbau der Ladesäulen und eine Erhöhung des Elektromobilitätsanteils möglich ist.

## 6.2 Ausblick auf weitere Entwicklungen

In den betrachteten Szenarienanalysen wurden mögliche zukünftige Entwicklungen untersucht. Bei einigen dieser Analysen hat sich gezeigt, dass die Ladesäulenzahl so dimensioniert ist, dass eine Steigerung des Elektromobilitätsanteils ohne weiteren Ausbau, bzw. mit geringen Ausbaumaßnahmen möglich ist. Um den Elektromobilitätsanteil im Fuhrpark zu optimieren sind Elektrofahrzeuge mit einer höheren Reichweite notwendig, was in den Tabellen 5.1 und 5.2 ersichtlich ist. Elektrofahrzeuge mit höherer Reichweite ermöglichen damit den maximal möglichen Elektrofahrzeuganteil, womit diese für zukünftige Erweiterungen notwendig sind.

Lade- und Lastmanagement können dazu beitragen, die Auslastung des Netzes durch Ladevorgänge zu verringern. Dazu ist es jedoch notwendig, die Netzlast zu jedem Zeitpunkt zu kennen, wodurch ein Ausbau der Smart Meter für diese Konzepte notwendig ist. In weiterer Folge müssen Lade- und Lastmanagement gut koordiniert werden, um die Elektrofahrzeuge optimal nutzen zu können. Mit diesen Konzepten ist es in Zukunft möglich, die vorhandene Ladeinfrastruktur effizienter zu nutzen.

Bezüglich der Auswirkungen auf das Netz ist zu beachten, dass nicht immer der optimale Fall (wie im betrachteten Netzabschnitt) vorliegt. Es kann vorkommen, dass Leitungen oder Transformatoren in einzelnen Netzabschnitten nicht so stark überdimensioniert sind, dass ein Ausbau der Ladeinfrastruktur problemlos möglich ist. Weiters sind auch die Leitungslängen in vielen Netzabschnitten länger als im betrachteten, oder es kann eine andere Netztopologie wie zum Beispiel Strahlentopologie vorliegen. In diesen Fällen kann es vorkommen, dass das zulässige Spannungsband nicht ohne Umbaumaßnahmen eingehalten werden kann.

Für die Zukunft ergeben sich somit weiterhin viele Herausforderungen für Netzbetreiber, die jedoch lösbar sind. Die Ergebnisse der Arbeit haben gezeigt, dass eine erhöhte Integration von Ladeinfrastruktur in das Stromnetz, und damit auch eine Erhöhung des Elektroautoanteils aus der Sicht des Netzes möglich ist.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, “Übereinkommen von Paris.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de) [Zugriff am 23. 12. 2020].
- [2] Europäische Kommission, “Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de) [Zugriff am 23. 12. 2020].
- [3] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, “Analyse der Klimaschutzinstrumente im Luftverkehr zur CO<sub>2</sub>-Reduktion.” [Online]. Available: <https://www.bdl.aero/de/publikation/analyse-der-klimaschutzinstrumente-im-luftverkehr-zur-co2-reduktion/> [Zugriff am 23. 12. 2020].
- [4] emobilitaet.online Das Anwenderportal, “Kapitel 3 Anforderungen an Batteriesysteme.” [Online]. Available: <https://emobilitaet.online/emobiliversity/batterietechnologie/717-kapitel-3-anforderungen-an-batteriesysteme> [Zugriff am 09. 07. 2020].
- [5] W. Gawlik, *Lehrveranstaltung 370.035 Regenerative Energieversorgung vom 08.10.2019 – Energiespeicher*. TU Wien, 2019.
- [6] D. Fasthuber, “Auswirkungen und Potentiale der Integration von Elektromobilität in das elektrische Energiesystem Österreichs,” Diss., TU Wien, 2019.
- [7] J. Kowal, J. Drillkens, und D. U. Sauer, “Teil 9: Superkondensatoren – Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren,” 2013. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/motorentchnik/batterie/teil-9-superkondensatoren-elektrochemische-doppelschichtkondensa/6562708> [Zugriff am 09. 07. 2020].
- [8] Autoscout24, “E-Auto Batterie: Funktion, Kosten, Pflege,” 2019. [Online]. Available: <https://www.autoscout24.at/informieren/ratgeber/e-mobilitaet/batterie/> [Zugriff am 09. 07. 2020].

- [9] F. Hannig, T. Smolinka, P. Bretschneider, S. Nicolai, S. Krüger, F. Meißner, und M. Voigt, "BMW - Auftragsstudie 08/28: „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie,“ 2009.
- [10] R. Korthauer, *Handbuch Lithium Ionen Batterien*. Springer, 2013.
- [11] D. Linden und T. B. Reddy, *Handbook of Batteries Third Edition*. McGraw-Hill Handbooks, 2001.
- [12] P. Kritzer und J. A. Cook, "Nonwovens as Separators for Alkaline Batteries - An Overview 154(5)," *Journal of the Electrochemical Society*, pp. A481–A494, 2007.
- [13] A. Huber, "E-Auto-Batterie: Das müssen Sie wissen," Jan. 2020. [Online]. Available: <https://www.autobild.de/artikel/technik-elektroauto-akku-funktion-kosten-16202315.html> [Zugriff am 10. 07. 2020].
- [14] P. Kurzweil und O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher*. Springer, 2015.
- [15] P. Schäfer, "Verbundprojekt erforscht Recycling von Elektroauto-Batterien," Jun. 2018. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/batterie/recycling/verbundprojekt-erforscht-recycling-von-elektroauto-batterien/15804568> [Zugriff am 10. 07. 2020].
- [16] IT Wissen, "Ladezustand," Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.itwissen.info/Ladezustand-state-of-charge-SoC.html> [Zugriff am 10. 07. 2020].
- [17] H. Wenzl, "Vorlesung Laden," 2011.
- [18] IT Wissen, "Dod (depth of discharge)," Jun. 2020. [Online]. Available: <https://www.itwissen.info/DoD-depth-of-discharge-Entladungstiefe.html> [Zugriff am 10. 07. 2020].
- [19] A. Mangler, O. Kanoun, und T. Günther, "Alterungszustand von Batterien schnell und detailliert bestimmen," Sep. 2017. [Online]. Available: <https://www.rutronik.com/de/artikel/detail/News/alterungszustand-von-batterien-schnell-und-detailliert-bestimmen/> [Zugriff am 13. 07. 2020].
- [20] P. Schnabel, *Elektronik-Fibel 7. Auflage*. Elektronik Kompendium, 2017.
- [21] R. Schoblik, *Antriebe von Elektroautos in der Praxis: Motoren, Batterietechnik, Leistungstechnik*. Franzis Verlag, 2013.

- [22] P. Keil und A. Jossen, “Charging protocols for lithium-ion batteries an their impact on cycle lief – An experimental study with different 18650 high-power cells,” *Journal of Energy Storage*, pp. 125–141, May 2016.
- [23] D. Fasthuber und M. Litzlbauer, “Erkenntnisse der Messung von Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge in der Modellregion „e-pendler in niederösterreich“,” 2016.
- [24] I. Buchmann, “How to Charge Li-ion with a Parasitic Load,” Oct. 2017. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_charge\\_li\\_ion\\_with\\_a\\_parasitic\\_load](https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_charge_li_ion_with_a_parasitic_load) [Zugriff am 13. 07. 2020].
- [25] J. Marcinkowski, “Aktiver Ladungsausgleich bei Lithium-Ionen-Akkusätzen,” *AUTOMOBIL-ELEKTRONIK*, pp. 26–28, Oct. 2010.
- [26] N. Lyne, “BMS noch genauer messen,” Apr. 2020. [Online]. Available: <https://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/elektromobilitaet/bms-noch-genauer-messen-176180.html> [Zugriff am 13. 07. 2020].
- [27] e-mobileo, “Überblick über den Kommunikationsbus FlexRay für den Automobilbereich.” [Online]. Available: <https://www.e-mobileo.de/schieflast-begrenzung-deutschland-oesterreich-schweiz/> [Zugriff am 25.01.2021].
- [28] AG 4 – Normung, Standardisierung und Zertifizierung, “Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0,” 2014.
- [29] M. Rosekeit, B. Lunz, D. U. Sauer, und R. W. De Doncker, “Bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge als Energiespeicher im Smart Grid,” 2012.
- [30] Wallbox Chargers, “Ladestrom: Was ist der Unterschied zwischen AC und DC?” [Online]. Available: [https://wallbox.com/de\\_at/faqs-ladestrom-unterschied-ac-dc](https://wallbox.com/de_at/faqs-ladestrom-unterschied-ac-dc) [Zugriff am 27. 10. 2020].
- [31] e-mobileo, “E-Auto laden: Schieflastgrenzen in Deutschland, Österreich und in der Schweiz.” [Online]. Available: <https://www.e-mobileo.de/schieflast-begrenzung-deutschland-oesterreich-schweiz/> [Zugriff am 14.01.2021].
- [32] Generation Strom, “Einphasiges Laden,” Jan. 2020. [Online]. Available: <https://generationstrom.com/2019/03/14/einphasiges-laden/> [Zugriff am 02.04. 2020].
- [33] B. Thormann, J. Vopaca, R. Braunstein, und T. Kienberger, “Auswirkung einphasiger Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen auf städtische Niederspannungsnetze,” 2018.

- [34] Store + Charge E-Mobility Solutions, “SCHUKO STECKER.” [Online]. Available: <https://www.store-charge.com/service-und-ratgeber/wissenswertes/ladestecker/schuko/> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [35] R. Reichel, “Das Laden von E-Autos,” May 2018. [Online]. Available: <https://www.solarmobil-verein-erlangen.de/wp-content/uploads/2018/02/2018-03-Ladepraxis-Erlangen.pdf> [Zugriff am 02. 04. 2020].
- [36] OGH, “Installation einer Wallbox für einphasiges Laden eines E-Autos mit 3,7 kW bei im Wohnungseigentum stehenden KFZ-Abstellplatz ist privilegierte Änderung im Sinn des WEG,” Dec. 2019. [Online]. Available: <https://www.ogh.gv.at> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [37] Netz Niederösterreich, “Elektromobilität in Niederösterreich.” [Online]. Available: <https://www.netz-noe.at/Netz-Niederosterreich/Service/E-Mobilitat.aspx> [Zugriff am 25.01.2021].
- [38] evalbo, “Typ 2 Stecker Beschaltung,” Feb. 2015. [Online]. Available: <https://www.evalbo.de/2015/02/14/typ-2-stecker-beschaltung/> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [39] D. Cordt, “Mit geprüfter Elektromobilität sicher in die Zukunft,” *Branchenguide Elektromobilität*, pp. 12 – 13, 2020.
- [40] E Mobility Solutions, “CCS Stecker.” [Online]. Available: <https://www.store-charge.com/service-und-ratgeber/wissenswertes/ladestecker/ccs/> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [41] B. Gatton, “What is CCS charging?” Oct. 2018. [Online]. Available: <https://thedriven.io/2018/12/10/what-is-ccs-charging/> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [42] ecomento, “Das ABC des Elektroauto-Ladens: Fakten & Wissenswertes.” [Online]. Available: <https://ecomento.de/ratgeber/elektroauto-laden-in-5-minuten-zum-fachmann/> [Zugriff am 28.04. 2020].
- [43] Chademo Association, “Chademo.” [Online]. Available: <https://www.chademo.com/> [Zugriff am 07. 03. 2020].
- [44] Store + Charge E-Mobility Solutions, “CHADEMO.” [Online]. Available: <https://www.store-charge.com/service-und-ratgeber/wissenswertes/ladestecker/chademo/> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [45] M. Landau, J. Prior, R. Gaber, M. Scheibe, R. Marklein, und J. Kirchhof, “Technische Begleitforschung Allianz Elektromobilität – Tebale: Abschlussbericht,” 2016.

- [46] Elektroauto-News, “Tesla Supercharger 3.0: mit 250kW Energie für über 120km in fünf Minuten laden,” Jul. 2020. [Online]. Available: <https://www.elektroauto-news.net/2019/tesla-supercharger-v3-250-kw-ueber-120-km-in-fuenf-minuten-laden> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [47] STEAG Solar Energy Solutions, “E-Mobilität auf dem Vormarsch: Mit Solarstrom das Elektroauto tanken,” Jun. 2020. [Online]. Available: <https://www.sens-energy.com/de/ladeleistung-fuer-das-elektroauto> [Zugriff am 15. 07. 2020].
- [48] S. Schaal, “Infradianba: Chinesisch-deutsches Batteriewechsel-Projekt in Berlin,” 2020. [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2020/01/09/infradianba-chinesisch-deutsches-batteriewechsel-projekt-in-berlin/> [Zugriff am 25.01. 2020].
- [49] ESL E-Mobility, “Walli LIGHT | Typ 1 Wallbox Ladestation Elektroauto mit Kabel | 3,7 kW | 16A | 230V | 1 phasig.” [Online]. Available: <https://esl-emobility.com/de/walli-light-elektroauto-ladestation-wallbox-ladekabel-typ-1-3-7kw-16a-1-phasig.html> [Zugriff am 29. 12. 2020].
- [50] The Mobility House, “AKEBA Wallbox 98.150 KeContact P30 b-series.” [Online]. Available: [https://www.mobilityhouse.com/de\\_de/keba-wallbox-98-150-kecontact-p30-b-series.html](https://www.mobilityhouse.com/de_de/keba-wallbox-98-150-kecontact-p30-b-series.html) [Zugriff am 15. 01. 2020].
- [51] The Mobility House, “Dc-wallbox (2 Anschlüsse).” [Online]. Available: [https://www.mobilityhouse.com/de\\_de/dc-wallbox-24kw-ccs-and-chademo.html](https://www.mobilityhouse.com/de_de/dc-wallbox-24kw-ccs-and-chademo.html) [Zugriff am 29. 12. 2020].
- [52] A. Hofacker und C. Köllner, “WLTP und NEFZ im Vergleich,” May 2017. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/emissionen/wltp-und-nefz-im-vergleich/6560846> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [53] Deutsche Energie-Agentur, “Informationen für Händler: Umstellung auf WLTP,” 2018. [Online]. Available: <https://www.pkw-label.de/auto-klima/nachricht/news/informationen-fuer-haendler-umstellung-auf-wltp> [Zugriff am 25.01. 2020].
- [54] S. Leichsenring, “Elektroautos 2020/2021: Alle Modelle in der Übersicht,” Jul. 2020. [Online]. Available: <https://de.motor1.com/features/296693/elektroautos-2019-marktueberblick-modelle/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [55] S. Eisenkrämer, “Der Münchner Elektro-Pionier BMW i3 im Test,” Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/elektrofahrzeuge/fahrzeugtechnik/der-muenchner-elektro-pionier-bmw-i3-im-test/17081716> [Zugriff am 16. 07. 2020].

- [56] ADAC, “VW ID.3: Erste Testfahrt und Kostenvergleich,” Sep. 2020. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/#:~:text=Akku%3A%20mittlere%20Gr%C3%B6%C3%9Fe%20mit%2058,zu%20100%20Prozent%20gef%C3%BClt%20ist> [Zugriff am 28. 09. 2020].
- [57] ADAC, “Mini Cooper SE: So fährt sich der Elektro-Mini,” Oct. 2020. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/mini/mini-electric/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [58] Future Driving, “Nissan Leaf 2.Zero.” [Online]. Available: <https://www.futuredriving.at/nissan-leaf-2-0/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [59] ADAC, “Tesla Modell 3: Das Elektroauto im Test,” May 2019. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/tesla-model-3/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [60] Auto Motor Sport, “Ladestrom- und Stecker-Arten für Elektroautos,” Nov. 2017. [Online]. Available: <https://www.auto-motor-und-sport.de/ratgeber/ladestrom-stecker-elektroauto-reichweite-technik-ladestation/> [Zugriff am 09. 07. 2020].
- [61] S. Schaal, “Tesla erhöht die Ladeleistung im Modell 3 auf 200kW,” Nov. 2019. [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2019/06/11/tesla-erhoeht-die-ladeleistung-im-model-3-auf-200-kw/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [62] ADAC, “Audi e-tron quattro: So gut ist der Elektro-SUV,” Jul. 2020. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/audi/audi-e-tron-quattro/> [Zugriff am 16. 07. 2020].
- [63] Siemens, *SEM3 – Embedded Micro Metering Module: User Manual*, 2014.
- [64] Siemens, *SEM3 – Embedded Micro Metering Module: Selection and Application Guide*, 2014.
- [65] Siemens, *SICAM A8000*, 2020.
- [66] Siemens, *SICAM A8000 Serie CP-8050 Handbuch*, 2020.
- [67] J. Schlabbach und W. Mombauer, *Power Quality - Entstehung & Bewertung von Netzrückwirkungen. Netzanschluss erneuerbarer Energiequellen: VDE Schriftreihe Nr.127*, 2008.
- [68] Siemens, *SICAM Power Quality and Measurement*.

- [69] Siemens, “PSS SINCAL – Software zur Analyse und Planung aller Arten von Energieversorgungsnetzen.” [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/pss-software/pss-sincal.html> [Zugriff am 15. 12. 2020].
- [70] Netz Niederösterreich, *Merkblatt der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen gemäß der Europäischen Norm EN50160*.
- [71] Aviloo, “Aviloo Online Portal,” 2020. [Online]. Available: <https://portal.aviloo.com> [Zugriff am 07. 10. 2020].
- [72] ADAC, “VW e-Golf (04/17 - 05/20).” [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/golf/vii-facelift/266575/> [Zugriff am 02. 11. 2020].
- [73] ADAC, “BMW i3 (94 Ah) (07/16 - 08/17).” [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/bmw/i3/1generation/255581/> [Zugriff am 02. 11. 2020].
- [74] EVN, “EVN Ladesäulen.” [Online]. Available: <https://www.evn.at/Businesskunden/Energie-Dienstleistungen/E-Mobilitatslosungen/Ladelosungen-im-Betrieb/Ladesaulen.aspx> [Zugriff am 14.01.2021].
- [75] Fachverband Batterien, “Abhängigkeiten und Regeln beim Einsatz von PzS- und PrV-Antriebsbatterien bei tiefen Temperaturen (Kühlhauseinsatz).” [Online]. Available: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Verband/Fachverbaende/Batterien/Merkblaetter/Industriebatterien/21\\_Einsatz\\_von\\_Antriebsbatterien\\_bei\\_tiefen\\_Temperaturen\\_2005-03.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Verband/Fachverbaende/Batterien/Merkblaetter/Industriebatterien/21_Einsatz_von_Antriebsbatterien_bei_tiefen_Temperaturen_2005-03.pdf) [Zugriff am 22. 09. 2020].
- [76] Hella IBScontrol, “FAQs.” [Online]. Available: [https://www.hella.com/hella-fr/assets/media\\_global/F\\_FAQzumIBS\\_DE.pdf](https://www.hella.com/hella-fr/assets/media_global/F_FAQzumIBS_DE.pdf) [Zugriff am 22.09. 2020].
- [77] Fasthuber, Dominik (2020): E-Mail-Verkehr zur zufälligen SOC-Steigerung im Zuge eines Ladevorganges. Mitarbeiter an der TU-Wien im Forschungsbereich Elektromobilität, 22.09.
- [78] ADAC, “VW Golf 8: Überraschend anders – erster ADAC Test.” [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-golf/> [Zugriff am 11. 11. 2020].
- [79] Energie Gedanken, “Umrechnungsfaktoren.” [Online]. Available: <https://www.energie-gedanken.ch/umrechnungsfaktoren/> [Zugriff am 11. 11. 2020].

- [80] Spritmonitor, “Volkswagen - Golf - Golf V 1.4 75 PS.” [Online]. Available: <https://www.spritmonitor.de/de/detailansicht/763368.html> [Zugriff am 11. 11. 2020].
- [81] Auto Motor Sport, “So viel Akku fressen tiefe Temperaturen,” 2020. [Online]. Available: [https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/naf-elektroauto-reichweite-winter-test/#:~:text=Bei%20kalten%20Temperaturen%20sind%20es%20259%20reale%20Kilometer.&text=Foto%3A%20Audi-,F%C3%BCr%20eine%20Ladung%20von%20zehn%20auf%2080%20Prozent,bei%20%2D2%20Grad%2030%20Minuten.&text=Der%20Nissan%20Leaf%20\(40%20kWh,sind%20es%20209%20reale%20Kilometer.](https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/naf-elektroauto-reichweite-winter-test/#:~:text=Bei%20kalten%20Temperaturen%20sind%20es%20259%20reale%20Kilometer.&text=Foto%3A%20Audi-,F%C3%BCr%20eine%20Ladung%20von%20zehn%20auf%2080%20Prozent,bei%20%2D2%20Grad%2030%20Minuten.&text=Der%20Nissan%20Leaf%20(40%20kWh,sind%20es%20209%20reale%20Kilometer.) [Zugriff am 30. 11. 2020].
- [82] R. Paschotta, “Laden von Elektroautos.” [Online]. Available: [https://www.energie-lexikon.info/laden\\_von\\_elektroautos.html](https://www.energie-lexikon.info/laden_von_elektroautos.html) [Zugriff am 11. 11. 2020].
- [83] Innoelectric, “On-Board Charger.” [Online]. Available: <https://innoelectric.ag/on-board-charger-2-2/> [Zugriff am 11. 11. 2020].
- [84] Aviloo, “Aviloo Batterie Test.” [Online]. Available: <https://aviloo.com/aviloo-batterie-test/> [Zugriff am 12. 11. 2020].
- [85] M. Hahn und C. Siemetzberger, *E-Mobilität Echsenbach*. Springer Verlag, 2020.
- [86] eplan, “Gleichzeitigkeitsfaktor.” [Online]. Available: [https://www.eplan.help/help/platform/2.6/de-DE/help/Content/htm/Glossary\\_o\\_gleichzeitigkeitsfaktor.htm](https://www.eplan.help/help/platform/2.6/de-DE/help/Content/htm/Glossary_o_gleichzeitigkeitsfaktor.htm) [Zugriff am 12. 11. 2020].
- [87] Österreichs E-Wirtschaft, “TAEV - Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000V, mit Erläuterungen der einschlägigen Vorschriften,” 2012.
- [88] W. Kaufmann, “Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme,” 1995.
- [89] G. Kiesbauer, “Intelligentes Lademanagement: Lastspitzen vermeiden, bedarfsgerecht laden.” [Online]. Available: <https://partner.mvv.de/blog/intelligentes-lademanagement-lastspitzen-vermeiden-bedarfsgerecht-laden> [Zugriff am 17. 11. 2020].
- [90] FH Vorarlberg, “Intelligentes Lademanagement für Elektroautos.” [Online]. Available: <https://www.fhv.at/forschung/forschungsnews/forschungsnews-temp/forschungsnewsletter-archiv/2019/okt/intelligentes-lademanagement-fuer-elektroautos/> [Zugriff am 17. 11. 2020].

- [91] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., “Intelligentes Lademanagement entwickelt – Forschungsprojekt ePlanB abgeschlossen.” [Online]. Available: <https://www.ffe.de/publikationen/pressemeldungen/745-intelligentes-lademanagement-entwickelt-forschungsprojekt-eplanb-abgeschlossen> [Zugriff am 17. 11. 2020].
- [92] Sage Automation, “Microgrids.” [Online]. Available: <https://www.sageautomation.com/smart-microgrid-energy-solutions-to-optimise-energy-delivery> [Zugriff am 17. 11. 2020].
- [93] B. P. Esther und K. S. Kumar, “A survey on residential demand side management architecture, approaches, optimization models and methods,” 2016.
- [94] D. L. Schultis und Y. Guo, *Rechenlabor Smart Grids*. TU Wien, 2020.
- [95] e-Control, “Nutzung des Tarifkalkulators mit Smart Meter.” [Online]. Available: <https://www.e-control.at/tarifkalkulator-und-smart-meter> [Zugriff am 18. 11. 2020].
- [96] ADAC, “VW ID.3: Erste Testfahrt & Kostenvergleich,” 2020. [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/> [Zugriff am 24. 11. 2020].
- [97] W. Gawlik, *Energieversorgung – Skriptum zur Vorlesung 370.002*. TU Wien, 2018.
- [98] R. Haß, “Der Transformator.” [Online]. Available: <http://www.reimerhass.pmbrandt.de/kssp.html> [Zugriff am 13.01.2021].
- [99] Antriebstechnik FH Stralsund, “Bedingungen für das Parallelschalten von Drehstrom-Transformatoren.” [Online]. Available: <http://www.antriebstechnik.fh-stralsund.de/1024x768/Dokumentenframe/Kompodium/Schaltgruppen/Parallelbetrieb.htm> [Zugriff am 13.01.2021].
- [100] Faber Kabel, *Starkstromkabel NYJ-J/-O nach VDE 0276-603*, 2010.
- [101] A. Englert, “Energieverteiltertransformatoren,” 2019.
- [102] e-Control, “Quartalsbericht Ladestellenverzeichnis Q2,” 2020.
- [103] Österreichs Energie, “Abschlussbericht des EP EMN Ladeinfrastruktur,” 2016.
- [104] e-Control, “ladestellen.at.” [Online]. Available: <https://www.ladestellen.at/#/electric> [Zugriff am 11.01.2021].



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Ragone Diagramm [7]	7
2.2	Kategorien Batteriespeicher [9]	9
2.3	Schematischer Aufbau Li-Batterie [11]	11
2.4	Batteriezellen [14]	12
2.5	Batteriemodul [15]	13
2.6	CV Ladeverfahren [6]	16
2.7	CC Ladeverfahren [6]	16
2.8	CCCV Ladeverfahren [24]	17
2.9	Pulsladeverfahren [6]	18
2.10	Reflexladen	19
2.11	MSCC-Laden	19
2.12	Batterie Management System [10]	20
2.13	Ladungsausgleich [25]	22
2.14	Batteriekontrolleinheit [10]	23
2.15	Lademöglichkeiten Elektroautos [28]	24
2.16	Interface Wechselstrom Ladegleichstrom [29]	25
2.17	Vollständiges Ladegerät [29]	26
2.18	Vergleich DC-AC-Laden [30]	26
2.19	Schuko Steckdose Ladegerät [32]	28
2.20	Camping Stecker [32]	29
2.21	Wallbox einphasig [32]	29
2.22	Typ 2 Ladestecker [35]	31
2.23	Kommunikation Typ 2 - Stecker [38]	32
2.24	CCS Belegung [40]	34
2.25	CCS-Stecker [41]	35
2.26	Aufbau CHAdeMO-Stecker [44]	36
2.27	Innerer Aufbau des CHAdeMO-Standards [43]	37
3.1	Modularer Aufbau SEM 3 [63]	42
3.2	Aviloo-Messsystem	42
3.3	Abgänge Schaltschrank	43
3.4	Verkabelung Garage	45
3.5	Stromwandler Abgang	47

3.6	Siemens A8000 [66] . . . . .	49
3.7	Schaltschrank Messsystem . . . . .	50
3.8	Anordnung Power Quality Messgeräte [68] . . . . .	52
3.9	Aviloo Online Portal [71] . . . . .	58
3.10	Ladesäulen Innen . . . . .	60
3.11	Ladesäulen Nord [74] . . . . .	61
3.12	Ladesäulen Außen . . . . .	62
3.13	Schnellladesäule . . . . .	62
4.1	Fahrzeuge Fuhrpark . . . . .	63
4.2	Fahrtabschnitt 1 - BMW i3 . . . . .	64
4.3	Fahrtabschnitt 2 - BMW i3 . . . . .	65
4.4	Fahrtabschnitt 2.1 - BMW i3 . . . . .	66
4.5	Fahrtabschnitt 2.2 - BMW i3 . . . . .	66
4.6	Fahrtabschnitt 2.3 - BMW i3 . . . . .	67
4.7	SOC-Vergleich - BMW i3 . . . . .	68
4.8	Fahrt VW e-Golf . . . . .	69
4.9	SOC Fahrt VW e-Golf . . . . .	70
4.10	Ladevorgang BMW i3 . . . . .	73
4.11	Ladeleistung BMW i3 . . . . .	73
4.12	SOC-Vergleich Laden BMW i3 . . . . .	74
4.13	Schnellladen BMW i3 . . . . .	75
4.14	Temperatur BMW i3 AC-Laden . . . . .	76
4.15	Temperatur BMW i3 DC-Laden . . . . .	76
4.16	Ladevorgang VW e-Golf . . . . .	77
4.17	Ladeabschnitt 1 e-Golf . . . . .	78
4.18	Temperatur Ladeabschnitt 1 e-Golf . . . . .	79
4.19	Ladeabschnitt 2 e-Golf . . . . .	80
4.20	Ladeabschnitt 3 e-Golf . . . . .	81
4.21	MSCC-Laden e-Golf . . . . .	82
4.22	Überprüfung Temperaturabhängigkeit . . . . .	83
4.23	Schnellladen VW e-Golf . . . . .	85
4.24	Temperatur VW e-Golf AC-Laden . . . . .	86
4.25	Temperatur VW e-Golf DC-Laden . . . . .	87
4.26	Ladevorgang Schuko-Steckdose . . . . .	88
4.27	Kilometerstand und SOC - Darstellung . . . . .	91
4.28	Gleichzeitigkeitskurven Wohneinheiten [87] . . . . .	107
4.29	Gleichzeitigkeitskurven Fuhrpark . . . . .	110
4.30	Phasenspannungen Trafo Abgang . . . . .	112

4.31	Unsymmetriegrad . . . . .	113
4.32	Verlauf $\text{THD}_U$ . . . . .	114
4.33	Ladestrom VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	115
4.34	Ladeleistungen VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	115
4.35	Stromüberschwingungen VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	116
4.36	Boxplot OS VW e-Golf an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	117
4.37	Ladestrom VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten . . . . .	117
4.38	Ladeleistungen VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten . . . . .	118
4.39	Stromüberschwingungen L1 VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten . . . . .	119
4.40	Stromüberschwingungen L3 VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten . . . . .	119
4.41	Boxplot OS VW e-Golf an 11 kW Ladepunkten . . . . .	120
4.42	Ladestrom VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	120
4.43	Ladeleistungen VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	121
4.44	Stromüberschwingungen L1 VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	122
4.45	Stromüberschwingungen L2 VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	122
4.46	Stromüberschwingungen L3 VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	123
4.47	Boxplot OS VW e-Golf Schnellladevorgang . . . . .	124
4.48	Ladestrom BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	125
4.49	Ladeleistungen BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	125
4.50	Stromüberschwingungen BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	126
4.51	Boxplot OS BMW i3 an 3,7 kW Ladepunkten . . . . .	127
4.52	Ladestrom BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	127
4.53	Ladeleistungen BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	128
4.54	Stromüberschwingungen L1 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	129
4.55	Stromüberschwingungen L2 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	129
4.56	Stromüberschwingungen L3 BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	130
4.57	Boxplot OS BMW i3 an 11 kW Ladepunkten . . . . .	130
4.58	Ladestrom BMW i3 Schnellladevorgang . . . . .	131
4.59	Ladeleistungen BMW i3 Schnellladevorgang . . . . .	131
4.60	Stromüberschwingungen L1 BMW i3 Schnellladevorgang . . . . .	132
4.61	Stromüberschwingungen L2 BMW i3 Schnellladevorgang . . . . .	133
4.62	Stromüberschwingungen L3 BMW i3 Schnellladevorgang . . . . .	133
4.63	Boxplot OS BMW i3 an 150 kW Ladepunkten . . . . .	134
5.1	Microgrid Konzept [92] . . . . .	136
5.2	Erweiterte Gleichzeitigkeitskurve 11 kW . . . . .	142
5.3	Schematischer Aufbau betrachtetes Netz . . . . .	154
5.4	Durchschnittlicher Tag . . . . .	155
5.5	Durchschnittlicher Tag eine Ladesäule . . . . .	156

5.6	Stark frequentierter Tag . . . . .	157
5.7	Stark frequentierter Tag 2 Ladesäulen . . . . .	158
5.8	Extremfall - alle 11 kW . . . . .	159
5.9	Extremfall - alle 11 kW und ein HPC . . . . .	160
5.10	Extremfall - alle 11 kW und zwei HPC . . . . .	161
5.11	Extremfall - alle Ladepunkte belastet . . . . .	162
5.12	Extremfall - Schnellladevorgänge mit mehr Leistung . . . . .	163
5.13	Extremfall - maximale Belastung . . . . .	164
5.14	11 kW VW e-Golf . . . . .	165
5.15	11 kW BMW i3 . . . . .	166
5.16	3,7 kW Auswirkung . . . . .	167
5.17	11 kW Auswirkung . . . . .	168
5.18	150 kW Auswirkung . . . . .	169
5.19	11 kW Ladevorgänge . . . . .	171
5.20	11 kW Ladevorgänge inklusive GLZ . . . . .	172
5.21	11 kW Ladevorgänge inklusive einem HPC . . . . .	173
5.22	11 kW Ladevorgänge inklusive einem HPC und GLZ . . . . .	174
5.23	11 kW Ladevorgänge inklusive zwei HPC . . . . .	175
5.24	11 kW Ladevorgänge inklusive zwei HPC und GLZ . . . . .	176
5.25	60 % Szenario Lastflussrechnung . . . . .	179
5.26	90 % Szenario Lastflussrechnung . . . . .	180
5.27	Optimierung Szenario Lastflussrechnung . . . . .	181
5.28	Optimierung Szenario Lastflussrechnung - inklusive VW ID.3 . . . . .	183
5.29	Parallelschalten eines weiteren Transformators . . . . .	184
5.30	Austausch der Transformatoren . . . . .	186
5.31	Schematischer Aufbau betrachtetes Netz inklusive Ausbau der Ladepunkte	188

## Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich Ladetechnologien [49], [50], [51] . . . . .	38
2.2	Vergleich Ladetechnologien [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62] . . . . .	40
3.1	Ladesäulenauflistung Garage . . . . .	44
3.2	Ladesäulenauflistung Außen . . . . .	44
3.3	OS-Grenzwerte Geräte Klasse A bis 16 A laut EN 61000-3-2:2015 . . . . .	55
3.4	OS-Grenzwerte symmetrische Verbraucher ab 16 A laut EN 61000-3-12:2012 . . . . .	55
4.1	Auswertung Fahrkilometer . . . . .	92
4.2	SOC-Werte Fahrt . . . . .	93
4.3	Verbrauch der Fahrten in %/km . . . . .	94
4.4	Verbrauch der Fahrten in kWh/km . . . . .	95
4.5	Ladeleistung 3,7 kW Ladepunkt . . . . .	97
4.6	Ladeleistung 11 kW Ladepunkt . . . . .	98
4.7	Ladeleistung 150 kW Ladepunkt . . . . .	98
4.8	Ladedauer 3,7 kW . . . . .	100
4.9	Ladedauer 11 kW . . . . .	100
4.10	Ladedauer 150 kW . . . . .	100
4.11	Mittlere Ladeenergien . . . . .	101
4.12	SOC-Werte Beginn Ladevorgang . . . . .	102
4.13	SOC-Werte Ende Ladevorgang . . . . .	103
4.14	Ladegeschwindigkeiten in %/min . . . . .	103
4.15	Ladegeschwindigkeiten in kWh/h . . . . .	104
4.16	Vollladezeiten . . . . .	105
4.17	Berechnung der Gleichzeitigkeitsfaktoren . . . . .	109
5.1	Optimierung Fuhrpark . . . . .	147
5.2	Optimierung Fuhrpark inklusive VW ID.3 . . . . .	147
5.3	Verwendete Mittelspannungskabel . . . . .	153
5.4	Verwendete Niederspannungskabel . . . . .	153
5.5	Vergleich Netzauswirkung VW e-Golf - BMW i3 . . . . .	165
5.6	Vergleich Ladeleistungen . . . . .	170
5.7	Vergleich Ladeleistungen . . . . .	171
5.8	Vergleich Ladeleistungen . . . . .	176

5.9	Ergebnisse Momentaner Elektroautobestand . . . . .	178
5.10	Ergebnisse 60 % Szenario . . . . .	179
5.11	Ergebnisse 90 % Szenario . . . . .	180
5.12	Ergebnisse Optimierung . . . . .	182
5.13	Ergebnisse Optimierung Gleichzeitigkeitsfaktoren . . . . .	183
5.14	Ergebnisse Parallelschalten Transformator . . . . .	185
5.15	Ergebnisse Austausch Transformatoren . . . . .	186

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Breitenau, 3. Februar 2021

---

Matthias Maldet