



Schlussbericht vom 01.11.2020

DC-Fast-Charger mit Oberleitungsanschluss

Pilotprojekt am Standort Kriens, Schweiz



Quelle: CKW 05.2020



CKW.



verkehrsbetriebe
luzern
verbindet uns

Datum: 02.02.2021

Ort: Emmen / Luzern / Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW)
Rathausen 1
6032 Emmen

Verkehrsbetriebe Luzern AG
Tribtschenstrasse 65
6003 Luzern

Autor/in:

Marco Beyeler BFH, marco.beyeler@bfh.ch
Yoann Moullet BFH, yoann.moullet@bfh.ch
Stefan Schori BFH, stefan.schori@bfh.ch
Andelko Suker CKW AG, andelko.suker@ckw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Roland Brüniger, roland.brueeniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer: SI/502028-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Um die Kosten für Erdarbeiten und Leistungsspitzen zu vermeiden, wurde in diesem Projekt eine Schnellladestation im urbanen Gebiet an einer vorhandenen DC-Oberleitung für Trolley-Busse angeschlossen. Durch die Nutzung der Oberleitung wurden Erdarbeiten und Lastspitzen vermieden.

Der Einfluss dieser Ladestation auf die Oberleitungsspannung kann im Vergleich zum Einfluss der Trolleybusse als eher niedrig angesehen werden.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Wirkungsgrad der Ladestation abhängig vom Arbeitspunkt im Bereich von 93 bis 98 Prozent liegt.

Ein negativer Einfluss eines Ladeverfahrens mit 5-Minuten-Ladungen und 10 bis 15 Sekunden dauernden Unterbrechungen auf die Alterung im Vergleich mit einer Konstantladung ist unwahrscheinlich.

Résumé

Afin d'éviter les coûts de terrassement et les pics de tension, une borne de recharge rapide dans la zone urbaine a été reliée à une ligne aérienne DC existante pour les trolleybus dans ce projet. En utilisant la ligne aérienne, les travaux de terrassement et les pics de tension ont été évités.

L'impact de cette borne de charge sur la tension de la ligne aérienne peut être considérée comme plutôt faible par rapport à l'impact des trolleybus.

L'enquête a montré que l'efficacité de la borne de charge est comprise entre 93 et 98%, selon le point de fonctionnement.

Il est peu probable que le processus de charge avec des charges de 5 minutes et des interruptions de 10 à 15 secondes ait une influence négative sur le vieillissement par rapport à une charge constante.

Summary

In order to avoid the costs of earthworks and power peaks, a fast charging station in the urban area was connected to an existing DC overhead line for trolley buses in this project. By using the overhead line, earthworks and load peaks were avoided.

The influence of this charging station on the overhead line voltage can be viewed as rather low compared to the influence of the trolleybuses.

The investigation has shown that the efficiency of the charging station is in the range from 93 to 98 percent, depending on the operating point.

A negative influence of a charging process with 5-minute charging and 10 to 15-second interruptions on aging in comparison with constant charging is unlikely.



Take-home messages

- Einfluss auf Oberleitungsspannung ist gering
- Einsparungen beim Bau
- Vermeidung von Leistungsspitzen
- Zeitersparnis beim Bau und Genehmigungsverfahren (Time-2-Market)



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 3 |
| Résumé | 3 |
| Summary | 3 |
| Take-home messages | 4 |
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 7 |
| 1 Einleitung | 8 |
| 1.1 Ausgangslage und Hintergrund | 8 |
| 1.2 Motivation des Projektes | 8 |
| 1.3 Projektziele | 8 |
| 2 Anlagenbeschrieb | 9 |
| 3 Vorgehen, Methode und Ergebnisse | 11 |
| A Einfluss der Schnellladung auf die Batterielebensdauer | 11 |
| A.1 Schnellladestationen im Überblick..... | 11 |
| A.2 Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen..... | 11 |
| A.3 Alterungseffekte bei der Batterieladung..... | 12 |
| A.4 Ladestrategien | 12 |
| A.4.1 CC-CV..... | 13 |
| A.4.2 Multistage Constant Current Charging (MSCC) | 13 |
| A.4.3 Boost-Charging (BC)..... | 14 |
| A.4.4 Pulse-Charging | 14 |
| A.5 Einfluss unterschiedlicher Ladestrategien auf die Batteriealterung..... | 15 |
| A.6 Pulsladung im Kontext der Schnellladestation der CKW | 16 |
| A.7 Weitere Aspekte der Schnellladung..... | 17 |
| A.7.1 Zellchemie..... | 17 |
| A.7.2 Zelldesign..... | 17 |
| A.7.3 Systemdesign | 18 |
| A.8 Fazit der Literaturrecherche..... | 19 |
| B Messkampagne | 20 |
| B.1 Beschreibung der Ladestation | 20 |
| B.2 Ziele der Messkampagne..... | 20 |
| B.3 Messschema | 20 |
| C Analyse | 22 |
| C.1 Methodik | 22 |
| C.1.1 Boxplots | 22 |



| | |
|---|-----------|
| C.1.2 Analysezeitraum | 22 |
| C.2 Eingangsspannungsanalyse..... | 23 |
| C.3. Netzanalyse | 26 |
| C.3.1 Anmerkung zur Netzwerkmodellierung..... | 27 |
| C.4 Effizienz der Ladestation | 27 |
| C.5 Netzverluste | 29 |
| C.6 Zusammenspiel Oberleitung und Batterie-Managementsystem | 30 |
| C.7 Anzahl Ladungen und Feedback Kunden | 31 |
| 4 Schlussfolgerungen und Fazit | 32 |
| 5 Ausblick und zukünftige Umsetzung | 33 |
| 6 Nationale und internationale Zusammenarbeit | 33 |
| 7 Kommunikation | 33 |
| 8 Literaturverzeichnis | 34 |
| 9 Anhang | 35 |
| A Projektteam | 35 |
| B Eingangsspannungsanalyse | 35 |
| C Netzanalyse | 36 |
| C.1 Netztopologie..... | 36 |
| C.2 Abschätzung des Widerstands des Oberleitungsnetzes | 36 |



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| AC | Alternating current (Deutsch: Wechselstrom) |
| BMS | Batteriemanagementsystem |
| CC | Constant current |
| CCS | Combined Charging System (Ladesystem) |
| CHAdeMO | Ladesystem für Gleichspannung |
| CV | Constant voltage |
| DC | Direct current (Deutsch: Gleichstrom) |
| PC | Pulse-Charge |
| Li | Lithium |
| SOC | State of charge (Deutsch: Ladezustand) |



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Für die weitere Verbreitung von Elektroautos wird eine verbesserte Ladeinfrastruktur benötigt, insbesondere in urbanen Gebieten. Untersuchungen zeigen, dass 85% der Ladevorgänge von Elektroautos zu Hause oder am Arbeitsplatz erfolgen, der Rest an Destination Chargers (z.B. bei Einkaufszentren, Hotels) und an Fast Chargers entlang von Autobahnen. Für die Besitzer von Elektroautos, die zur Miete wohnen (Anteil in der Schweiz ca. 60%), ist die Ladung zu Hause leider oft nicht ohne weiteres möglich. Daher werden öffentliche DC-Schnellladestation in städtischen Gebieten benötigt. Solche Schnellladestation wiederum haben das Problem, dass sie an das AC-Netz angeschlossen werden müssen und damit typischerweise teure Erdarbeiten notwendig sind und Erschliessungsaufwände anfallen. Weiter entstehen im Betrieb signifikante Kosten durch die Leistungspreise für Lastspitzen. Diese Kosten verhindern in vielen Projekten eine Wirtschaftlichkeit, da die Leistungspreise bereits ab der ersten Ladung anfallen, aber erst bei einer hohen Auslastung der Ladestation durch leicht höhere Preise kompensiert werden können.

1.2 Motivation des Projektes

Um die Kosten für Erdarbeiten und Leistungsspitzen zu vermeiden, soll in diesem Projekt eine Schnellladestation im urbanen Gebiet an einer vorhandenen DC-Oberleitung für Trolley-Busse angeschlossen werden. Durch die Nutzung der Oberleitung werden Erdarbeiten und durch ein intelligentes Lademanagement auch Lastspitzen vermieden. Die Leistungsspitzen in der der Oberleitung entstehen während des Anfahrens der Busse. Wird das Elektroauto während Phasen tiefer Leistungsentnahme geladen, entstehen keine zusätzlichen Leistungsspitzen.

1.3 Projektziele

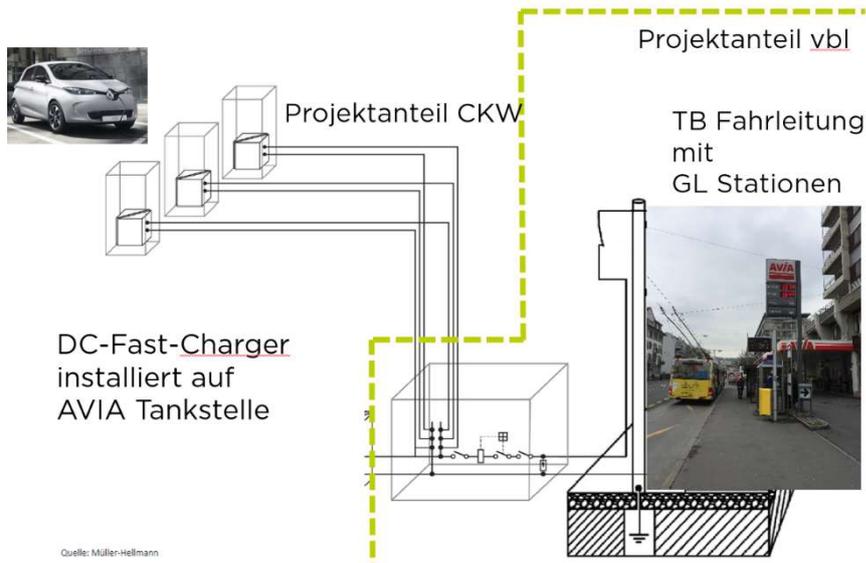
Im Demonstrationsprojekt soll eine Schnellladestation mit Anschluss an eine bestehende Trolley-Bus-Oberleitung realisiert und betrieben werden. Dabei soll das Zusammenspiel mit dem Batterie-Managementsystem von Elektroautos optimiert werden.

Mittels Literaturrecherche werden verschiedene Ladestrategien für die Schnellladung aufgezeigt und der Einfluss der Schnellladung auf die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie untersucht. Anhand einer Messkampagne wird der Betrieb der Ladestation analysiert.



2 Anlagenbeschreibung

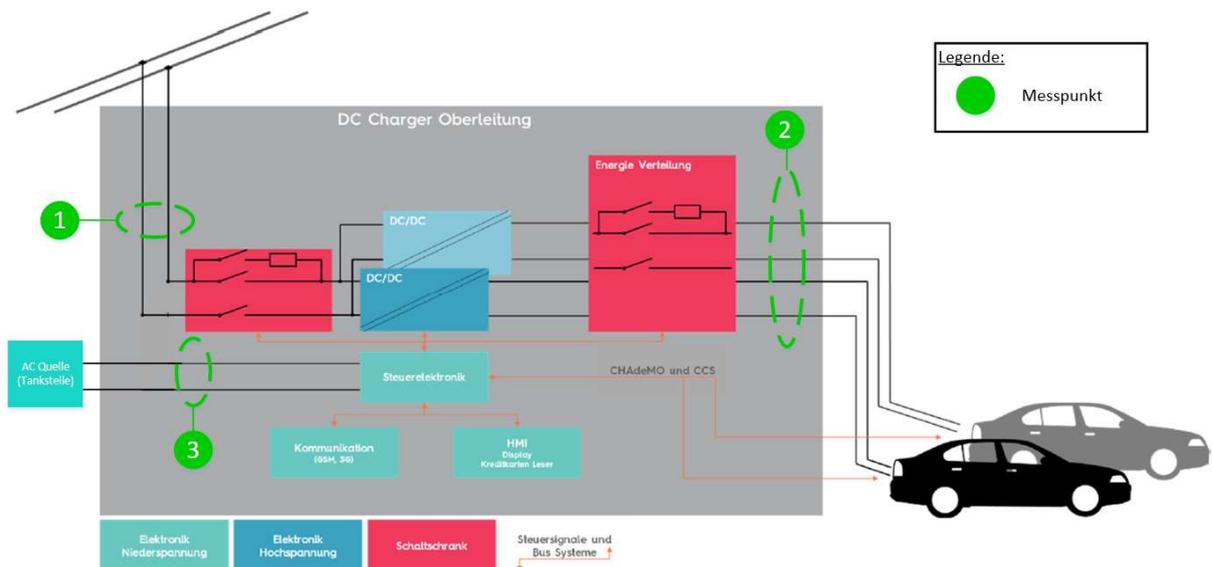
2.1 Der Abgriff der Oberleitung wurde von dem Partner vbl realisiert:



Quelle: Müller-Hellmann

2.2 Das Produkt:

Der Aufbau des Produktes ist in der folgenden Graphik schematisch dargestellt und wurde von dem Lieferanten EVTEC realisiert.





2.3 Standort:

AVIA Tankstelle (Eigentum der Schätzle AG) Luzernerstrasse 56, Kriens



Quelle: Bild BFH



3 Vorgehen, Methode und Ergebnisse

A Einfluss der Schnellladung auf die Batterielebensdauer

Schnellladestationen sind ein wichtiger Eckpfeiler für die erfolgreiche Etablierung der Elektromobilität. Durch kurze Nachladezeiten lässt sich der Aktionsradius von Elektroautos zügig erweitern, wodurch der Reichweitenangst entgegengewirkt werden kann. Die Schnellladung bringt jedoch auch einige Nachteile mit sich. Höhere Verluste bei der Speichernachladung und stärkere Batteriealterung sind dabei die wohl bedeutendsten. In diesem Kapitel wird der Einfluss unterschiedlicher Schnellladestrategien auf die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien basierend auf einer Literaturrecherche beschrieben.

A.1 Schnellladestationen im Überblick

Mit dem Aufkommen von Elektroautos wächst auch das Netz an Ladeinfrastruktur. Während AC-Ladestationen vorwiegend im Heimbereich für tiefe Ladeleistungen verwendet werden, eignen sich DC-Ladestationen für die Schnellladung bei hoher Ladeleistung. DC-Ladestationen unterscheiden sich nebst den unterschiedlichen Anschlusssystemen (CCS, CHAdeMO, Supercharger) auch bezüglich maximaler Ladeleistung. Die meisten Schnellladestationen werden zurzeit für eine Ladeleistung von 50 kW ausgelegt. Die Supercharger-Ladestationen des Unternehmens Tesla können eine Ladeleistung von bis zu 120 kW zu Verfügung stellen. Erste Pilotanlagen mit höherer Ladeleistung sind in der Testphase. BMW beispielsweise forscht zusammen mit Siemens an einer Schnellladestation mit einer Ladeleistung von bis zu 450 kW. Dabei sollen die ersten 100 km Reichweite in weniger als drei Minuten geladen werden können. Eine volle Aufladung (von 10 auf 80 % Ladezustand) soll innerhalb von 15 Minuten erfolgen können (1).

A.2 Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen

Um auf die in einer Lithium-Ionen-Batterie auftretenden Effekte bei der Schnellladung eingehen und den Einfluss auf die Alterung beleuchten zu können, müssen die wichtigsten Vorgänge beim Laden einer Lithium-Ionen-Zelle bekannt sein. Eine Zelle besteht aus einer Graphit-Elektrode (negative Elektrode), einer Lithium-Metalloxyd-Elektrode (positive Elektrode) und einem Separator. Als Ladungsträger dienen die Lithium-Ionen (Abbildung 1). Im nachfolgenden wird der Begriff Anode für die von Graphit umgebende negative Elektrode verwendet.

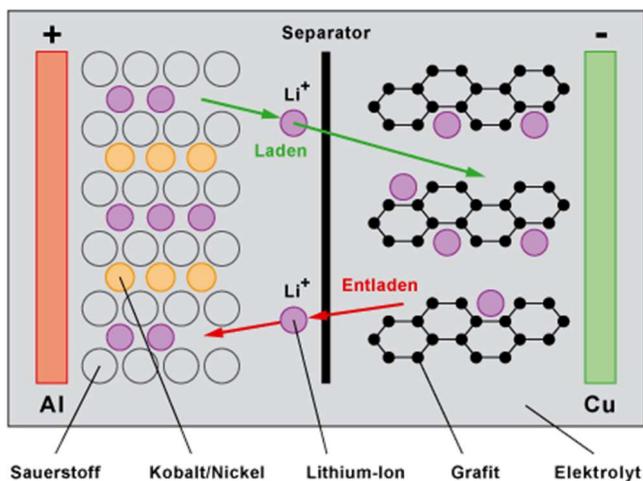


Abbildung 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (2)



Ladevorgang:

Beim Laden wandern Li-Ionen von der positiven Elektrode durch den Separator zur negativen Elektrode und lagern sich zwischen den Molekülebenen im Grafit ein. Angetrieben wird diese Bewegung durch das angelegte, äussere elektrische Feld der Ladeeinheit.

A.3 Alterungseffekte bei der Batterieladung

Lithium-Plating:

Unter Lithium-Plating versteht man das Abscheiden von metallischem Lithium an der negativen Elektrode. Die Lithium-Ionen werden dabei nicht wie gewünscht im Grafit eingelagert. Lithium-Plating entsteht unter bestimmten Betriebsbedingungen während des Ladevorgangs (3):

- Tiefe Temperatur ($<0\text{ °C}$)
- Hoher Ladestrom (Schnellladung)
- Hohe Zellspannung

Auswirkungen von Lithium-Plating:

- Bedingt durch den Kontaktverlust des metallischen Lithiums zur negativen Elektrode führt Lithium-Plating zum Verlust von aktivem Lithium für den eigentlichen Energiespeicherprozess. Die Energiespeicherkapazität der Zelle wird dadurch verringert.
- Die ionische Leitfähigkeit des Elektrolyten nimmt ab, was einem Anstieg des Innenwiderstands entspricht.
- Bedingt durch das abgelagerte metallische Lithium kommt es zu einer Porenverstopfung der Elektrodenoberfläche. Die aktive Elektrodenoberfläche verringert sich somit, wodurch die Stromdichte auf der verbleibenden Elektrodenoberfläche vergrössert wird. Diese höhere Stromdichte führt wiederum zu verstärkter Lithiumabscheidung (Lithium-Plating). Somit kann bei Lithium-Plating von einem sich selbst verstärkenden Effekt gesprochen werden.
- Das metallische Lithium auf der Graphitelektrode stellt zudem ein Sicherheitsrisiko dar, da dieses beim thermischen Durchgehen zu einer starken Wärmeentwicklung führt (3).

In der Literatur wird Lithium-Plating als der dominante Alterungsmechanismus bei der Batterieladung beschrieben (4).

A.4 Ladestrategien

Der Ladeprozess wird mittels Ladeprotokoll geregelt. Ein ideales Ladeprotokoll bewahrt die Li-Ionen-Batterie vor vorzeitiger Alterung, lässt die gesamte Batteriekapazität nutzen, ermöglicht eine schnelle Aufladung und ist darüber hinaus energieeffizient. Leider muss in der Realität oft ein Kompromiss zwischen diesen Anforderungen gefunden werden.

Die eigentliche Schnellladung der Batterie findet bis zu einem Ladezustand (SOC) von ca. 80 % statt. Dabei wird mit konstantem Strom geladen. Die darauffolgende Konstantspannungsphase dauert länger und lädt die Batterie komplett auf. Deshalb ist die Ladegeschwindigkeit bei der Schnellladung in erster Linie vom Ladestrom (I_{charge}) abhängig. Die verwendbare Speicherkapazität dagegen ist abhängig von der Ladespannung V_{charge} und dem Ladeschlussstrom I_{Ende} . Leider haben gerade diese Parameter auch einen entscheidenden Einfluss auf die Batteriealterung während des Ladevorgangs. Je höher der Ladestrom und die Ladespannung sind, desto stärker ist der negative Einfluss des Ladevorgangs auf die Batteriealterung (4). Neben der Erhöhung des Ladestromes (I_{charge}) führt auch eine tiefe Temperatur während des Ladevorgangs zu einem tieferen Anodenpotential. Sinkt das Anodenpotential weiter, führt dies zwangsläufig zu Lithium-Plating (5).



A.4.1 CC-CV

Die am weitesten verbreitete Ladestrategie ist CC-CV (CC = constant current, CV = constant voltage). Dabei wird die Batterie zuerst mit einem konstanten Ladestrom (I_{charge}) geladen, bis die Zellspannung einen Schwellwert erreicht. Danach folgt eine Phase mit konstanter Ladespannung (V_{charge}). In dieser Phase reduziert sich der Ladestrom kontinuierlich. Sinkt der Ladestrom auf einen definierten Schwellwert (I_{Ende}), wird der Ladevorgang beendet (Abbildung 2). Die CC-CV-Ladestrategie kann relativ einfach implementiert werden und wird nicht zuletzt deshalb oft verwendet (5).

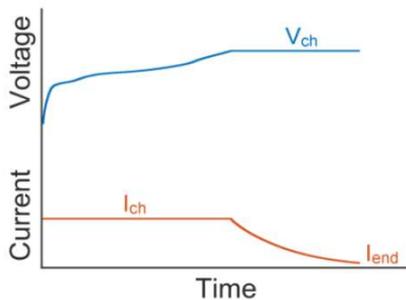


Abbildung 2: CC-CV-Ladestrategie (4)

A.4.2 Multistage Constant Current Charging (MSCC)

Beim MSCC wird die Konstantspannungsphase (CV) durch eine Reihe von weiteren Konstantstromphasen mit jeweils kleinerer Stromstärke ersetzt. Der Strom wird abgesenkt, sobald die Ladespannung V_{charge} erreicht wird. Dies wird so lange wiederholt, bis die Ladespannung V_{charge} auch auf der kleinsten Konstantstromstufe erreicht wird (Abbildung 3). Das MSCC-Protokoll ist eine Vereinfachung des CC-CV Protokolls. Da auf eine CV-Phase verzichtet wird, können Kosten für zusätzliche Hardware und Software für die Spannungsregelung eingespart werden. Die Kapazitätsausnutzung ist vergleichbar mit jener von CC-CV. Die Ladegeschwindigkeit ist bei MSCC gegenüber CC-CV allerdings leicht tiefer.

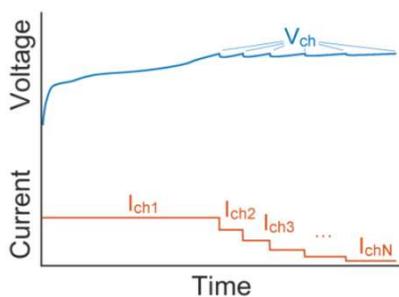


Abbildung 3: MSCC-Ladeverfahren (4)



A.4.3 Boost-Charging (BC)

Boost-Charging ist eine von CC-CV abgeleitete Ladestrategie, bei welcher eine zusätzliche Konstantstromphase zu Beginn des Ladeprozesses implementiert ist (Abbildung 4). In diesem Boost-Intervall wird mit einem höheren Ladestrom geladen, was die Ladezeit gegenüber CC-CV verkürzt.

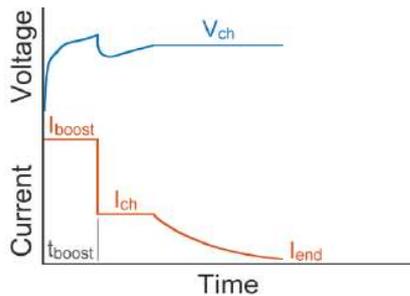


Abbildung 4: Boost-Charging Ladeverfahren (4)

A.4.4 Pulse-Charging

Bei der Pulsladung wird der Ladestrom pulsiert (Abbildung 5). Ladepulse mit hohem Ladestrom wechseln sich dabei mit Ladepausen oder gar kurzen Entladeintervallen ab. Man unterscheidet zwischen Pulsladung, bei welcher über die ganze Ladedauer gepulst wird und Puls-ladeverfahren, bei welchen die Pulsladung lediglich die CV-Phase einer CC-CV-Batterieladung ersetzt (CC + Pulse Charging) (4).

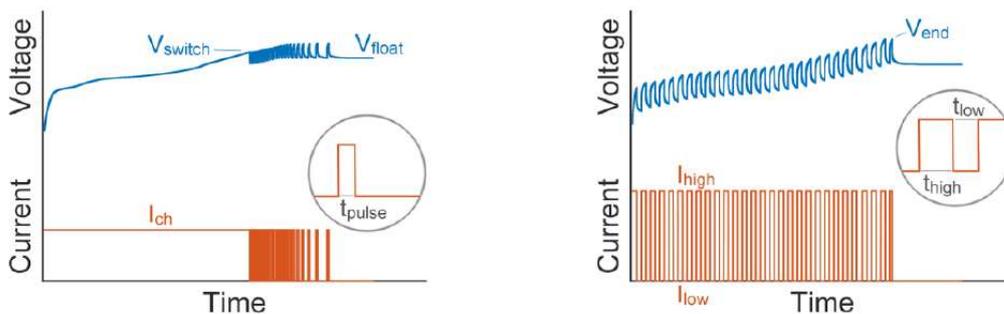


Abbildung 5: links: CC + Pulse Charging, rechts: Pulse Charging (4)

A.4.4.1 CC + Pulse Charging

Bei dieser Ladestrategie bleibt der Ladestrom während der CC-Phase und während der Pulse Phase gleich hoch (Abbildung 5, links). Einzig die Pausenintervalle werden in Abhängigkeit von der gemessenen Ladespannung verändert. Durch diese simple Steuerung lässt sich diese Ladestrategie zu tiefen Kosten implementieren. Dadurch, dass die Stärke der Ladepulsströme stets gleich ist, ist es möglich, dass die maximale Ladespannung kurzzeitig überschritten wird, was sich negativ auf die Batteriealterung auswirkt (4).



A.4.4.2 Pulse Charging

Beim klassischen Pulse Charging wird der Ladestrom über den gesamten Ladeprozess pulsiert. Die Ladung wird beendet, wenn die Ladespannung (V_{end} in Abbildung 5, rechts) erreicht wurde. Die Stärke der Ladepulse und die Zeit zwischen den Ladepulsen kann variiert werden (Abbildung 6) (6)

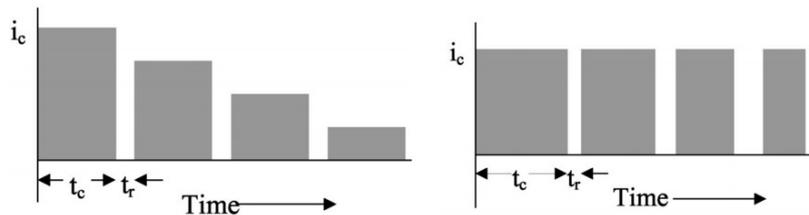


Abbildung 6: links: Veränderung des Stroms der Ladepulse, rechts: Veränderung der Zeit zwischen den Ladepulsen (6)

Durch die Pulsladung soll die Konzentrationspolarisation reduziert werden. Damit wird das Risiko minimiert, dass das Potential der negativen Elektrode lokal reduziert wird, oder gar negativ wird. Wie in A.3 beschrieben, führt reduziertes Anodenpotential zu Lithium-Plating.

A.5 Einfluss unterschiedlicher Ladestrategien auf die Batteriealterung

Die Alterungseinflüsse unterschiedlicher Ladestrategien wurden in diesem Kapitel miteinander verglichen. Der Fokus lag dabei auf der Pulsladung.

Beim Boost-Charging wird der tiefe SOC zu Beginn der Schnellladung ausgenutzt, um mit hohem Ladestrom zu laden. Da die Li-Ionen-Zellen bei tiefem SOC, wie er zu Beginn des Ladeprozesses vorherrscht, weniger anfällig gegenüber Lithium-Plating sind, ist die Auswirkung von Boost-Charging auf die Batteriealterung gering (4). In (7) und (8) konnte eine verkürzte Ladezeit beim Boost-Charging gegenüber CC-CV ausgemacht werden (30-40 % schneller), wobei die Zyklenfestigkeit der Zellen durch das Boost-Charging nicht negativ beeinflusst wurde.

In (9) wurde der Einfluss unterschiedlicher Ladestrategien auf den Kapazitätsverlust einer LFP-Zelle untersucht. Dabei wurden CC-CV, MSCC und Pulsladestrategien einander gegenübergestellt. Während MSCC und die Pulsladung ähnliches Alterungsverhalten hervorruften, alterten die Zellen bei der CC-CV Ladung schneller. Beobachtet wurde darüber hinaus, dass der Innenwiderstand bei der MSCC-Ladestrategie stärker anstieg als bei der Pulsladung. Die Studie kam zum Schluss, dass bei den verschiedenen Ladestrategien unterschiedliche Alterungsmechanismen wirken. Auch eine ältere Studie (10) aus dem Jahr 2001 hatte ähnliche Resultate präsentiert und beobachtete deutlich kürzere Ladezeiten bei der Pulsladung. Auf ein anderes Resultat kam eine weitere Studie (11). Diese hatte einen Kapazitätsverlust sowie eine erhöhte Beanspruchung durch die Pulsladung festgestellt. Diese Nachteile liessen sich durch eine höhere Pulsfrequenz nur geringfügig verbessern. Eine von den Studienautoren vorgestellte Ladestrategie, bei welcher der Pulsladung eine Phase mit Konstantladestrom folgt (PC-CC), erwies sich dagegen als vielversprechend. Die Studie kam weiter zum Schluss, dass die Ladezeit bei der Pulsladung vergleichbar ist mit einer Konstantstromladung mit dem Durchschnittsstrom der Pulsladung. Auf das gleiche Resultat bezüglich Durchschnittsstrom bei der Pulsladung kam auch eine weitere Studie (12).

Die Ergebnisse aus (12) zeigten keinen deutlichen Einfluss der Pulsladung auf die Zyklenfestigkeit (Abbildung 7). Klar zu sehen ist jedoch der Einfluss von hohen Ladeströmen (5 A). Die Studie kam weiter zum Schluss, dass Lithium-Ionen-Zellen hohen Ladepulsen standhalten können, sofern die Pulse kürzer als eine Sekunde sind und der Durchschnittsladestrom deutlich tiefer ist als der Strom der



Ladepulse. Die Untersuchungen aus (12) zeigten, anders als in (9) und (10), dass sich die Pulsladung gar negativ auf die Kapazitätsausnutzung und Ladeeffizienz auswirkte.

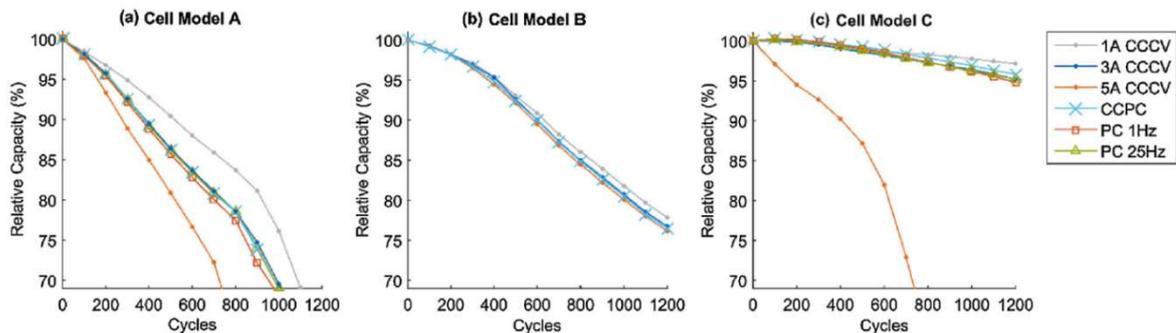


Abbildung 7: Zyklusfestigkeit von drei unterschiedlichen Batterietypen bei Anwendung der Ladestrategien CC-CV und Pulsladung PC (12), (Bei Typ B wurde keine Pulsladung getestet), Model A: Sanyo NMC-Zelle, Model B: Sony NMC-Zelle, Model C: A123 LFP-Zelle

Unter Berücksichtigung der betrachteten Studien kann nach heutigem Wissensstand nicht abschliessend eine Aussage darüber getroffen werden, ob und inwiefern die Pulsladung einen positiven Effekt auf das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien hat.

A.6 Pulsladung im Kontext der Schnellladestation der CKW

Wenn die an die Oberleitung angeschlossene Ladestation auf die Netzbelastungen reagieren und kurzzeitig die Ladung beim Anfahren der Trolleybusse unterbrechen würde, gliche das Ladeprofil einer Pulsladung. Geht man davon aus, dass die Trolleybusse in einem Fünf-Minuten-Intervall auf dem Streckenabschnitt verkehren und die Ladestation dadurch die Batterieladung an der Ladestation für 10 bis 15 Sekunden unterbrechen müsste, ergäbe dies für die Ladestation das Pulsadesignal nach Abbildung 8.



Abbildung 8: Darstellung der Pulsladung mit 5 Min. ON-Phase und 10-15 Sek. OFF-Phase

Das in Abbildung 8 dargestellte Pulssignal hat einen Tastgrad (Verhältnis der Dauer der ON-Phase zur Gesamtdauer) von grösser als 95 %. Die kurzen Pausen von 10 bis 15 Sekunden reduzieren die effektive Ladeleistung nur geringfügig (auf ca. 48 kW anstelle von 50 kW bei Konstantladung). Da sich die effektive Ladeleistung nur geringfügig reduziert, ist der Einfluss auf die Ladedauer ebenfalls sehr gering.

Durch die langen On-Phasen entspricht dieses Ladeverfahren nicht mehr einer Pulsladung wie sie in der Literatur verstanden wird. In den meisten betrachteten Studien wurde die Pulsladung mit einer



Pulsfrequenz von 100 kHz bis 0.1 Hz getestet (11). Aus diesem Grund können die Ergebnisse von Studien zum klassischen Pulsladeverfahren nicht auf das für die untersuchte Ladestation vorgesehene Pulsladeverfahren angewendet werden. Das für die aktuelle Ladestation betrachtete Ladeverfahren muss eher mit einer Konstantladung verglichen werden.

Ladeströme erwärmen die Zellen einer Batterie. Um die Zelltemperaturen im erlaubten Bereich zu halten, werden die Zellen durch das Fahrzeug aktiv gekühlt. Man könnte nun argumentieren, dass die Ladepause von 10 bis 15 Sekunden die Batterie etwas abkühlen lässt und dadurch die thermische Belastung etwas abnimmt. Thermische Modelle von Li-Ionen Zellen zeigen jedoch, dass sich die Zelltemperatur erst über eine Zeitdauer von mehreren Minuten verringert (13). Eine Ladepause von 10 bis 15 Sekunden hat somit nur einen geringen Effekt auf die Batteriekühlung.

Auch auf elektrochemischer Ebene kann davon ausgegangen werden, dass dieser kurze Unterbruch der Konstantstromladung kaum Einfluss auf die Batteriealterung hat. Für eine genaue Verifikation dieser Aussage müsste die Batteriealterung jedoch mittels Tests geprüft werden.

Da es sich bei der betrachteten Ladestrategie eher um eine Konstantstromphase mit kurzen Unterbrüchen handelt, können einige Nachteile der Pulsladung in Bezug auf die Alterung ausgeschlossen werden. So ist das Phänomen von Spannungsszillationen am Ende des Ladeprozesses, welche zu kurzzeitig überhöhten Zellspannungen führen können, durch die langen ON-Phasen und durch die permanente Spannungsmessung ausgeschlossen. Zudem führen die langen ON-Phasen auch nicht zu stark erhöhten Pulsströmen im Vergleich mit einer Konstantladung, wodurch ein signifikanter Einfluss auf die Alterung unwahrscheinlich ist.

Bei den durchgeführten Messungen an der Ladestation konnte das beschriebene Ladeverhalten mit den Ladepausen von 10 bis 15 Sekunden nicht beobachtet werden. Da es sich zeigte, dass die Ladestation die Oberleitungsspannung im Vergleich zu den Bussen nur schwach beeinflusst, war die Implementation eines solchen Betriebsmodus beim Einsatz von nur einer Ladestation nicht notwendig.

A.7 Weitere Aspekte der Schnellladung

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, hat das Ladeprotokoll einen entscheidenden Einfluss auf die Schnellladung. Das Ladeprotokoll ist aber nicht die einzige Stellschraube, um eine optimale Schnellladung zu ermöglichen. Auch die Zellchemie, das Zelldesign und das Systemdesign sind relevant.

A.7.1 Zellchemie

Auf Zellebene lässt sich die Schnellladeverträglichkeit entscheidend beeinflussen. So kann die Wahl der verwendeten Materialien einen grossen Einfluss auf die Schnellladefähigkeit haben. Das Anodenpotential beispielsweise ist heute sehr nahe an dem Potential, welches Lithium-Plating ermöglicht. Mit der Modifizierung des Anodenmaterials lässt sich dieses Problem entschärfen (5). Im Bereich der Zellchemie wird heute viel Forschung betrieben, um eine optimale Leistungsfähigkeit zu erreichen. Eine weitere Verbesserung, auch bezüglich Schnellladeverhalten der Zellen, ist in Zukunft zu erwarten.

A.7.2 Zelldesign

Neben der Wahl der Zellmaterialien und der Mikrostruktur der Zellen hat auch das Zelldesign einen Einfluss auf die Schnellladefähigkeit. Die Zellgeometrie kann das Schnellladeverhalten erheblich beeinflussen. Hierbei ist in erster Linie relevant, wie gut sich die Wärme aus den Zellen ableiten lässt.



So haben grosse Zellen, beispielweise prismatische Zellen, ungünstigere Eigenschaften bezüglich Wärmeregulierung als kleinere Rundzellen (Abbildung 9).

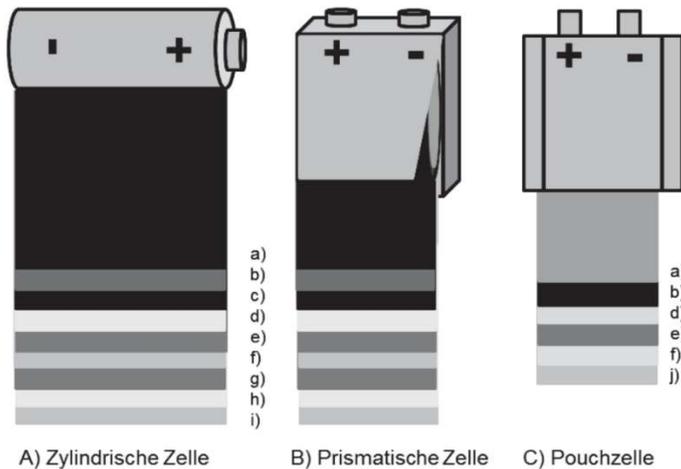


Abbildung 9: Unterschiedliche Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen¹

A.7.3 Systemdesign

Auch auf Systemebene kann die Wärmeregulierung entscheidend beeinflusst werden. Hierbei spielt die Wahl des Kühlsystems eine wichtige Rolle (Wasserkühlung, Luftkühlung). Die Schnellladung stellt an das Batteriemanagementsystem (BMS) hohe Ansprüche. So muss die Überwachung der Zellen sensitiv und reaktionsschnell sein, um allfällige Abweichungen vom Normalzustand bei der Schnellladung erkennen zu können (5).

Bei Schnellladevorgängen werden die Zellen des Batteriesystems, bedingt durch die hohen Ladeströme, stark erwärmt. Mittels Thermomanagement wird versucht die Wärme im Batteriemodul zu regulieren. Bei der Konstruktion der Batteriemodule wird darauf geachtet, dass lokale Hotspots möglichst vermieden werden können. Lokale Hotspots treten jedoch nicht nur auf Batteriemodulebene auf, sondern auch auf Zellebene (Abbildung 10). Die Temperaturunterschiede in der Zelle führen zu unterschiedlichen Stromdichten, was zu Lithium-Plating führen kann (4).

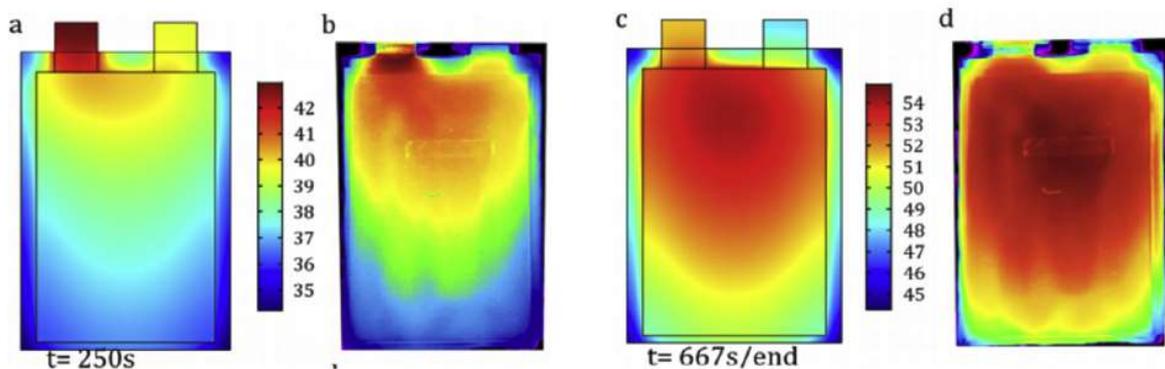


Abbildung 10: Entwicklung der Oberflächentemperatur bei konstanter Entladung mit 5C (14)

¹ a) und c): Anodenbeschichtung, b): Kupferableiter, d) und h): Separator, e) und g): Kathodenbeschichtung, f): Aluminiumableiter, i): Gehäusematerial, j): mit Kunststoff beschichtete Aluminiumfolie. [15]



A.8 Fazit der Literaturrecherche

Die Schnellladung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen wird die Zukunft der Elektromobilität mitprägen. Eine Schnellladung geht jedoch mit einigen Kompromissen einher. So hat die Schnellladung immer einen negativen Einfluss auf die Batterielebensdauer. Die Herausforderung wird künftig sein, den optimalen Kompromiss zwischen Ladezeit, Kapazitätsausnutzung und Alterungseinfluss bei der Batterieladung zu finden.

Die betrachteten Schnellladeprotokolle folgen im Grundsatz einer ähnlichen Logik. Zu Beginn, bei tiefem SOC, wird mit einem hohen Ladestrom geladen. Sobald die Ladespannung einen gewissen Schwellwert erreicht, muss der Ladestrom reduziert werden, damit keine zu hohe Ladespannung anliegt. Die betrachteten Studien kamen bezüglich des Einflusses der Ladeprotokolle auf die Alterung auf unterschiedliche Resultate. Einzig im Punkt, dass die Schnellladung einen negativen Einfluss auf die Batteriealterung hat, sind sich alle Studien einig.

In der Studie sollte konkret der Einfluss auf die Alterung eines Ladeverfahrens mit 5-Minuten-Ladungen und 10 bis 15 Sekunden dauernden Unterbrechungen betrachtet werden. Es zeigte sich, dass dieses Ladeverfahren aufgrund der langen On-Phasen (5 Minuten) nicht mehr als Pulsladung gemäss Literatur verstanden wird. Ein negativer Einfluss auf die Alterung im Vergleich mit einer Konstantladung ist unwahrscheinlich.



B Messkampagne

B.1 Beschreibung der Ladestation

Das an einer Tankstelle in Kriens installierte Ladesystem für Elektrofahrzeuge ermöglicht das gleichzeitige Laden von zwei Elektrofahrzeugen. Die Ladestation hat eine Leistung von 100 kW und ist mit zwei Ladesteckdosen (1x CHAdeMO und 1x CCS) ausgestattet. Eine Besonderheit, der von EVTEC hergestellten Ladeinfrastruktur ist, dass sie an das städtische Oberleitungsnetz angeschlossen ist.

B.2 Ziele der Messkampagne

Anhand der aus der Messkampagne gewonnenen Informationen sollen folgende Fragen beantwortet werden können:

- Welchen Einfluss hat die Schnellladestation auf das städtische Oberleitungsnetz (Leistung, Spannung usw.)? Die Messungen sollen den Leistungsbezug aus dem Oberleitungsnetz quantifizieren. Zudem soll untersucht werden, ob ein relevanter Einfluss des Leistungsbezugs auf die Spannung am Anschlusspunkt der Ladestation detektiert werden kann.
- Gibt es Optimierungspotenzial für den Lastregelalgorithmus?
- Wie ist der Wirkungsgrad der Ladestation je nach Arbeitspunkt?
- Wo liegen die Grenzen bei einem weiteren Ausbau dieser Art von Ladestationen im Oberleitungsnetz?
- Wie hoch sind die Energieverluste, die durch die Übertragung von Energie im Zusammenhang mit dem Aufladen von Fahrzeugen entstehen?

B.3 Messschema

Um die Ziele der Messkampagne zu erreichen, müssen die Daten gemäss Abbildung 11 und Tabelle 1 erhoben werden:

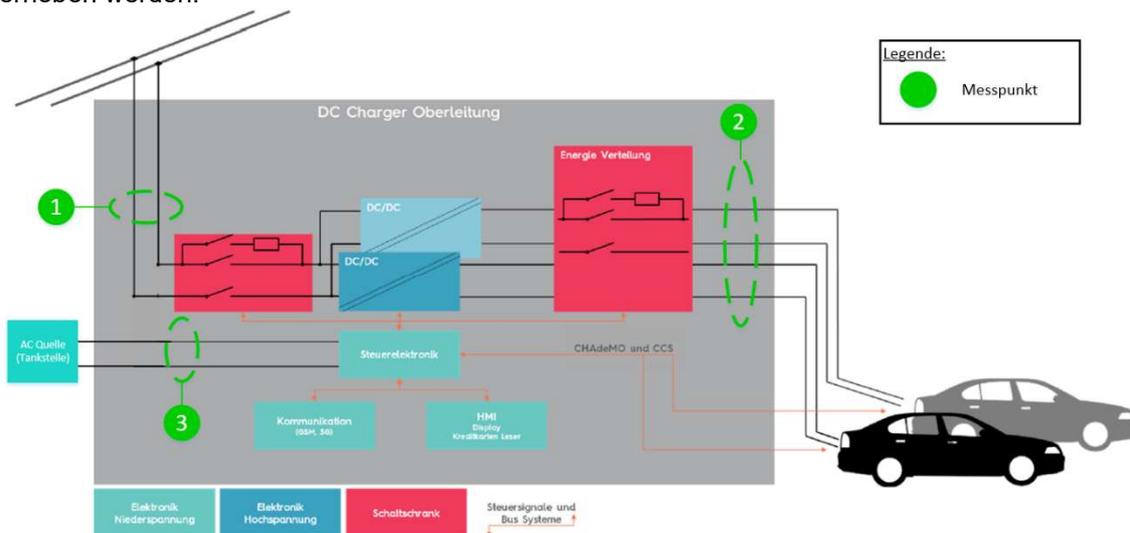


Abbildung 11: Messkonzept (Quelle: (15))

| Messpunkt | Messgerät | Beschreibung der Messung |
|-----------|-----------|--------------------------|
|-----------|-----------|--------------------------|



| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| 1 | PQ-Box 150 – PAC22 AC/DC-Stromzange | Spannung und Strom ab Oberleitung |
| 2 | PQ-Box 150 – PAC22 AC/DC-Stromzange | Spannung und Strom zum Aufladen der Elektrofahrzeuge. Es wird nur der CCS-Anschluss gemessen, da dieser öfter benutzt wird |
| 3 | PQ-Box 150 – AC-Ministromzange | Zusatzverbrauch der Ladestation (Spannung und Strom) |

Tabelle 1: Beschreibung der Messpunkte

Anmerkung:

- Das Messintervall der Geräte ist auf 1 Sekunde festgelegt.



C Analyse

C.1 Methodik

Die Spannungen und Ströme wurden mit einem Zeitintervall von einer Sekunde gemessen. In den Analysen wurden sowohl die Rohdaten (1-Sekunden-Messwerte) als auch die gleitenden Mittelwerte der Messwerte über eine Minute (1-Minuten-Werte) oder über zehn Sekunden (10-Sekunden-Werte) betrachtet.

Für diese Analyse wurden vier Betriebszustände identifiziert:

- **B1:** Standby-Betrieb ($I_{in} < 5A_{DC}$) mit Trolleybusverkehr (von 4:30 bis 1:15 Uhr)
- **B2:** Ladebetrieb ($I_{in} \geq 5A_{DC}$) mit Trolleybusverkehr (von 4:30 bis 1:15 Uhr)
- **B3:** Standby-Betrieb ($I_{in} < 5A_{DC}$) ohne Trolleybusverkehr (von 1:15 bis 4:30 Uhr)
- **B4:** Ladevorgang ($I_{in} \geq 5A_{DC}$) ohne Trolleybusverkehr (von 1:15 bis 4:30 Uhr)

Die Daten der Messkampagne sind nach den Betriebszuständen sortiert worden.

C.1.1 Boxplots

In einigen Fällen werden die Ergebnisse der statistischen Analyse mittels Boxplots dargestellt. Zur korrekten Interpretation dieses Diagramms wird in Abbildung 12 die für diese Studie angenommene Definition beschrieben:

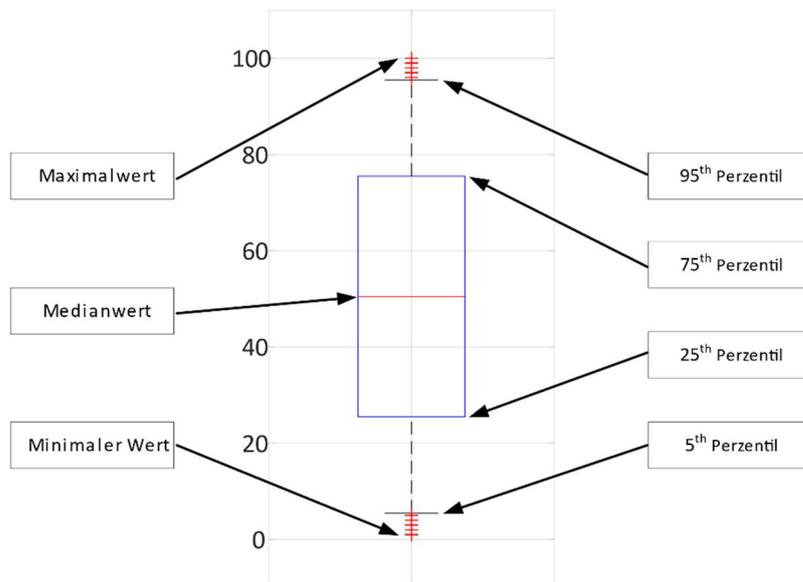


Abbildung 12: Boxplot-Definition

C.1.2 Analysezeitraum

Die für diese Analyse verwendeten Daten stammen aus einer Messkampagne, welche im Zeitraum vom 22.07.2020 bis zum 28.10.2020 durchgeführt wurde.



C.2 Eingangsspannungsanalyse

Die Eingangsspannung der Ladestation (Messpunkt 1 in Abbildung 11) wurde analysiert, um den Einfluss der Ladestation auf das Oberleitungsnetz zu beobachten. Die gemessenen Spannungswerte (1-Sekunden-Messwerte, Abbildung 13) sowie die mit dem gleitenden Durchschnitt über eine Minute berechneten Spannungswerte (1-Minuten-Werte, Abbildung 14) wurden entsprechend den Betriebszuständen B1 bis B4 klassifiziert. Die numerischen Werte sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 im Anhang A aufgeführt).

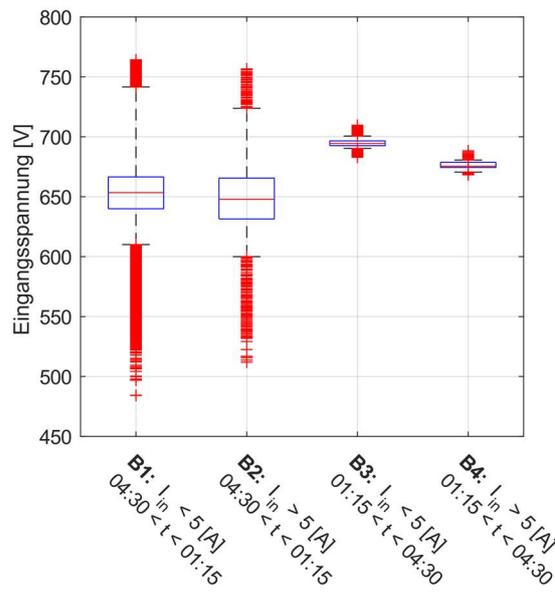


Abbildung 13: Boxplots der Eingangsspannung der Ladestation (1-Sekunden-Messwerte)

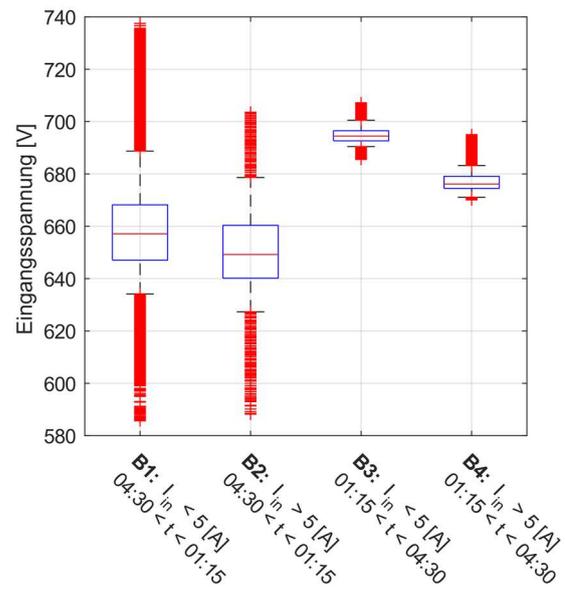


Abbildung 14: Boxplots der Eingangsspannung der Ladestation (1-Minuten-Werte)

Für die weitere Analyse werden in diesem Kapitel nur die im 1-Sekunden-Intervall gemessenen Spannungswerte betrachtet. Die 1-Minuten-Werte dienen hier dazu aufzuzeigen, dass die niedrigsten gemessenen Spannungen eher kurzfristig im Sekundenbereich auftreten und nicht über einen Zeitraum von einer Minute und länger.

Es lässt sich feststellen, dass die Eingangsspannung der Ladestation durch den Trolleybusverkehr stark beeinflusst wird. Im Betriebszustand B1 entsprach die Differenz zwischen den Extremwerten (Maximalwert - Minimalwert) 280.1 V, während diese Differenz im Betriebszustand B3 nur 26.7 V betrug.

Der Vergleich der Mediane der Betriebszustände B1 und B2 zeigte, dass die Leistungsaufnahme der Ladestation eine Reduktion der Oberleitungsspannung am Anschlusspunkt um ca. 5.5 V bewirkte. Die gemessenen Minimalwerte betragen 484.1 V und 511.9 V bei den Betriebszuständen B1 bzw. B2. Im Allgemeinen befand sich der für den Betriebszustand B2 gemessene Spannungsbereich innerhalb des Spannungsbereichs von B1. Im Vergleich mit der Situation mit Trolleybussen und mit Standby-Betrieb der Ladestation (B1) führte also der Betrieb der Ladestation (B2) zu keinen anderen Spannungs-Extremwerten.

Für die Anwendung, welche in dieser Studie untersucht wurde, definiert die Norm EN 50388 die Spannungen, die einzuhalten sind (15). Nach dieser Spezifikation und unter Berücksichtigung einer Nennspannung von 700 V und einem Faktor α von 0.8 sollte die Leistung des Systems begrenzt werden,



wenn die Eingangsspannung unter 560 V liegt. Die Analyse zeigte, dass in der Situation B1 und B2 Werte unterhalb dieses Grenzwertes gemessen wurden.

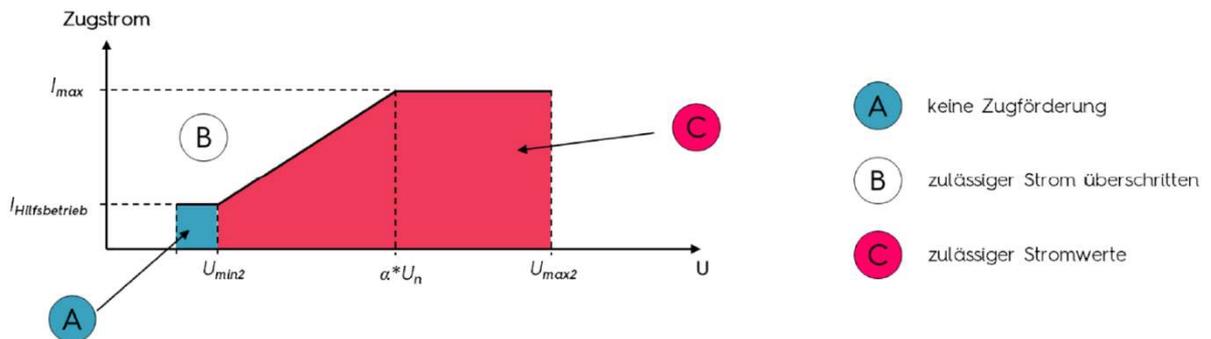


Abbildung 15: Leistungsbegrenzung der an das Oberleitungsnetz angeschlossenen Systeme (Quelle: (15))

Während des Betriebs der Ladestation in Situation B2 war die beobachtete Spannung also bei weniger als 5 % der 1-Sekunden Messwerte niedriger als 560 V. Dabei konnte beobachtet werden, dass die Ladestation die Leistung zu einem gewissen Grad reduziert, um die Spannung zu stützen.

Wurde an der Ladestation geladen, während keine Trolleybusse verkehrten (B4), wurde der Median der Spannung durch die Ladestation gegenüber dem Modus B3 um 19.1 V reduziert. Der durch die Ladeinfrastruktur bedingte Spannungsabfall bei Nichtbetrieb der Trolleybuslinie war zu jedem Zeitpunkt unkritisch. Denn trotz dieser Spannungsreduktion war die Spannung im Betriebszustand B4 höher als in den Betriebszuständen B1 und B2.

Der Einfluss des Trolleybusverkehrs auf die Eingangsspannung der Ladestation ist in Abbildung 16 dargestellt. Wie die Spannungskurven zeigen, bewirkt die mit dem Busbetrieb verbundene Leistungsaufnahme signifikante Spannungsschwankungen. Diese Spannungsschwankungen beeinflussen auch den Eingangsstromverlauf der Ladestation (hier dargestellt: DC-Stromanteil), was an den Schwankungen der Stromwerte während des Trolleybusbetriebs erkennbar ist.

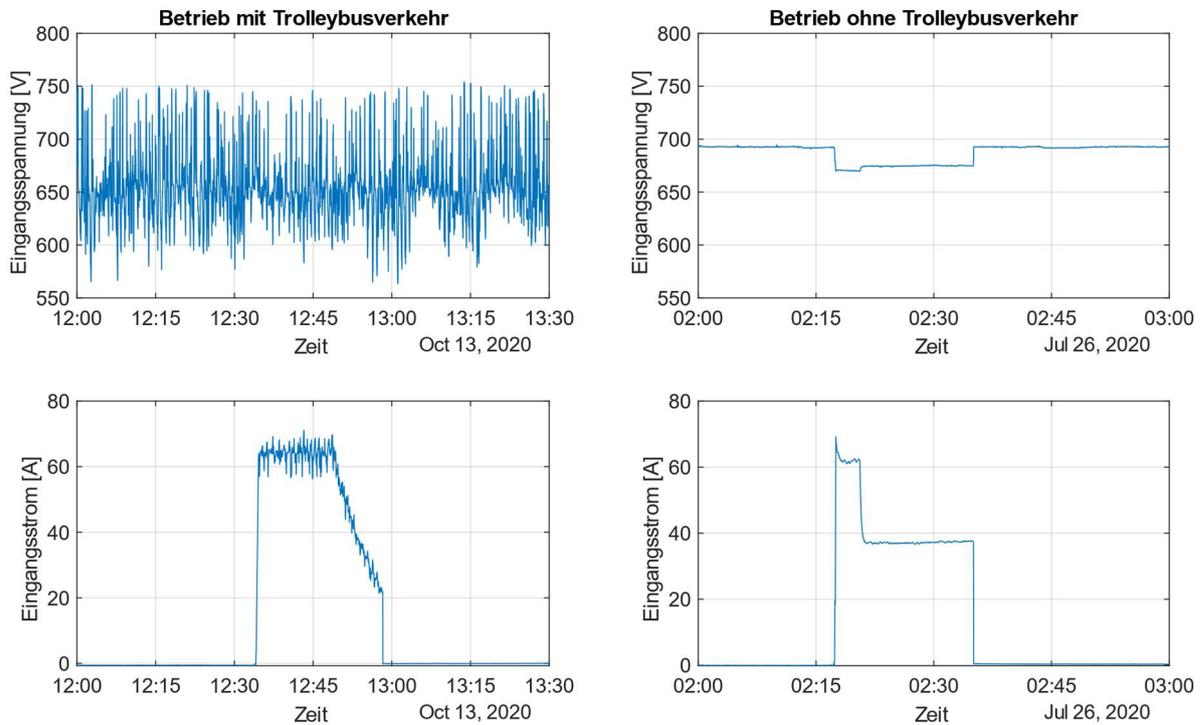


Abbildung 16: Spannung und DC-Strom am Eingang der Ladestation mit und ohne Trolleybusverkehr (1-Sekunden-Messwerte)

Die Analyse hat aufgezeigt, dass die Ladestation die Spannung des Oberleitungsnetzes beeinflusst. Die durch den Trolleybusverkehr verursachten Spannungsschwankungen sind jedoch wesentlich grösser als jene, die durch die Ladestation hervorgerufen werden (Abbildung 17). Im Oberleitungsnetz treten durch das Bremsen und Beschleunigen der Trolleybusse Unterschiede von über 100 V auf. Der Einfluss der Ladestation auf das Spannungsprofil ist dagegen während des Busbetriebs nicht klar erkennbar.

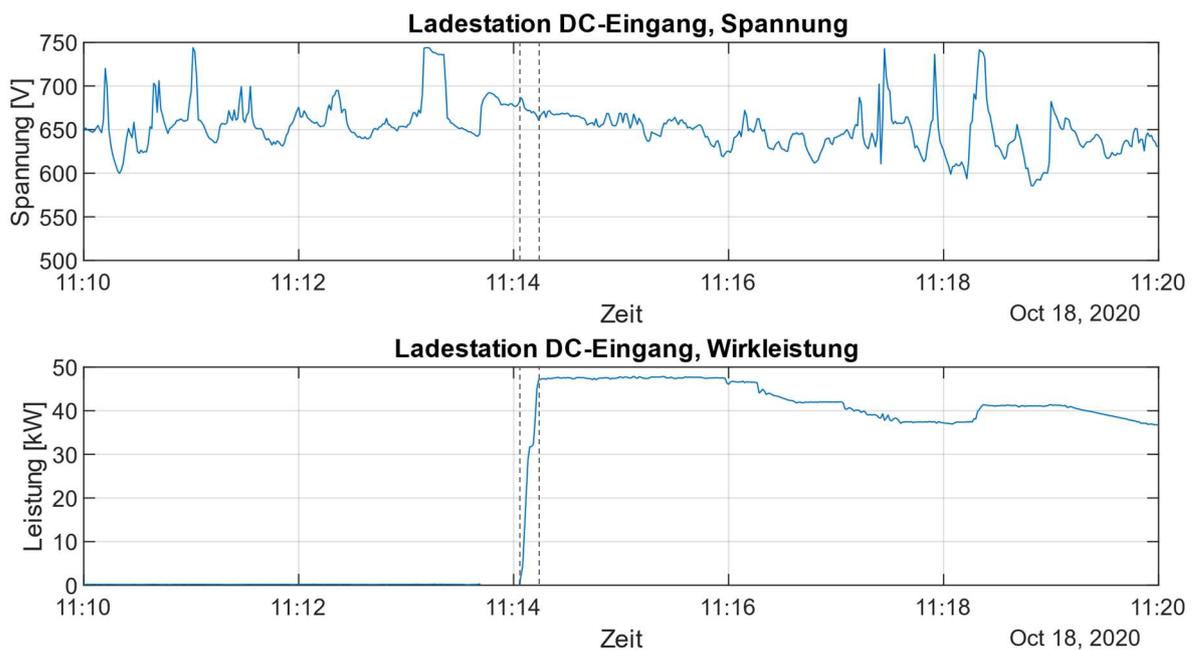


Abbildung 17: Oberleitungsspannung und Wirkleistung am Eingang der Ladestation (1-Sekunden-Messwerte)



C.3. Netzanalyse

Anhand der Messdaten war es möglich, den Widerstand des Stromnetzes, an das die Ladestation angeschlossen ist, abzuschätzen. Dazu wurde die am Messpunkt 1 gemessene Spannung in Funktion des Eingangsstroms aufgetragen (Abbildung 18).

Um den Widerstand des Stromnetzes auf der Grundlage der an der Ladestation gemessenen Daten abschätzen zu können, ist es wichtig, dass während der betrachteten Zeitpunkte keine anderen Verbraucher Energie aus den hier untersuchten Leitungsabschnitten bezogen. Daher wurden hier nur Daten aus den Betriebszuständen B3 und B4 analysiert (kein Trolleybusverkehr zwischen 1:15 und 4:30 Uhr).

In dieser Konfiguration ist die theoretische Beziehung für die Schätzung der Spannung in Abhängigkeit vom Eingangsstrom der Ladestation gleich:

$$U_{In} = U_{Nom} - R_{Tot} \cdot I_{In}$$

Dabei ist U_{Nom} die Nennspannung der Fahrleitung ohne Verbraucher und R_{Tot} der Widerstand des Stromnetzes, an das die Ladestation angeschlossen ist. U_{In} und I_{In} sind die am Messpunkt 1 auftretenden und in Abbildung 18 dargestellten Spannungs- und Stromwerte. Dabei sind in Abbildung 18 die 1-Minuten-Werte (gleitender Durchschnitt der 1-Sekunden-Messwerte) dargestellt. Hierbei wurden die 1-Minuten-Mittelwerte der vom Messgerät ermittelten RMS-Werte betrachtet und nicht nur der DC-Anteil, weil eine Betrachtung mit dem DC-Anteil die Netzbelastung nicht korrekt wiedergeben würde. Denn Spannung und Strom auf der Eingangsseite des Ladegeräts wiesen bei den Messungen auch relevante AC-Anteile auf.

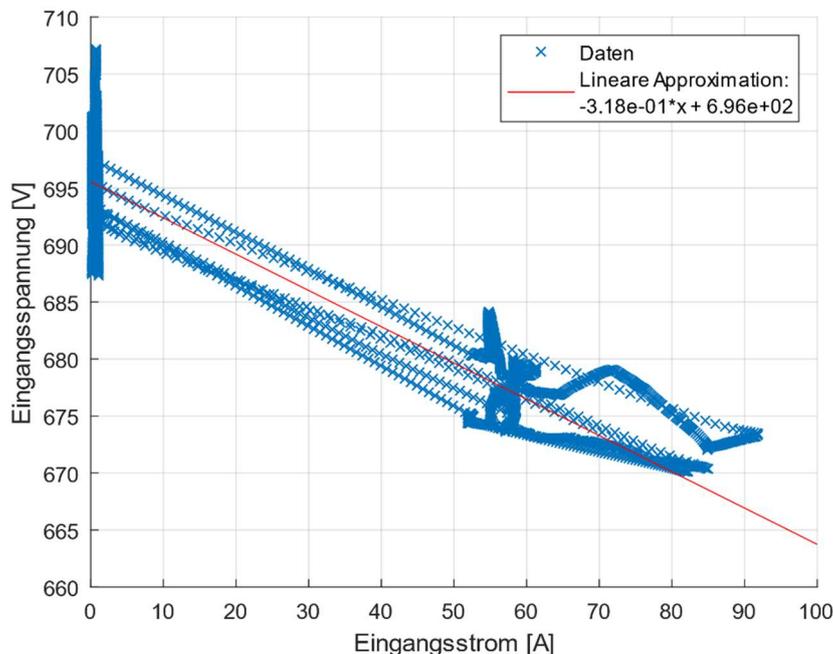


Abbildung 18: Eingangsspannung als Funktion des Eingangsstroms der Ladestation (1-Minuten-Werte)



Eine lineare Annäherung an die gesammelten Datenpunkte erlaubte es, die beiden Parameter des Modells zu definieren:

$$U_{In} = U_{Nom} - R_{Tot} \cdot I_{In} \rightarrow \begin{cases} R_{Tot} = 0.318 \Omega \\ U_{Nom} = 696 V \end{cases}$$

Wie bereits erwähnt, stellt R_{Tot} den Widerstand des gesamten Stromnetzes vor der Ladestation dar. Der Widerstand der Oberleitung $R_{Oberleitung}$ (von der Schaltstation bis zur Ladestation) stellt nur einen Teil des gesamten Ersatzwiderstandes R_{Tot} dar. Nach den vom Netzbetreiber (vbl) erhaltenen Informationen konnte der Wert von $R_{Oberleitung}$ auf $99 m\Omega$ geschätzt werden (siehe Anhang C), was etwa 31.1 % des gesamten äquivalenten Widerstands R_{Tot} entspricht.

Mit dem bekannten Widerstand des Stromnetzes war es möglich, den maximalen Strom abzuschätzen, der am Anschlusspunkt der Ladestation (Messpunkt 1) gemäss der Norm EN 50388 (15) bezogen werden kann, wenn keine anderen Verbraucher (Busse) Leistung aus dem Netz beziehen. Unter Berücksichtigung eines maximal tolerierten Spannungsabfalls von ca. 140 V ($(1 - \alpha) \times U_{Nom}$) ist der maximale Strom gleich:

$$I_{max,Ladestation} = \frac{(1 - \alpha) \cdot U_{Nom}}{R_{tot}} = \frac{(1 - 0.8) \cdot 696}{0.318} = 438 A$$

Wie die Messungen (1-Sekunden-Messwerte) gezeigt haben, weist die Spannung jedoch mit Trolleybusverkehr teilweise Spannungen auf, die kleiner als 560 V sind und die Leistungsbegrenzung der Ladestation muss aktiviert werden.

C.3.1 Anmerkung zur Netzwerkmodellierung

Obwohl die Topologie des Oberleitungsnetzes relativ einfach zu modellieren ist (Abbildung 23), wäre die Modellierung und Simulation des Gesamtsystems mit allen Lasten und Einspeisungen komplex. Trolleybusse verhalten sich während ihrer Fahrt entweder wie eine Last oder eine Einspeisung, je nachdem ob sie bremsen oder beschleunigen. Zudem verändern sich ihre Anschlusspunkte an das Netz durch das Fahren ständig. Dies führt zu einer dynamischen Veränderung der gesamten Netztopologie.

C.4 Effizienz der Ladestation

Bei der Umwandlung der Oberleitungsspannung auf die Ladespannung des Elektroautos entstehen Verluste, welche die Effizienz der Ladestation beeinflussen. Für diese Analyse der Effizienz der Ladestation wurden nur die Betriebszustände analysiert, bei welcher die Ladestation genutzt wurde (Betriebszustände B2 und B4). Auch hier wurde zwischen der Situation mit und ohne Trolleybusverkehr unterschieden. Die Effizienz berechnet sich gemäss nachfolgender Formel:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Dabei ist P_{in} die am Messpunkt 1 gemessene Eingangs-Wirkleistung und P_{out} die am Messpunkt 2 gemessene Ausgangs-Wirkleistung. Der Wirkungsgrad wurde für jene Ladeleistungen, die während der Messkampagne detektiert wurden, berechnet (10-Sekunden-Werte). In Abbildung 19 und Abbildung 20 sind die 10%-Werte, die Mediane und die 90%-Werte des Wirkungsgrads bei der jeweiligen Ladeleistung dargestellt. Sowohl mit als auch ohne Trolleybusverkehr betrug der Wirkungsgrad je nach Arbeitspunkt 93 bis 98 Prozent.



B2: Ladebetrieb zwischen 04:30 und 01:15 Uhr

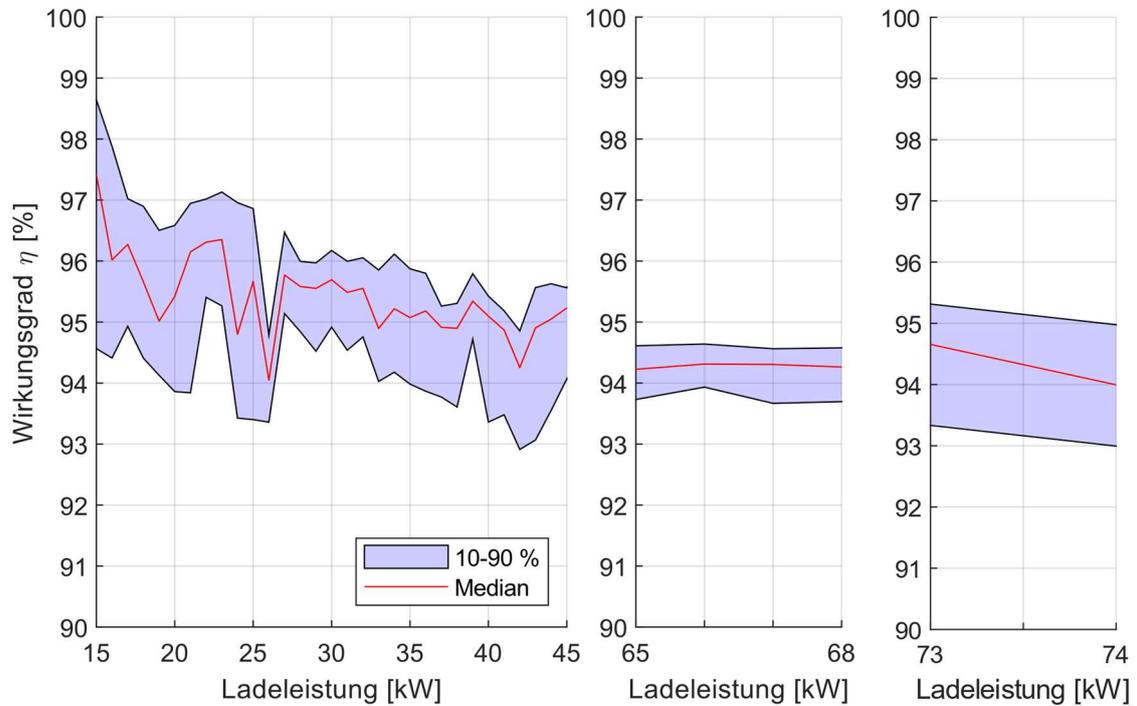


Abbildung 19: Wirkungsgrad der Ladestation bei den gemessenen Ladeleistungen, mit Trolleybusbetrieb (10-Sekunden-Werte)

B4: Ladebetrieb zwischen 01:15 und 04:30 Uhr

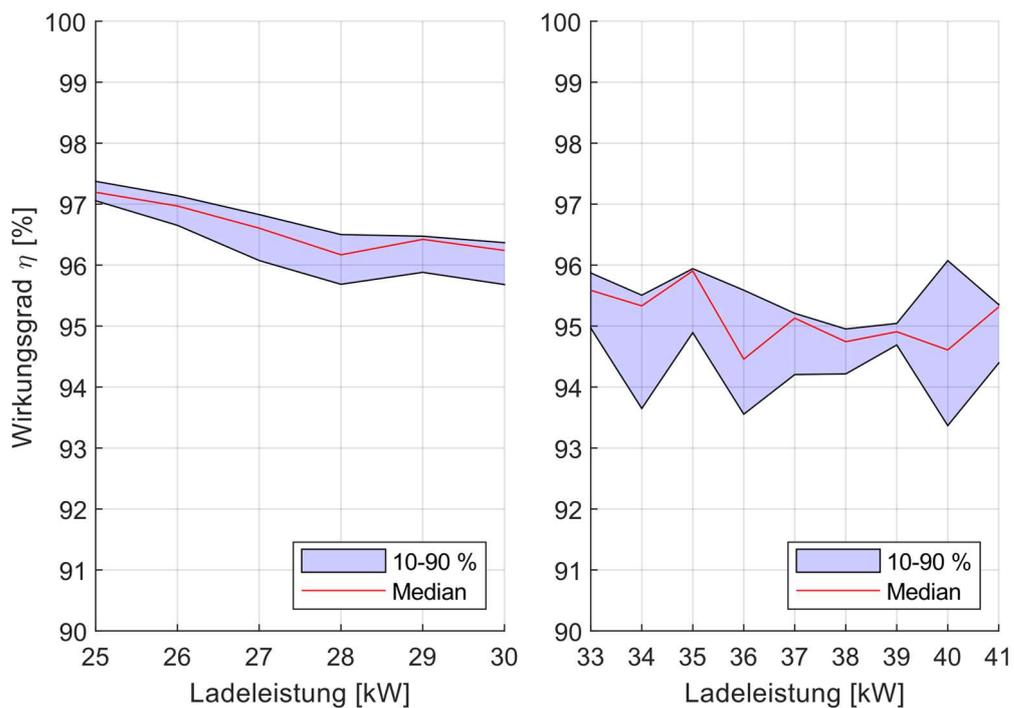


Abbildung 20: Wirkungsgrad der Ladestation bei den gemessenen Ladeleistungen, ohne Trolleybusbetrieb (10-Sekunden-Werte)



C.5 Netzverluste

Die Energie, welche für das Aufladen der Elektrofahrzeuge erforderlich ist, wird über das Stromnetz, zu dem auch die Oberleitungen der Trolleybusse gehören, übertragen. Bedingt durch den elektrischen Widerstand der Leiter entstehen Netzverluste, welche nachfolgend analysiert wurden.

Wie aus der Analyse in Kapitel C.3. Netzanalyse hervorging, kann das gesamte Stromnetz grob mit einem Widerstand R_{Tot} von $0,318 \Omega$ modelliert werden. Ist der Strom, der durch die Oberleitungen fliesst, bekannt, können die Verluste wie folgt abgeschätzt werden:

$$P_{loss} = R_{Tot} * I_{Line}^2$$

Wobei I_{Line} der Summe der Ströme entspricht, die von den Trolleybussen und der Ladestation bezogen werden. In dieser Studie konnte der Strom, der durch den Busverkehr verursacht wurde, nicht abgeschätzt werden (keine Strommessungen an den Oberleitungen). Es war jedoch möglich, die von der Ladestation verursachte Verlustleistung im Netz abzuschätzen. Abbildung 21 stellt die zusätzlichen Netzverluste, die von der Ladestation verursacht werden, als 1-Minuten-Werte in kW dar. Für diese Betrachtung wurden wie in Kapitel C.3. Netzanalyse die 1-Minuten-Mittelwerte der vom Messgerät ermittelten RMS-Werte betrachtet. Es ist zu beachten, dass die damit berechnete Eingangsleistung in kVA höhere Werte aufweist als die reine DC-Leistung in kW, welche von der Ladestation bezogen wird.

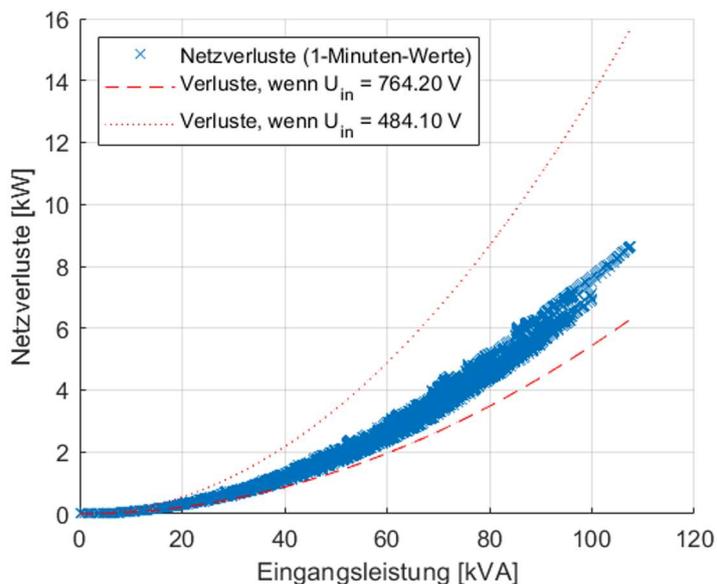


Abbildung 21: Netzverluste, die durch den Betrieb der Ladestation verursacht werden (1-Minuten-Werte)

Die auf der Grundlage der Messungen geschätzten Netzverluste (blau) weisen einen parabolischen Kurvenverlauf auf und betragen bis zu 9 kW. Zudem wurde die Verlustleistung für eine konstante Spannung von 764.2 V und 484.1 V eingezeichnet (rote Kurven). Diese beiden Spannungswerte entsprechen den Extremwerten der gemessenen Eingangsspannung (1-Sekunden-Messwerte) der Ladestation. Es ist anzumerken, dass diese Schätzung der Netzverluste nur eine ungefähre Vorstellung von der Grössenordnung der zusätzlichen Verluste, die durch das Laden von Elektrofahrzeugen entstehen, gibt.



C.6 Zusammenspiel Oberleitung und Batterie-Managementsystem

Im Vorfeld der Projektvorbereitung konnte nicht ausgeschlossen werden, dass es zu Problemen im Zusammenspiel zwischen der Oberleitung und des Batterie-Managementsystem der Elektroautos kommen würde.

Nach den ersten erfolgreichen Ladungen konnte aber bereits festgehalten werden, dass das Batterie-Managementsystem der Elektroautos von der Spannungsschwankung der Oberleitung nicht negativ beeinflusst wird. Daher musste das Zusammenspiel zwischen der Oberleitung und des Batterie-Managementsystem nicht weiter optimiert werden.

Die Messungen haben gezeigt, dass das Batterie-Managementsystem die Leistung bei den niedrigsten gemessenen Spannungswerten wie erwartet reduziert hat (Abbildung 22), was einem weiteren Absinken der Oberleitungsspannung entgegenwirkt.

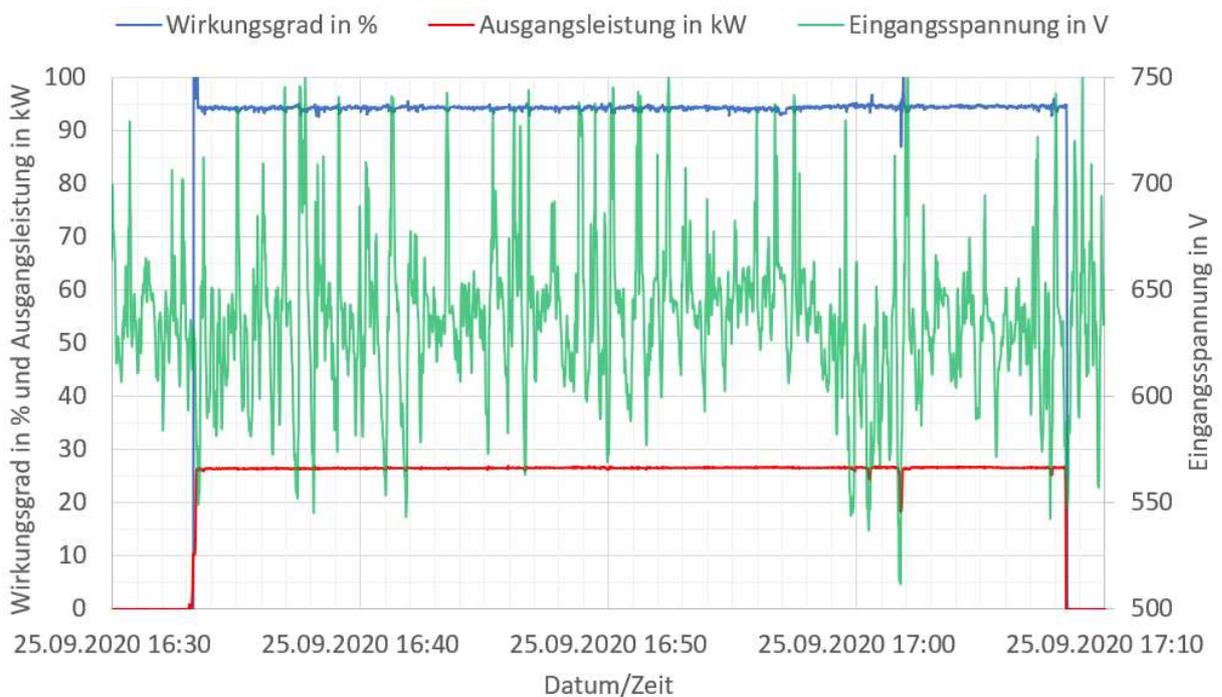
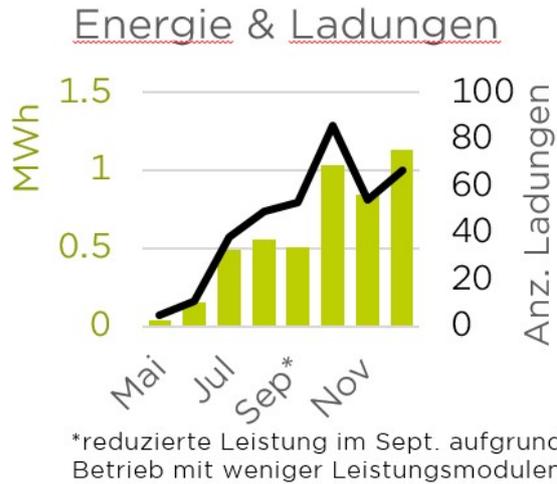


Abbildung 22: Leistungsreduktion des Ladegeräts bei den niedrigsten gemessenen Spannungswerten (1-Sekunden-Messwerte)



C.7 Anzahl Ladungen und Feedback Kunden

Die Entwicklung der Ladungen und Energiemengen sind in der folgenden Graphik dargestellt:



Die Anzahl Ladungen haben sich jeden Monat erhöht. Die geladene Energie Menge hatte sich proportional zu den Ladungen entwickelt. Nur im September wurde eine geringere Menge Energie von den Elektroautos bezogen, da im September nicht alle Leistungsmodulen in Betrieb waren.

Die durchschnittliche geladene Energiemenge je Ladung lag bei 13.14 kWh.

Feedback der Kunden:

An der Ladestation wurde ein QR Code für eine Kundenumfrage angebracht.



Leider wurden von den Kunden nur wenige Umfragen ausgefüllt. (Stand 02.02.2021). Daher konnten wir das Feedback der Kunden nicht auswerten.



4 Schlussfolgerungen und Fazit

Auf Basis der Messkampagne und der Analyse der gesammelten Daten konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

Die am Anschlusspunkt der Ladestation gemessene Spannung zeigte, dass die Ladestation bei Stromaufnahme einen Spannungsabfall bewirkte. Wenn jedoch andere Verbraucher (z. B. Trolleybusse) gleichzeitig Leistung beziehen und/oder ins Netz einspeisen, ist dieser durch die Ladeinfrastruktur erzeugte Spannungsabfall kaum sichtbar. Der Einfluss dieser Ladestation auf die Oberleitungsspannung kann daher im Vergleich zum Einfluss der Trolleybusse als eher niedrig angesehen werden.

Wie aus der Leistungsanalyse in Abschnitt C.4 Effizienz der Ladestation hervorging, wurde in dieser Messkampagne sowohl mit als auch ohne Trolleybusverkehr ein hoher Wirkungsgrad der Ladestation von 93 bis 98 Prozent gemessen.

Die Analyse der gemessenen Eingangsspannung zeigte, dass im Sekundenbereich eine Spannung von 560 V (gemäss Norm EN 50388 berechnet) teilweise kurz unterschritten wurde. Dabei konnte erkannt werden, dass die Ladestation bei den niedrigsten detektierten Spannungen mit einer Leistungsreduktion reagierte, um die Spannung zu stützen. Da jedoch der Hauptverursacher der niedrigen Spannungen die Busse sind, ist der Einfluss der aktuellen Ladestation begrenzt. Beim Einsatz von mehreren Ladestationen im selben Oberleitungsnetz könnte der Effekt einer Leistungsreduktion auf die Spannung jedoch wesentlich sein, um zu tiefe Spannungen zu verhindern.

Die gesammelten Daten ermöglichten es auch, den Netzwidestand am Anschlusspunkt der Ladestation abzuschätzen. Dieser Parameter ermöglichte es, den Spannungsabfall in Abhängigkeit des von der Ladestation bezogenen Stroms auszuwerten. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Schätzung nur gültig ist, wenn keine anderen Verbraucher gleichzeitig das Oberleitungsnetz belasten.

Der berechnete Netzwidestand ermöglichte auch eine Abschätzung der zusätzlich durch die Ladeinfrastruktur verursachten Netzverluste. Die im Rahmen dieses Berichtes vorgestellten Ergebnisse zu den Netzverlusten sind aber lediglich eine Schätzung der durch die Ladestation verursachten Verluste. Weil die durch die Trolleybusse bezogenen und eingespeisten Ströme nicht bekannt waren, konnten die dadurch verursachten Netzverluste nicht berechnet werden.

Die Literaturrecherche zeigte auf, welche unterschiedlichen Ladestrategien es derzeit gibt und welche Auswirkungen diese Ladestrategien auf die Alterung der Zellen haben. Die konsultierten Literaturquellen kamen jedoch bezüglich Ladestrategie nicht auf übereinstimmende Ergebnisse.



5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Mit weiteren Oberleitungsbetreiber in der Schweiz und in Europa werden Projekte geprüft.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Für die Realisierung in der Schweiz und Europa wird die Zusammenarbeit mit verschiedenen Tankstellenbetreiber geprüft.

7 Kommunikation

Das Demonstrationprojekt in Kriens wurde in den folgenden Medien kommuniziert:

Luzerner Zeitung

<https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/luzern/e-autos-koennen-in-kriens-mit-trolleybusstrom-geladen-werden-ld.1221781>

CKW Newsroom:

<https://www.ckw.ch/ueber-ckw/newsroom/medienmitteilungen/2020/ckw-lanciert-schnelladestation-mit-strom-direkt-von-der-trolleybus-oberleitung.html>

CKW Stories:

<https://www.ckw.ch/ueber-ckw/stories/2020/elektroauto-bezieht-strom-direkt-aus-der-bus-oberleitung.html>

Axpo Magazin:

https://www.axpo.com/ch/en/about-us/magazine_detail.html/magazine/innovation/charging-electric-vehicles-with-trolley-bus-power.html



8 Literaturverzeichnis

1. **Siemens.** press.siemens.com. [Online] Siemens, 13. 12 2018. [Zitat vom: 07. 09 2020.] <https://press.siemens.com/global/de/feature/forschungsprojekt-fastcharge-ultra-schnellladetechnologie>.
2. **Kompendium, Elektronik.** Elektronik Kompendium . [Online] [Zitat vom: 07. 09 2020.] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm>.
3. **Petzl, Dipl.-Chem. Mathias.** *Zerstörungsfreie Charakterisierung von Lithium-Plating in Lithium-Ionen-Batterien.* Ulm : Universität Ulm, 2015.
4. **Keil, Dipl.-Ing. Peter.** *Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles.* München : TUM, 2017.
5. **Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O'Kane, Xinhua Liu.** *Lithium-ion battery fast charging: A review.* s.l. : Elsevier, 2019.
6. **Purushothaman, Morrison, Landau.** *Reducing Mass-Transport Limitations by Application of Special.* Cleveland : Journal of the Electrochemical Society , 2004.
7. **al., P.Notten et.** *Boostcharging Li-ion batteries. A challenging new charging concept .* Eindhoven : Journal of Power Sources , 2005 .
8. **al., D.Anseàn et.** *Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis.* Gijon : Journal of Power Sources , 2013 .
9. **Mohamed Abdel-Monem, Khiem Trad, Noshim Omar, Omar Hegazy, Peter Van de Bossche, Joeri Van Mierlo.** *Influence analysis of static and dynamic fast-charging current profiles on ageing performance of commercial lithium-ion batteries.* Brüssel, Kairo : elsevier, 2016 .
10. **Jun Li, Edward Murphy, Jack Winnick, Paul A Kohl.** *The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries.* Georgia, USA : Journal of Power Sources, 2001.
11. **Yanfei Zhao, Yicheng Song, Junqian Zhang.** *A modified pulse charging method for lithium-ion batteries by considering stress evolution, charging time and.* Shanghai : Higher Education Press and Springer-Verlag , 2019.
12. **Peter Keil, Andreas Jossen.** *Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells.* München : Journal of Energy Storage , 2015 .
13. **Mohammadali Mirsalehian, Rüdiger Beykirch.** *Thermische Betrachtung und physikalische Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien.* Aachen : ATZ, 2020.
14. **Goutam, Shovon.** *Three-dimensional electro-thermal model of li-ion pouch cell: Analysis and comparison of cell design factors and model assumptions.* Anderlecht, Belgium : ScienceDirect, 2017.
15. **Designwerk GmbH.** *CKW – Machbarkeitsstudie DC Charger Oberleitung.* Winterthur : s.n., 2017.
16. **Bohm, Pamina.** *Kurzzeitige thermische Belastung von Lithium-Ionen Zellen während des Montageprozesses zu Hochvolt-Batteriesystemen.* Göttingen : Cuvillier Verlag .



9 Anhang

A Projektteam

Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW)

Andelko Suker

(Leiter ETRM-IT)

Markus-Antonio Sager

(Produktmanager E-Mobilität)

Jan-Niclas Viebrock

(Leiter Produktmanagement)

Schätzle AG

Patrick Schätzle

(Leiter Marketing und Personal)

Claude Berthold

(Leiter Tankstellen)

Verkehrsbetriebe Luzern AG

Andreas Zemp

(Leiter Technik & Infrastruktur)

Gerhard Kathriner

(Leiter Fahrleitung)

dank dem Projektteam ist das Projekt überhaupt zu Stande gekommen.

B Eingangsspannungsanalyse

| Parameter | B1 | B2 | B3 | B4 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Minimalwert | 484.1 V | 511.9 V | 682.9 V | 668.3 V |
| 5th Perzentil | 610.0 V | 600.0 V | 690.3 V | 670.6 V |
| 25th Perzentil | 639.9 V | 631.5 V | 692.6 V | 674.4 V |
| Median | 653.4 V | 647.9 V | 694.5 V | 675.4 V |
| 75th Perzentil | 666.5 V | 665.6 V | 696.6 V | 678.7 V |
| 95th Perzentil | 741.6 V | 723.8 V | 700.6 V | 680.6 V |
| Maximalwert | 764.2 V | 757.0 V | 709.6 V | 688.3 V |

Tabelle 2: 1-Sekunden-Messwerte der Eingangsspannung der Ladestation

| Parameter | B1 | B2 | B3 | B4 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Minimalwert | 585.7 V | 587.9 V | 685.5 V | 670.1 V |
| 5th Perzentil | 634.2 V | 627.3 V | 690.4 V | 671.1 V |
| 25th Perzentil | 647.0 V | 640.1 V | 692.6 V | 674.5 V |
| Median | 657.1 V | 649.2 V | 694.5 V | 676.1 V |
| 75th Perzentil | 668.2 V | 660.4 V | 696.5 V | 679.1 V |
| 95th Perzentil | 688.7 V | 678.6 V | 700.5 V | 683.2 V |
| Maximalwert | 737.5 V | 703.9 V | 707.3 V | 695.0 V |

Tabelle 3: Gleitender Durchschnitt (1-Minuten-Werte) der 1-Sekunden-Messwerte der Eingangsspannung der Ladestation



C Netzanalyse

C.1 Netztopologie

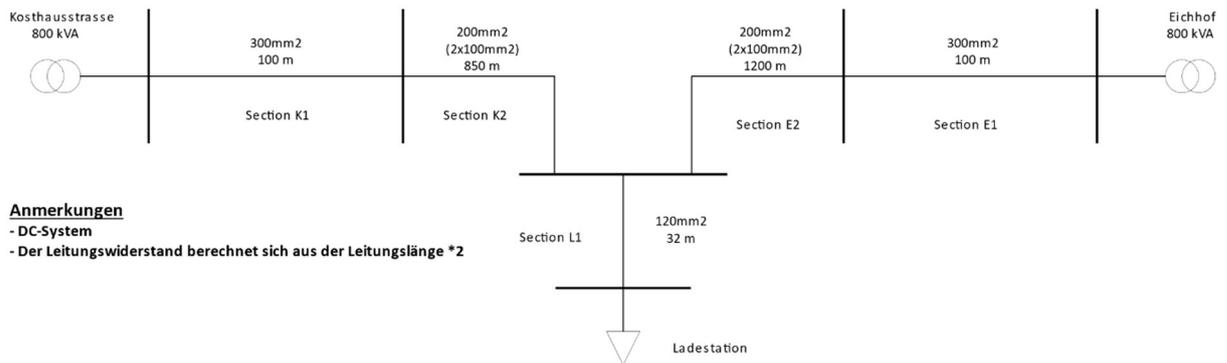


Abbildung 23: Topologie des Netzes, an das die Ladestation angeschlossen ist

C.2 Abschätzung des Widerstands des Oberleitungsnetzes

Generelle Formel: $R = \rho \times \frac{l}{S}$

- Mit:
- ρ_{cu} : Spezifischer Widerstand von Kupfer ($\rho_{cu} = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega m$)
 - l : Leitungslänge in m
 - S : Leiterquerschnitt in mm^2

erhält man:

| | | |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| $R_{K1} = 0.011 \Omega$ | $R_{K2} = 0.1445 \Omega$ | $R_{L1} = 0.009 \Omega$ |
| $R_{E1} = 0.011 \Omega$ | $R_{E2} = 0.204 \Omega$ | |

und:

$$R_{Oberleitung} = \frac{(R_{K1} + R_{K2}) * (R_{E1} + R_{E2})}{(R_{K1} + R_{K2}) + (R_{E1} + R_{E2})} + R_{L1} = 0.099 \Omega$$