

DIPLOMARBEIT

Entwicklung effizienter Ladesteuerungsmethoden an E-Taxistandplätzen unter Berücksichtigung der Leitertemperatur

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

und

Dipl.-Ing. Dominik Fasthuber

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von

Stefan Zimmermann BSc

0728160

Walterschlag 23

3970 Weitra

Wien, im Juni 2014

Danksagung

Die Durchführung und das Verfassen der Diplomarbeit bilden, gemeinsam mit der Diplomprüfung, den Abschluss des Studiums. Das Studium der Elektrotechnik ist ein wichtiger Abschnitt in meinem bisherigen Leben, der hiermit zu Ende geht. Es ist somit ein willkommener Zeitpunkt, mich bei allen zu bedanken die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer DI Dominik Fasthuber, für die Unterstützung und das Beantworten meiner unzähligen Fragen, aber auch bei DI Markus Litzlbauer für die oftmalige Bereitstellung, der von mir benötigten Daten. Ohne diese Mithilfe hätte die Durchführung meiner Diplomarbeit erheblich mehr Zeit in Anspruch genommen.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie. Allen voran meinen Eltern, Paula und Karl Zimmermann, für den bedingungslosen sozialen und finanziellen Rückhalt. Ohne ihre Unterstützung wäre mir das Absolvieren des Studiums nicht möglich gewesen. Natürlich möchte ich mich auch bei meinen Geschwistern, Gabi und Karl, und deren Familien bedanken, die mich bei den oftmaligen Treffen am Wochenende, die Anstrengungen des Studiums vergessen ließen.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Theresa bedanken, die mir mit ihrem Verständnis und ihrer Liebe, die nötigen Freiräume gegeben, und mich nach so manchen Rückschlägen wieder aufgebaut hat.

Kurzfassung

Soll der mittlere globale Temperaturanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf 2°C begrenzt werden, müssen die CO_2 -Emissionen bis zum Jahr 2050 drastisch gesenkt werden. Vor allem der Verkehrssektor wird einen großen Beitrag zur Reduktion der CO_2 -Emissionen leisten müssen. Daher wurde im Forschungsprojekt ZENEM die Auswirkungen von Elektrotaxis auf das Wiener Niederspannungsnetz untersucht und festgestellt, dass es zu kurzen Überschreitungen der thermischen Grenztemperatur des Erdkabels kommen kann. Aufbauend auf diesen Ergebnissen und den Arbeiten über die thermische Modellierung von Leitungen, welche ebenfalls am Institut für Elektrische Anlagen der TU Wien durchgeführt wurden, wird in dieser Arbeit die Auswirkung einer Ladesteuerung untersucht. Das Ziel dieser Ladesteuerung ist, die Leitertemperatur des Erdkabels unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur zu halten.

Dazu wird in MATLAB/SIMULINK ein Modell entwickelt, welches die thermische Modellierung eines Erdkabels mit einer Ladesteuerung an E-Taxistandplätzen kombiniert.

Zunächst wird auf die verwendeten Basisdaten eingegangen und die Unterschiede zu den Daten, die in ZENEM verwendet wurden, herausgearbeitet. Danach wird kurz auf das verwendete thermische Modell und auf die in dieser Arbeit vorgenommenen Veränderungen eingegangen.

Bei der Umsetzung der Ladesteuerung werden zwei Ladestrategien vorgestellt. Eine, die unabhängig vom Ladezustand der Batterie die Ladeleistung aller Fahrzeuge am Taxistandplatz reduziert, wenn eine thermische Grenzverletzung droht, und eine zweite, die E-Taxis mit niedrigem Ladezustand bevorzugt.

Um das Verhalten des Modells zu testen, werden vier unterschiedliche Szenarien definiert. Anhand der Simulationsergebnisse erfolgt sowohl eine Gegenüberstellung zwischen ungesteuertem und gesteuertem Laden, als auch eine Analyse der Vor- und Nachteile der beiden Ladestrategien. Außerdem werden die Auswirkungen der beiden Ladestrategien auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken der einzelnen E-Taxis analysiert.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen.

Abstract

To limit the average global increase in temperature to 2°C until the end of this century, the CO_2 emissions must be decreased dramatically until the year 2050. Especially the transport sector must achieve a major contribution to the reduction of CO_2 emissions. Therefore in the research project ZENEM the effects of electric taxis on the low voltage system in Vienna were investigated. One result of this research project was, that there are some thermal boundary violations of the cable, because of the additional workload for charging the electric taxis.

Based on this result and the two theses about transient thermal modelling of cables, which were executed at the institute of electrical devices at TU Vienna, the effects of a charging control are investigated. The aim of this charging control is to hold the cable temperature under the maximum allowed operating temperature.

For that purpose a MATLAB/SIMULINK model is developed, to combine the transient thermal modelling of a cable with a charging control at taxi stands.

First of all there is a description of the used underlying data. The differences to the used data in the ZENEM project are shown. Afterwards there is a short characterization of the used transient thermal model and which changes are made in this thesis.

For the implementation of a charging control two different charging strategies are introduced. One, which reduce the charging power of all taxis at the taxi stand independent from the state of charge of their batteries, if there is a possible thermal boundary violation, and another one, which prefer vehicles with a low state of charge.

Four scenarios are defined for testing the model. With the results of these scenarios there is a comparison of controlled and uncontrolled charging. The advantages and disadvantages of the two different charging strategies are described, and the effects of the on the fulfillment of the mobility needs of taxis are analyzed.

At the end of the thesis the results are summarized and an outlook on further developments is given.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Gliederung	3
2 Basisdaten	5
2.1 Mobilitätsdaten der E-Taxiflotte	5
2.2 Verteilnetz	10
2.2.1 Lastprofile	10
2.2.2 Kabel	10
2.3 Umgebungstemperatur	12
3 Thermische Modellierung	14
3.1 Allgemeines zur Berechnung	15
3.1.1 Berechnung der Verluste im Kabel	16
3.2 Die stationäre Modellierung	18
3.2.1 Berechnung der Wärmewiderstände	18
3.2.2 Belastbarkeit	20
3.3 Die transiente Modellierung	20
3.4 Umsetzung des Modells	21
3.5 Erwärmungsverlauf eines Kabels	22
4 Umsetzung der Ladesteuerung	25
4.1 Abschätzung der Temperaturentwicklung	25
4.2 Berechnung der Ladeprofile und des SOC	27
4.3 Berechnung der Strangströme	30
4.4 Ladesteuerungsmechanismen	32
4.4.1 Variante 1: Gleichmäßige Reduktion der Ladeleistung	32
4.4.2 Variante 2: SOC - abhängige Reduktion der Ladeleistung	33

4.5	Umsetzung des Modells in MATLAB/SIMULINK	37
5	Ergebnisse	40
5.1	Definition der Szenarien	40
5.2	Szenario A	41
5.2.1	Ungesteuertes Laden	42
5.2.2	Gesteuertes Laden	44
5.3	Szenario B	46
5.3.1	Ungesteuertes Laden	46
5.3.2	Gesteuertes Laden	47
5.4	Szenario C	51
5.4.1	Ungesteuertes Laden	51
5.5	Szenario D	53
5.5.1	Ungesteuertes Laden	53
5.5.2	Gesteuertes Laden	54
5.6	Interpretation der Ergebnisse	57
5.6.1	Leitertemperatur	57
5.6.2	Erfüllbarkeit der Wegstrecken	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
6.1	Ausblick	61
A	Parameterliste	68
A.1	Parameterliste für die thermische Modellierung	68
A.2	Parameterliste der Ladesteuerung	69
B	Netzplan	71

1 Einleitung

Der Klimawandel ist eines der zentralen Themen unserer Zeit. Um unvorhersehbare Folgen des Klimawandels zu vermeiden, soll der mittlere globale Temperaturanstieg auf 2 °C im Bezug auf die Temperatur vor der Industrialisierung begrenzt werden (2 °C-Ziel). Dazu müssen die Treibhausgasemissionen der Industriestaaten bis 2050 um 80 % bis 95 % gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird der Verkehrssektor (vor allem PKW-Verkehr) bis 2050 nahezu frei von CO₂-Emissionen sein müssen. [5]

In Abbildung 1.1 sind die CO₂-Emissionen des Jahres 2011 in Österreich nach Sektoren aufgeschlüsselt. Der Anteil des Verkehrs beträgt 31 % und ist somit für fast ein Drittel der österreichweiten Emissionen verantwortlich. Um die notwendige Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen, ist neben Effizienzsteigerungen auch die Entwicklung und Einführung neuer Technologien notwendig.

Die Elektromobilität wird dabei als eine der Schlüsseltechnologien gesehen um den CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors zu verringern. Wobei hier zu erwähnen ist, dass es sich bei Elektromobilität um keine „neue“ Technologie handelt. Das erste Elektrofahrzeug wird Gustave Trouvé im Jahr 1881 zuerkannt und wurde somit vor dem ersten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor erfunden (Carl Benz 1886).

Da batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV¹) keine direkten CO₂-Emissionen verursachen, ist hier ein großes Einsparungspotential vorhanden. Es muss jedoch auch auf die Erzeugung, der durch die BEV zusätzlich benötigten Energie, geachtet werden. Einer Studie des Umweltbundesamts (vgl. [5]) zufolge, wird das Ausmaß des zusätzlich durch den PKW-Verkehr im Jahr 2050 benötigten Stroms 9 TWh betragen. Im Vergleich dazu wird 31,5 TWh an flüssigem Kraftstoff eingespart. Die größte Einsparung an Treibhausgasen lässt sich erzielen, wenn diese elektrische Energie über erneuerbare Energieträger (z.B.: Wind, Wasserkraft, Photovoltaik) erzeugt wird. Dadurch wird auch die Abhängigkeit von Ölimporten reduziert, welches einen zusätzlichen nicht zu unterschätzenden Vorteil darstellt.

Ein weiterer Einsparungseffekt an Energie ergibt sich dadurch, dass elektrische Antriebe deutlich effizienter arbeiten als Verbrennungsmotoren. Elektrofahrzeuge besitzen einen Effizienzfaktor von 3,5 im Vergleich zu „konventionellen“ Fahrzeugen. Dieser spiegelt den niedrigeren Bedarf an Primärenergieeinsatz wider. Des weiteren werden durch BEV auch

¹engl. battery electric vehicle

weniger Geräusche emittiert. Dies ist vor allem in städtischen Gebieten von Vorteil da die Lebensqualität der Einwohner erhöht wird. [5]

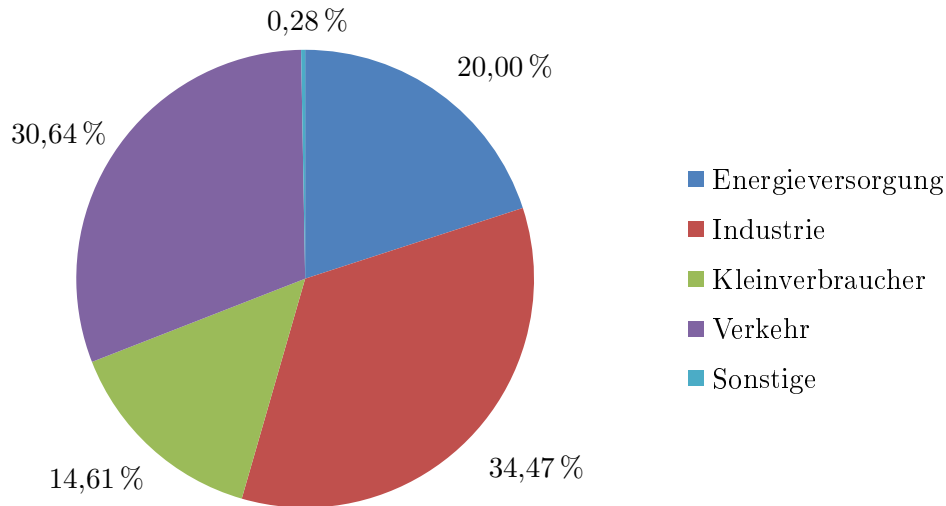


Abbildung 1.1: CO₂-Emissionen nach Sektoren in Österreich 2011 [12].

Die Einführung von Elektrofahrzeugen in Österreich gestaltet sich schwierig. So wurden im Jahr 2013 lediglich 654 BEV zugelassen. Dies entspricht ca. 0,2 % der gesamten Neuzulassungen und einer Steigerung im Vergleich zum Vorjahr von 53 %. Dazu kommen noch 2573 Hybridfahrzeuge (ca. 0,8 % der Neuzulassungen). [1]

Taxis wären aufgrund ihres Betriebsverhaltens gut für die Umstellung auf Elektrofahrzeuge geeignet. Der Großteil der Fahrten besitzt eine Länge, die mit einem BEV problemlos erreicht werden kann und zwischen den einzelnen Fahrten kommt es zu Standzeiten, die sich optimal zur Aufladung eignen. Natürlich müssten hier auch geeignete Lademöglichkeiten geschaffen werden. Wie an der TU Wien im Projekt ZENEM² gezeigt, wäre die Umstellung einer ganzen Taxiflotte in Wien durchaus realisierbar. [11]

1.1 Motivation

Im Forschungsprojekt ZENEM wurden die Auswirkungen von Elektrotaxis (E-Taxi) auf das Wiener Niederspannungsnetz untersucht. Eines der Ergebnisse war, dass es aufgrund der zusätzlichen Netzbelastungen durch die Ladeinfrastruktur zu kurzzeitigen thermischen

²Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität

Überlastungen der Erdkabel kommt. Die thermischen Überlastungen führen zu einer schnelleren Alterung der Erdkabel, wobei diese mit der van't Hoff'schen Regel abgeschätzt werden kann. Diese Faustregel kommt aus der chemischen Kinetik und besagt, dass bei einer Temperaturerhöhung um 10 K die chemischen Reaktionen mit doppelter bis vierfacher Geschwindigkeit ablaufen (vgl. [13]). Um die thermischen Belastungen im Verteilnetz berechnen zu können, wurden zwei thermische Modelle am Institut für Elektrische Anlagen der TU Wien entwickelt. Diese Modelle basieren auf einer zeitschritt-basierten Berechnung und wurden in MATLAB/SIMULINK der Firma *The Math Works* umgesetzt.

An diesem Institut wurden auch Modelle zur Ladeprofilbildung sowie zur Berechnung des Ladezustands der Batterie (SOC³) entwickelt. Diese Modelle arbeiten ereignisgesteuert, das heißt es werden die Berechnungen nicht in äquidistanten Zeitschritten durchgeführt, sondern durch bestimmte Ereignisse getriggert. Diese Modelle wurden in MATLAB umgesetzt.

Vereint man nun die Modelle in ein Gesamtmodell, ist es möglich eine Ladesteuerung zu entwickeln, und die Auswirkungen dieser auf die Erfüllbarkeit der Wege zu analysieren. Es besteht somit die Möglichkeit auf die Gefahr der thermischen Überlastung zu reagieren und die Ladeleistung der E-Taxis zu reduzieren. Gleichzeitig kann durch das Modell diese Veränderung im SOC der einzelnen BEV abgebildet werden.

Die **Ziele dieser Arbeit** können wie folgt definiert werden:

- Die Kombination der bereits existierenden Modelle in ein Gesamtmodell.
- Darauf aufbauend soll eine Ladesteuerung entwickelt werden, die ein kurzzeitiges Überlasten des Erdkabels erlaubt, solange die maximal zulässige Betriebstemperatur nicht überschritten wird.
- Analyse der Auswirkungen der Ladesteuerung auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken.

1.2 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 die Herkunft sowie die Verwendung der Basisdaten beschrieben. Es werden Informationen über die Generierung der Taxidaten und die Messung der Haushaltslastprofile im Zuge des Forschungsprojekts ZENEM gegeben. Weiters erfolgt eine kurze Beschreibung des im Wiener

³engl. state of charge

Niederspannungsnetz verwendeten Erdkabels.

In Kapitel 3 werden die Grundprinzipien des thermischen Modells erläutert. Zunächst werden die wichtigsten Formeln und Zusammenhänge dargestellt. Danach erfolgt eine Einführung in die transiente und stationäre thermische Modellierung. Abschließend wird das verwendete Modell erklärt und die im Zuge dieser Arbeit vorgenommenen Änderungen beschrieben.

Kapitel 4 befasst sich mit der Umsetzung der Ladesteuerung. Es werden zwei verschiedene Ladesteuerungskonzepte beschrieben sowie auf die Vor- und Nachteile eingegangen. Am Ende dieses Kapitels wird der Aufbau des Gesamtmodells in MATLAB/SIMULINK gezeigt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien werden in Kapitel 5 präsentiert. Es wird auf die Leitertemperaturen und die Auslastung des Erdkabels sowie auf den Ladezustand der einzelnen Taxis eingegangen. Am Ende dieses Kapitels werden die Leitertemperaturen der einzelnen Szenarien bei ungesteuertem und gesteuertem Laden gegenübergestellt.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit in der Zusammenfassung nochmals kompakt wiedergegeben.

2 Basisdaten

Diese Arbeit baut auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts ZENEM [11] sowie der Arbeiten, über die thermische Modellierung von Kabeln und Leitungen von Dr.techn. Andreas Schuster [8] und DI Dominik Fasthuber [2] auf.

Die Mobilitätsdaten der E-Taxiflotte und die Informationen über die untersuchten Verteilnetze basieren auf den im Forschungsprojekt ZENEM erhobenen Daten.

Es werden die Szenarien 1 und 2 aus ZENEM betrachtet, da dort die thermische Belastung der Verteilnetze am größten ist. In diesen Szenarien besteht nicht an jedem Taxistandplatz (TSP) die Möglichkeit das E-Taxi zu laden. Es wurden die einzelnen Taxistandplätze zu Cluster zusammengefasst. Alle Taxistandplätze in einem Cluster werden als ein Taxistandplatz (eine Lademöglichkeit) modelliert. Deshalb werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Begriffe *TSP-Cluster* und *Taxistandplatz* als Synonym verwendet.

Es wurde untersucht, welche der 162 TSP-Cluster vorrangig mit einer Ladeinfrastruktur ausgestattet werden sollten, damit eine möglichst hohe Erfüllbarkeit der Wegstrecken gegeben ist. In den betrachteten Szenarien werden **20 TSP-Cluster mit einer Ladeinfrastruktur ausgestattet**, und somit besteht nicht die Möglichkeit an allen Taxistandplätzen das E-Taxi zu laden. Eine genauere Beschreibung der Szenarien sowie der TSP-Cluster findet sich im publizierten Endbericht von ZENEM [11].

2.1 Mobilitätsdaten der E-Taxiflotte

Im Projekt ZENEM wurde modellhaft angenommen, dass alle konventionellen Taxis einer Funktaxiflotte auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge (E-Taxis) umgestellt werden. Als Projektpartner diente die Wiener Vermittlungsgesellschaft *Taxi 31300*. Da es sich um eine reine Vermittlungsgesellschaft handelt, befinden sich die Fahrzeuge nicht im Besitz von *Taxi 31300*, die Lenker müssen sich jedoch während ihrer Schicht am System anmelden. [11]

Alle Taxis dieser Flotte sind mit GPS - Empfängern ausgestattet und melden im Abstand von mehreren Sekunden ihre Position an das System. Aus den anonymisierten Einzelpositionen wurde versucht eine zusammenhängende Wegkette zu konstruieren (vgl. [11]). Diese

Daten wurden in den beiden oben genannten Arbeiten über die thermische Modellierung von Leitungen verwendet.

In ZENEM wurde auch erhoben, zu welchen Zeiten die meisten E-Taxis gleichzeitig unterwegs sind. Dabei zeigt sich eine ausgeprägte Wochentagscharakteristik. So fahren von Montag bis Donnerstag vormittags um ca. 9h die meisten Taxis gleichzeitig, während am Wochenende und an Feiertagen die meisten Taxis um Mitternacht unterwegs sind. In Abbildung 2.1 ist der gemittelte Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden E-Taxis gezeigt. Thermische Probleme werden vor allem dann erwartet, wenn sich die größte Anzahl der gleichzeitig fahrenden E-Taxis mit den Spitzen der Haushaltslasten überlappt. Betrachtet man nicht die gemittelten Zeitwerte, sind laut ZENEM (vgl. [11]) bis zu maximal 62 % der Fahrzeuge gleichzeitig unterwegs.

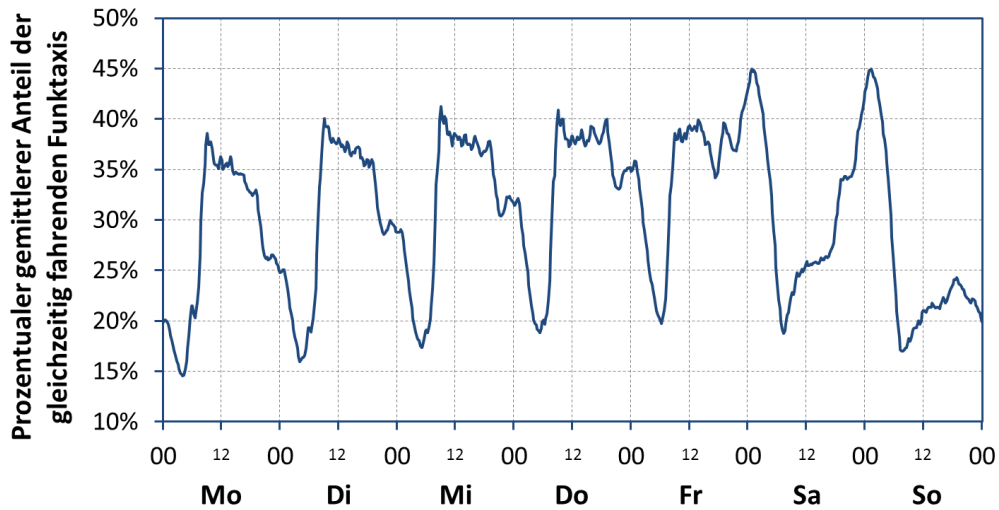


Abbildung 2.1: Gemittelter Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden Elektrotaxis [11].

In dieser Arbeit werden nicht die Originaldaten aus ZENEM verwendet. Das Problem bei diesen Daten ist, dass ein Verfolgen eines konkreten Taxis über einen längeren Zeitraum nicht möglich ist. Es können nur einzelne Taxischichten betrachtet werden. Um jedoch die Auswirkungen der Ladesteuerung auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken zu analysieren, werden durchgängige Wegstrecken über einen längeren Zeitraum benötigt.

Daher werden Mobilitätsdaten verwendet, die mit dem in der laufenden Dissertation von Herrn DI Markus Litzlbauer entwickelten stochastischen Algorithmus erzeugt wurden. Dazu wurden aufeinanderfolgende Taxifahrten mittels einer Markov-Kette erster Ordnung ermittelt und aneinander gereiht. Die Übergangswahrscheinlichkeiten der Markov-Kette wurden aus dem Datenpool erzeugt, welcher auf den GPS - Signalen der Funktaxis beruht. Für genauere Informationen siehe [6].

Die so generierten und für diese Arbeit bereitgestellten Daten besitzen die in Tabelle 2.1 gezeigte Form. Bei der Generierung der Daten wurden nur jene E-Taxis berücksichtigt, die

alle Wege innerhalb eines dreiwöchigen Betrachtungszeitraums erfüllen können. Für eine Batteriegröße von 48 kWh werden **350 E-Taxis** betrachtet, wobei **152 E-Taxis** auch alle Wege mit einer Batteriekapazität von 24 kWh erfüllen können.

Tabelle 2.1: Aufbau eines Datenvektors aus den in [6] erzeugten und in dieser Arbeit verwendeten Mobilitätsdaten.

Spalte	Bezeichnung	Beispiel	Hinweis
1	Taxi + Schicht	89006	Taxi: 89 / Schicht: 006
2	Abfahrtszeitpunkt	7,3525e+05	MATLAB datenum Format
3	TSP Abfahrt	1010	Gemeindebezirk: 10 / TSP: 10
4	TSP Ankunft	904	Gemeindebezirk: 9 / TSP: 04
5	Fahrdauer in Minuten	22,72	
6	Distanz je Fahrt in km	7,615	
7	Energiebedarf je Fahrt in kWh	1,9148	
8	Ankunftszeitpunkt	7,3525e+05	MATLAB datenum Format
9	Standdauer in Minuten	34,75	
10	Letzte Fahrt der Schicht	0	kennzeichnet Fahrerwechsel

Pro Fahrt existiert ein solcher Datenvektor und es entsteht eine Matrix mit allen erfassten Daten. Wie aus der Tabelle ersichtlich, befinden sich einige redundante Informationen in den zur Verfügung gestellten Daten. Des weiteren ist der Aufbau der Matrix ereignisgesteuert. Das heißt es befinden sich nur so viele Einträge pro Fahrzeug in der Matrix, als das Fahrzeug Fahrten absolviert. Für eine zeitschrittbasierte Simulation müssen die Daten umgewandelt werden.

Die Ladesteuerung sowie die thermische Modellierung der einzelnen Erdkabel wird in MATLAB/SIMULINK umgesetzt. Um die Daten in SIMULINK einlesen zu können, muss eine Matrix erstellt werden, in deren ersten Spalte sich ein Zeitstempel befindet. Für die Umsetzung der Ladesteuerung und die Simulation der Leitertemperaturen werden folgende Daten der Elektrotaxis benötigt:

- Wo befinden sich die E-Taxis im aktuellen Zeitschritt?
- Wie hoch ist der Energieverbrauch der E-Taxis während der einzelnen Fahrten?

Die gefahrene Distanz oder ob es sich um die letzte Fahrt einer Schicht handelt, ist nicht von Interesse für diese Arbeit. Daher werden die erhaltenen Mobilitätsdaten in die zwei Matrizen *Taxi_Standorte* und *Taxi_Energieverbrauch* umgewandelt. Der Aufbau der Matrix *Taxi_Standorte* ist in nachfolgender Gleichung dargestellt.

$$Taxi_Standorte = \left(\begin{array}{c|ccc} \text{Zeitstempel} & & & \text{Taxi} \\ \hline t_1 & a_1 & \dots & a_n \\ t_2 & b_1 & \dots & b_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_x & x_1 & \dots & x_n \end{array} \right) \quad (2.1)$$

Die Koeffizienten a_1 bis x_n stellen den Standort zu dem zugeordneten Zeitstempel dar. Die Standorte wurden wie in Tabelle 2.2 kodiert.

Tabelle 2.2: Kodierung der Standorte in der *Taxi_Standorte* Matrix

0	noch nicht im System erfasst
-1	Taxi fährt gerade
101 - 2399	Taxistandplatz ohne Ladeinfrastruktur
9999	Standort Zuhause (Ladung mit 3,68 kW möglich)
> 10000	Taxistandplatz mit Ladeinfrastruktur (50 kW Schnellladung)

Der Eintrag 0 tritt nur zu Beginn auf, da nicht alle Taxidaten mit dem gleichen Zeitstempel starten. Die Matrix *Taxi_Energieverbrauch* besitzt den gleichen Aufbau wie *Taxi_Standorte*. Es wird der Energieverbrauch der Fahrt eines E-Taxis zu jenem Zeitpunkt in die Matrix eingetragen, an dem es am nächsten Taxistandplatz ankommt. Ansonsten ist der Koeffizient gleich 0.

Bei der Erstellung dieser Matrizen aus den Basisdaten wurden die Aufenthalte an Taxistandplätzen mit einer Ladeinfrastruktur entfernt, deren **Standdauer weniger als vier Minuten** beträgt. Bei diesen Aufenthalten kommt es somit zu keiner Aufladung der Batterie. Diese Maßnahme wurde getroffen, weil eine Ladung bei einer so kurzen Standzeit als unrealistisch erscheint.

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die in dieser Arbeit verwendeten Daten, von den Daten, die für die thermische Simulation in [2] und [8] verwendet wurden. Betrachtet man nur die einzelnen Taxischichten, wird jede Schicht in der alle Wege mit der vorgegebenen Batteriekapazität erfüllt werden können, in die Simulation miteinbezogen. Möchte man jedoch das Taxi über mehrere Taxischichten hinweg verfolgen, müssen alle Fahrten des gesamten Betrachtungszeitraums mit der Batteriekapazität erfüllbar sein.

Werden nur die einzelnen Taxischichten betrachtet, kann sich die Anzahl der gleichzeitig betrachteten Schichten während des Simulationszeitraums ändern, je nachdem in wie vielen Taxischichten alle Fahrten erfüllt werden können. Dies ist der Grund, warum in den bisherigen Arbeiten über die thermische Modellierung einige kurze Überschreitungen der thermischen Grenztemperatur aufgetreten sind. Betrachtet man jedoch die Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum, bleibt die Anzahl der Fahrzeuge im Simulationszeitraum kon-

stant.

Da die Taxidaten mithilfe eines stochastischen Algorithmus generiert wurden, ist es schwierig die Spitzenwerte der Mobilitätsdaten die aus den GPS-Daten erzeugt wurden, genau nachzubilden. Erschwerend kommt hinzu, dass innerhalb des dreiwöchigen Simulationszeitraums alle Fahrten erfüllbar sein müssen.

Deshalb wurden einige Veränderungen in den Mobilitätsdaten der E-Taxis vorgenommen, um ähnliche thermische Situationen wie in ZENEM oder in [2] zu erzeugen. Dazu wurde der Energieverbrauch einiger Fahrzeuge erhöht, jedoch nur so weit, dass trotzdem alle Fahrten erfüllt werden können.

Ein interessanter Aspekt für die weiteren Betrachtungen ist die Verteilung des (bereits modifizierten) Energieverbrauchs aller Fahrten. In Abbildung 2.2 wird diese Verteilung in Boxplots für eine Batteriekapazität der E-Taxis von 48 kWh (a) und 24 kWh (b) dargestellt. Der Median wird durch die rote Linie in der Box dargestellt. Die obere Grenze der Box kennzeichnet das 75 % Quantil, die untere Grenze das 25 % Quantil. Die Whisker (Antenne an der Box) besitzen eine maximale Länge von 1,5 mal dem Interquartilsabstand. Alle Werte darüber hinaus werden als Ausreißer mit einem roten Kreuz gekennzeichnet.

Bei einer Batteriekapazität der E-Taxis von 48 kWh beträgt das 75 % Quantil 4,04 kW, bei einer 24 kWh Batterie ist das 75 % Quantil 3,93 kW. Das heißt, dass 75 % der Fahrten einen Energieverbrauch haben, der kleiner als diese Werte ist. Bei einem Großteil der Fahrten handelt sich also um kurze Wegstrecken.

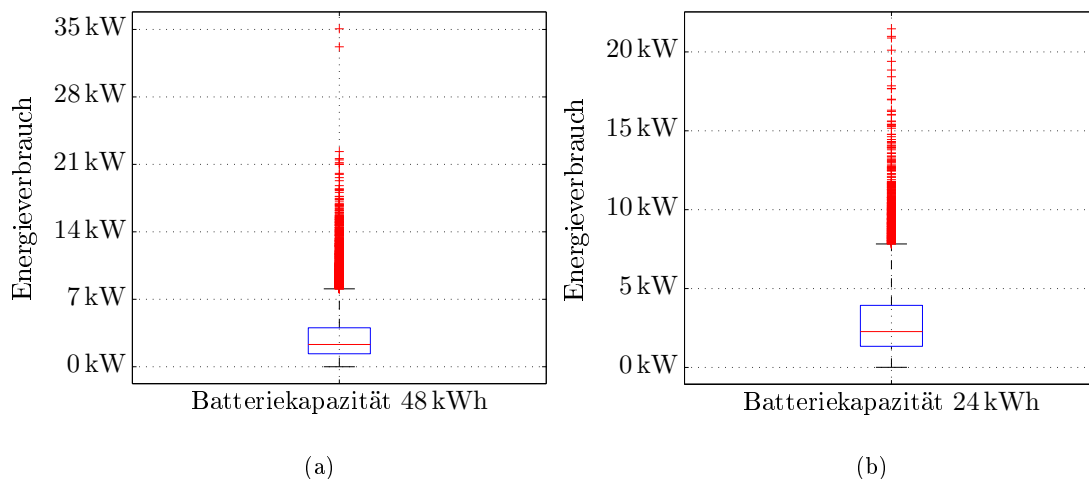


Abbildung 2.2: Darstellung der Verteilung des Energieverbrauchs der einzelnen Fahrten in Boxplots bei einer Batteriekapazität von 48 kWh (a) und 24 kWh (b).

2.2 Verteilnetz

Die Informationen über den Aufbau sowie die gemessenen Lastprofile wurden ebenfalls aus dem Forschungsprojekt ZENEM übernommen. In dieser Arbeit wird das **Netz 1 (Wohnen): Wallensteinplatz, 1200 Wien** verwendet. Für nähere Informationen siehe [11]. Der Netzplan ist im Anhang B zu sehen.

2.2.1 Lastprofile

Die Lastprofile wurden in einem Zeitraum von vier Wochen durch eine dreiphasige Messung an den Trennanschlusskästen ermittelt. Es wurden die Spannungen und Ströme pro Phase vom Messgerät ermittelt und daraus die Leistungen berechnet. Für jeden Netzknoten existieren somit die Wirk- und Blindleistung pro Phase.

Da, wie im Kapitel 4.3 näher erläutert, keine Lastflussberechnung durchgeführt wird, sind nur die Gesamtleistungen pro Phase von Interesse. Daher wird für die Phasen L_1 , L_2 und L_3 jeweils eine Matrix mit den Wirk- und eine Matrix mit den Blindleistungen aller Knoten erstellt. Um die Daten in MATLAB/SIMULINK verwenden zu können, wurde in der ersten Spalte ein Zeitstempel eingefügt. Diese Matrizen sind wie folgt aufgebaut.

$$P_{ges} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \text{Zeitstempel} \\ t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_x \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Knoten}_1 & \text{Knoten}_2 & \dots & \text{Knoten}_n \\ P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Es ist hier der Aufbau für die Wirkleistungsmatrix gezeigt, die Matrix für die Blindleistung ist äquivalent aufgebaut. Die Auflösung der in dieser Arbeit verwendeten Daten beträgt eine Minute.

In der Simulation werden für alle 20 TSP-Cluster die gleichen Haushaltslastdaten verwendet.

2.2.2 Kabel

Das in den Modellen verwendete Kabel ist an ein Standard Niederspannungskabel E-XAYY 4 x 150 SM angelehnt. Dieses Erdkabel besitzt eine angegebene Strombelastbarkeit von 275 A bei Verlegung im Erdreich.

In der nachstehenden Tabelle 2.3 ist die Kabelbezeichnung aufgeschlüsselt.

Tabelle 2.3: Aufschlüsselung der Kabelbezeichnung

E	Energiekabel
X	Sonderausführung (Kabel enthält Signalader)
A	Aluminiumleiter
Y	PVC Isolierung
Y	PVC Mantel
4 x 150	Aderanzahl mal Nennquerschnitt
SM	Leiteranordnung: sektorförmig und mehrdrähtig

Es handelt sich um ein Energiekabel mit einem Aluminiumleiter und einer Isolierung sowie einem Mantel aus PVC. Der Betriebstemperaturbereich ist mit -50°C bis 70°C angegeben.

In Abbildung 2.3 ist der Aufbau dieses Kabels zu sehen. Bei der mit Nummer 3 beschrifteten Ader handelt es sich um eine zusätzliche Signalader, welche in den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt wird.

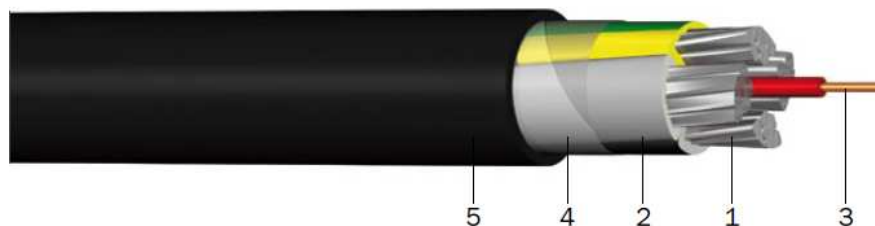


Abbildung 2.3: Aufbau des Niederspannungskabels E-XAYY 4 x 150 SM [4]

Für nähere Informationen über das verwendete Erdkabel siehe [4].

Verlegung des Erdkabels

Im Wiener Netz werden die Niederspannungskabel üblicherweise unter dem Gehsteig verlegt, während die Leitungen der Fernwärme sowie der Wasserversorgung unter der Straße verlegt werden. Dadurch befinden sie sich nicht im Einflussbereich des Erdkabels und etwaige Auswirkungen dieser Leitungen müssen nicht berücksichtigt werden.

Die Verlegung des Erdkabels erfolgt in einem Bettungsmaterial. Dabei handelt es sich um ein steinfreies Füllgut (wie z.B. Sand) welches für eine gute Wärmeabfuhr sorgen soll. Darüber wird eine Schicht Erde, Kies oder Schotter gegeben. Die Rückfüllung sollte auf jeden Fall frei von Bauschutt oder Asche sein. Da die Verlegung unter dem Gehsteig erfolgt, wird noch eine Asphaltdecke berücksichtigt.

In Abbildung 2.4 ist die Verlegung schematisch dargestellt, wobei es sich um keine maßstäbliche Darstellung handelt.

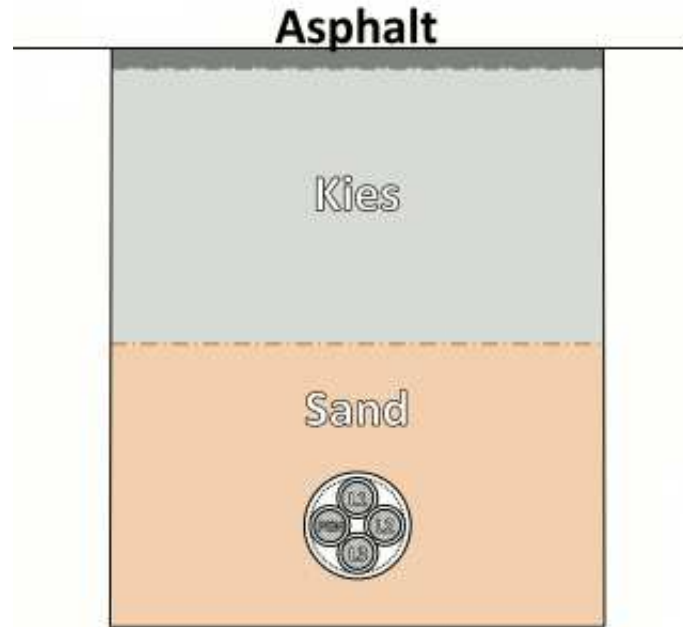


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Verlegung des Kabels im Erdboden. Quelle: [8]

Für die Dicken der einzelnen Schichten werden übliche Werte aus dem Wiener Netz verwendet. So wird als Bettungsmaterial Sand mit einer Dicke von 20 cm berücksichtigt. Die Schicht darüber (auch *Gräder* genannt), wird mit 50 cm und die Asphaltdecke mit 2,5 cm im Modell angenommen.

2.3 Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur ϑ_U beeinflusst die Temperatur des Erdkabels und ist deshalb ein entscheidender Parameter bei der thermischen Modellierung. Die Umgebungstemperatur wird von der Wärmeentwicklung der Leiter nicht beeinflusst. Die Temperatur der Asphaltdecke wird mit der Umgebungstemperatur angesetzt. Es werden die gemittelten Monatswerte der Umgebungstemperatur verwendet und zwischen diesen linear interpoliert. Somit werden auch die Jahreszeiten in die Betrachtung miteinbezogen. Tabelle 2.4 zeigt die Erdbodentemperatur unter der Asphaltdecke.

Wie man aus diesen Daten erkennen kann, ist der Juni mit $23,3^\circ\text{C}$ der wärmste und der Jänner mit $-0,4^\circ\text{C}$ der kälteste Monat unter der Asphaltdecke. Abbildung 2.5 zeigt den Jahresverlauf der Umgebungstemperatur.

Tabelle 2.4: Gemittelte Monatswerte der Umgebungstemperatur unter der Asphaltdecke [10].

Monat	Jän.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Temp. in °C	-0,4	4,1	6,7	14,8	14,1	23,3	21,1	19,6	18,5	17,4	4,8	1,9

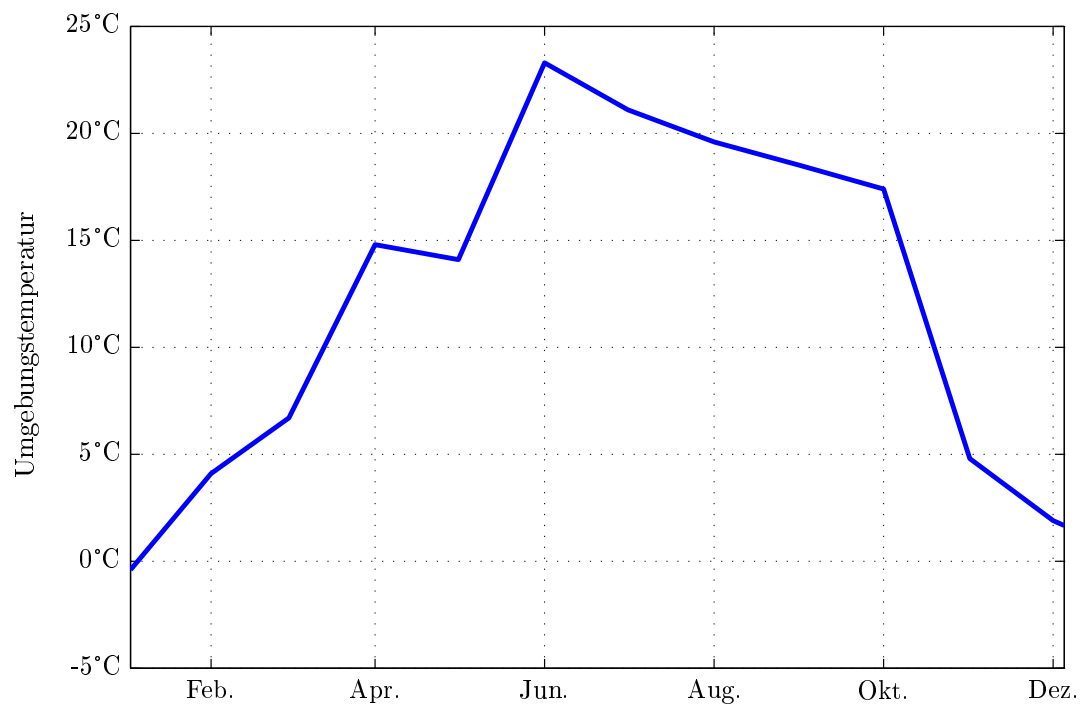


Abbildung 2.5: Grafische Darstellung der Umgebungstemperatur unter der Asphaltdecke.

3 Thermische Modellierung

In diesem Kapitel wird das Modell zur Berechnung der Erwärmung eines Kabels näher betrachtet.

Um ein Kabel thermisch zu modellieren, ist es notwendig die Gesamtverluste im Kabel zu berechnen. Diese setzen sich aus den Stromwärmeverlusten in den Leitern sowie in den metallenen Hüllen (bei Wechselstrom) und den dielektrischen Verlusten zusammen.

Durch diese Verlustleistung erwärmt sich das Kabel. Um die maximal erlaubte Temperatur nicht zu überschreiten, muss die Belastbarkeit berechnet werden, welche von folgenden Betriebsbedingungen abhängig ist: [10]

- Betriebsart
- Verlegebedingungen
- Umgebungsbedingungen

Unter Betriebsart versteht man den Tageslastspiegel, also den Strom der durch das Kabel geführt wird.

Zu den Verlegebedingungen zählen die Legetiefe und ob es eine Häufung bzw. Kreuzung von Kabeltrassen gibt. Die üblichen Legetiefen befinden sich laut [10] zwischen 0,7 m und 1,2 m. Kommt es zu einer Häufung mit einem anderen Erdkabel, muss dieses als zusätzliche Wärmequelle berücksichtigt werden. Auch bei mehradrigen Kabeln muss ein Umrechnungsfaktor miteinbezogen werden. Werden die Kabel in Rohren verlegt, kommt es aufgrund der zusätzlichen, schlecht wärmeleitfähigen Schicht zu einer Reduktion der Belastbarkeit.

Bei den Umgebungsbedingungen ist vor allem die Temperatur zu nennen. Bei Verlegung in Erde ist die Erdbodentemperatur als gegeben anzunehmen. Diese hängt nur von der Umwelt ab und wird durch die Kabelerwärmung nicht verändert. Die Schichten um das Erdkabel herum besitzen jeweils spezifische Wärmewiderstände, die für die Berechnung des Temperaturverlaufs benötigt werden. Die Wärmewiderstände hängen vom Material (Sand, Kies, Asphalt) und vom Feuchtigkeitsgehalt der Schicht ab. Durch die Erwärmung des Kabels kann es dazu kommen, dass die Umgebung austrocknet und der Wärmewiderstand reduziert wird. Durch diese Effekte kann es zu einer Reduktion der Belastbarkeit kommen.

3.1 Allgemeines zur Berechnung

Wie bereits erwähnt, kommt es durch die Verluste im Kabel zu einer Erwärmung. Ist die Leitertemperatur größer als die Umgebungstemperatur, entsteht aufgrund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik, ein Wärmestrom der vom Kabelinneren nach außen gerichtet ist. Die Verlustwärme wird über die Wärmeleitung des Erdbodens an die Atmosphäre abgeführt.

Dieser Wärmestrom lässt sich durch ein Gesetz beschreiben das dem Ohmschen Gesetz ähnlich ist. Hierbei entspricht der elektrischen Spannung die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_L$, der elektrische Strom dem Wärmestrom $\dot{Q}$ und der elektrische Widerstand der Summe der Wärmewiderstände $\sum T$.

$$\Delta\vartheta_L = \dot{Q} \cdot \sum T \hat{=} U = I \cdot R \quad (3.1)$$

Der Wärmestrom setzt sich aus den im Kabel auftretenden Stromwärmeverlusten sowie den dielektrischen Verlusten zusammen. Zu beachten ist, dass die dielektrische Verlustleistung von der Spannung abhängt.

Mit der in Abbildung 3.1 dargestellten Anordnung der Wärmewiderstände kann die Erhöhung der Leitertemperatur $\Delta\vartheta_L$ berechnet werden. Durch die Analogie mit dem Ohmschen Gesetz lässt sich die Temperaturerhöhung sehr einfach berechnen. Die Ersatzschaltung in Abbildung 3.1 bildet somit die Grundlage des in dieser Arbeit verwendeten thermischen Modells.

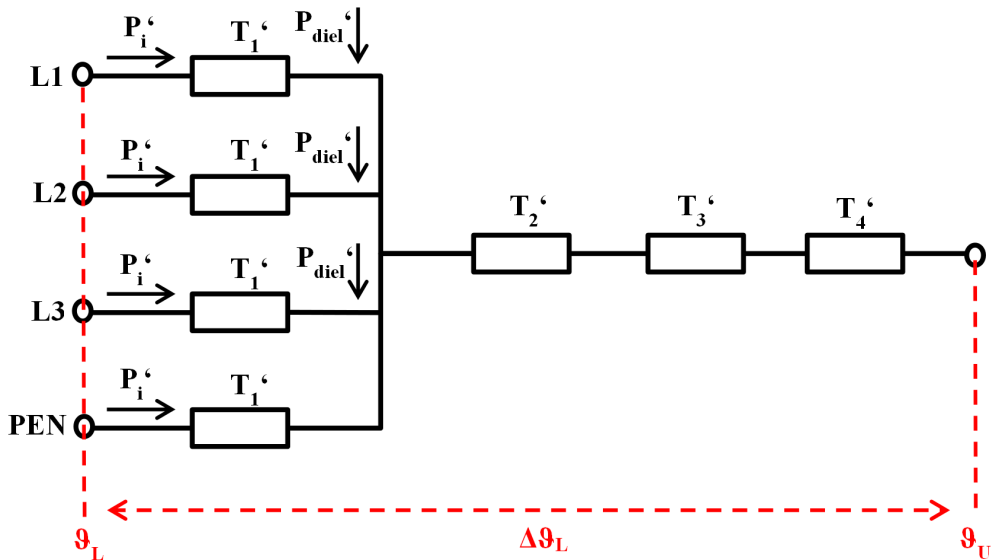


Abbildung 3.1: Thermisches Ersatzschaltbild eines Niederspannungskabels nach [2]

3.1.1 Berechnung der Verluste im Kabel

Die Gesamtverluste setzen sich aus den Stromwärmeverlusten und den dielektrischen Verlusten zusammen.

$$P'_v = P'_i + P'_{diel} \quad (3.2)$$

Die Berechnung der Verluste sowie der elektrischen und thermischen Widerstände erfolgt über längenbezogene Größen, welche durch ein ' gekennzeichnet sind.

Stromwärmeverluste

Die Stromwärmeverluste entstehen im Leiter, im Metallmantel sowie in der Bewehrung, und berechnen sich mit nachstehender Gleichung.

$$P'_i = n \cdot I^2 \cdot R'_{wr} \quad (3.3)$$

R'_{wr} kennzeichnet den Wirkwiderstandsbelag des Kabels. Der Faktor n wird für die Anzahl der Leiter verwendet. Dies gilt natürlich nur, wenn alle Leiter mit dem gleichen Strom durchflossen werden. Ansonsten müssen die Verlustleistungen von allen Leitern separat berechnet und anschließend addiert werden.

R'_{wr} setzt sich aus dem Widerstandsbelag R'_{ϑ_r} bei Gleichstrom und Korrekturfaktoren für den Skin- (γ_s) und Proximityeffekt (γ_p) sowie Korrekturfaktoren für Wirbelstrom- (λ_1) und Ummagnetisierungsverluste (λ_2) zusammen. Genauere Angaben zu diesen Effekten können der Fachliteratur (vgl. [10]) entnommen werden, da sie in diesem Modell nur geringen Einfluss haben.

$$R'_{wr} = R'_{\vartheta_r} + \Delta R = R'_{20} \cdot (1 + \gamma_s + \gamma_p) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.4)$$

Der Widerstandsbelag R'_{ϑ_r} bei einer zulässigen Betriebstemperatur und Gleichstrom beträgt

$$R'_{\vartheta_r} = R'_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_L - 20)] \quad (3.5)$$

für einen Leiter. Hierbei kennzeichnet R'_{20} den Gleichstromwiderstandsbelag bei 20 °C. Dieser ist genormt und kann ebenfalls aus der Fachliteratur [10] oder der aktuellen Norm entnommen werden.

Dielektrische Verluste

Die spannungsabhängigen dielektrischen Verluste treten verteilt in der Isolierung auf. Bei einem idealen Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° voraus. Bei realen Kondensatoren weicht jedoch der Winkel von den 90° ab (aufgrund von Polarisations- und Leitfähigkeitsverlusten) und es entsteht ein Verlustwinkel δ . Der Verlustfaktor $\tan \delta$ ergibt sich aus dem Verhältnis des Wirkstroms I_δ und der um 90° vorseilenden Stromkomponente I_c .

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_c} \quad (3.6)$$

Er gibt das Verhältnis von dielektrischer Verlust- zu kapazitiver Blindleistung an. Abbildung 3.2 zeigt diesen Sachverhalt.

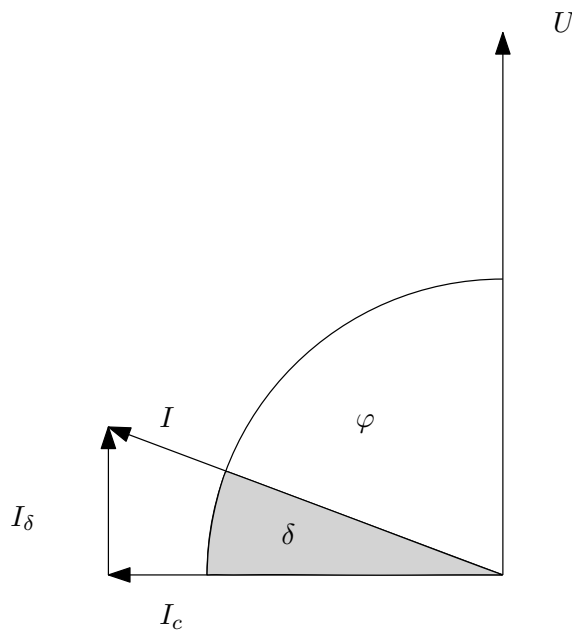


Abbildung 3.2: Zeigerdiagramm zur Veranschaulichung des Verlustfaktors $\tan \delta$ [2].

Die dielektrischen Verluste können mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$P'_{diel} = n \cdot \omega \cdot C'_b \cdot U_{str}^2 \cdot \tan \delta \quad (3.7)$$

Da die Spannung quadratisch in die Berechnung eingeht, wirken sich die dielektrischen Verluste erst bei höheren Spannungen aus. In dieser Arbeit wurden diese zwar modelliert, jedoch liefern sie aufgrund der Betrachtung des Niederspannungsnetzes nur einen geringen Beitrag zu den Gesamtverlusten.

Tabelle 3.1: Maximal zulässige Betriebstemperaturen für verschiedene Isolationsmaterialien [10].

Isolationsmaterial	zulässige Betriebstemperatur
VPE	90 °C
PVC	70 °C
ölgetränktes Papier	60 °C - 70 °C

3.2 Die stationäre Modellierung

Bei der stationären thermischen Modellierung wird davon ausgegangen, dass alle transienten Vorgänge abgeschlossen sind und somit die Temperatur solange konstant bleibt, bis eine neuerliche Stromänderung auftritt.

Die Temperatur der Isolation ist maßgeblich für die maximale Belastbarkeit eines Kabels verantwortlich. Die maximal zulässigen Betriebstemperaturen hängen vom jeweiligen Isolationsmaterial ab, und sind in Tabelle 3.1 zu finden. VPE¹ - Isolierungen besitzen die höchste Temperaturfestigkeit von 90 °C. PVC² und ölgetränktes Papier haben hingegen nur eine Temperaturfestigkeit von ca. 70 °C.

3.2.1 Berechnung der Wärmewiderstände

Um die Temperaturverteilung, die sich aufgrund der längenbezogenen Wärmewiderstände ergibt zu ermitteln, müssen diese zuerst berechnet werden. Durch den zylindrischen Aufbau des Kabels können die Wärmewiderstände für die Isolation (T'_1), der inneren Schutzhülle (T'_2) und der äußeren Schutzhülle (T'_3) wie folgt kalkuliert werden.

$$T'_{Schicht_x} = \frac{\varrho_{Schicht_x}}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{Schicht_x}}{r_{Schicht_ (x-1)}} \right) \quad (3.8)$$

Es werden hierzu die spezifischen Wärmewiderstände ϱ sowie die Radien der einzelnen Schichten benötigt.

Bei der Berechnung des Erdbodenwiderstands T'_E wird berücksichtigt, dass die Temperaturverteilung im Erdmaterial elliptisch ist, sowie die gesamte Wärme an die Oberfläche abtransportiert und über die Asphaltsschicht an die Umgebung abgegeben wird (vgl. [10]).

¹vernetztes Polyethylen

²Polyvinylchlorid

Es wird hier, ähnlich wie bei Linienladungen im elektrischen Feld, mit der Spiegelungsmethode gearbeitet. In Abbildung 3.3 ist eine Skizze der Anordnung zu sehen. Im unteren Kabel entstehen die Verluste die vom oberen spiegelbildlich angeordneten Kabel wieder aufgenommen werden.

$$T'_E = \frac{\varrho E}{2\pi} \cdot \ln(k) \quad (3.9)$$

Die elliptischen Isothermen werden über eine Geometriekonstante k berücksichtigt.

$$k = \frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d}\right)^2 - 1} \quad (3.10)$$

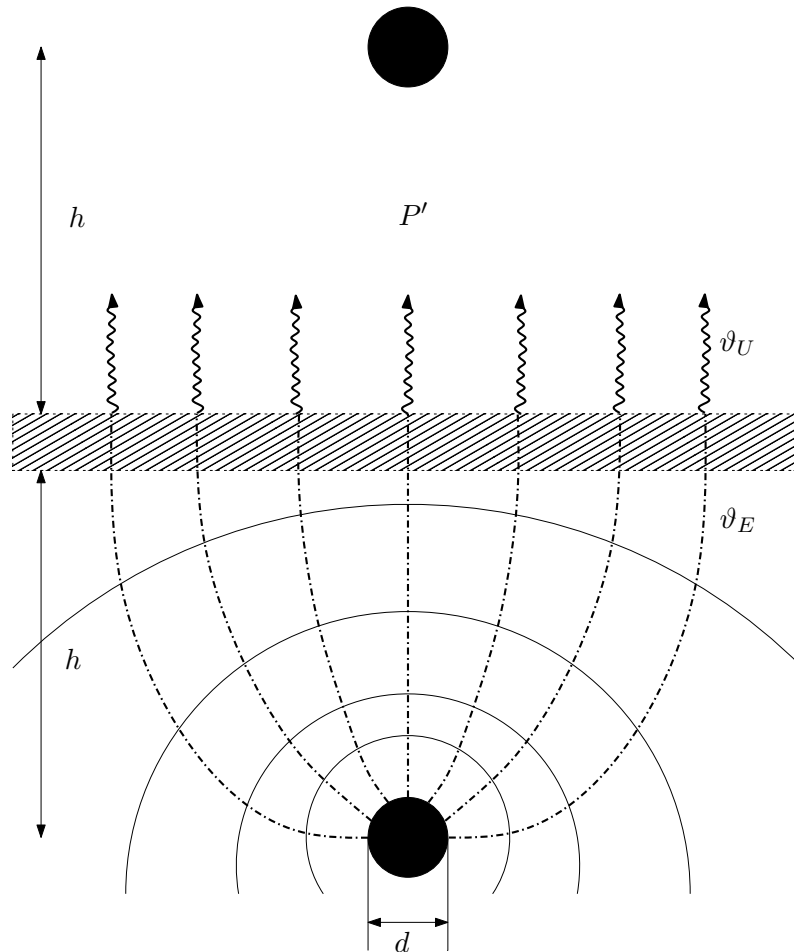


Abbildung 3.3: Temperaturfeld eines in der Tiefe h in der Erde verlegten Kabels mit gespiegelter Wärmequelle [2].

3.2.2 Belastbarkeit

Mit den im vorigen Kapitel berechneten Wärmewiderständen und dem Ersatzschaltbild in Abbildung 3.1 kann nun der maximal zulässige Betriebsstrom berechnet werden.

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_L - \vartheta_U - \Delta\vartheta_{diel}}{n \cdot R'_{wr} \cdot (T'_{Ki} + T'_4)}} \quad (3.11)$$

Der Faktor $\Delta\vartheta_{diel}$ spiegelt die Erwärmung aufgrund der dielektrischen Verluste wider und kann wie folgt berechnet werden.

$$\Delta\vartheta_{diel} = P'_{diel} \cdot (T'_{Kd} + T'_4) \quad (3.12)$$

Bei T'_{Ki} und T'_{Kd} handelt es sich um fiktive Wärmewiderstände die nur zur Berechnung eingeführt werden. Zur genaueren Beschreibung siehe [10].

$$T'_{Ki} = \frac{\frac{T'_1}{n} + (1 + \lambda_1) \cdot T'_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} + T'_3 \quad (3.13)$$

$$T'_{Kd} = \frac{T'_1}{2n} + T'_2 + T'_3 \quad (3.14)$$

Die Gleichung 3.11 lässt sich nach einigen Umformungen auch auf folgende Form bringen, welche für weitere Betrachtungen benötigt wird.

$$I_z = \sqrt{\frac{\frac{\vartheta_L - \vartheta_U}{\Sigma T} - P'_{diel}}{n \cdot R'_{wr}}} = \sqrt{\frac{\dot{Q}' - P'_{diel}}{n \cdot R'_{wr}}} \quad (3.15)$$

3.3 Die transiente Modellierung

Bis sich im Kabel der stationäre Zustand (Endtemperaturen wurden erreicht) einstellt, kommt es zu transienten Vorgängen. Die Geschwindigkeit mit der diese Vorgänge ablaufen, hängt von der spezifischen Wärmekapazität c_p des Materials ab. Je größer c_p ist, desto langsamer ändert das Material seine Temperatur. Die spezifische Wärmekapazität ist also ein Maß für die thermische Trägheit.

Der Ausgangspunkt der transienten Modellierung ist die Berechnung der aktuellen Verlustleistung P_v pro Zeiteinheit Δt .

$$P'_v = R'_{wr} \cdot I^2 + P'_{diel} \quad (3.16)$$

Wie aus Gleichung 3.4 ersichtlich, ist der Leiterwiderstand und somit auch die Verlustleistung leicht temperaturabhängig. Die dielektrischen Verluste sind nicht temperaturabhängig.

Das thermische Modell setzt auf folgendem Prinzip auf. Durch die Gesamtverluste erwärmt sich der Leiter und es kommt zu einem nach außen gerichteten Wärmestrom.

$$\dot{Q}_x' = \frac{\vartheta_x - \vartheta_{x+1}}{T_{x+1}'} \quad (3.17)$$

Der abgeleitete Wärmestrom $\dot{Q}_x'$ der Schicht x tritt in die Schicht $x + 1$ ein.

$$P'_{in,x+1} = \dot{Q}'_{out,x} \quad (3.18)$$

Für die Temperaturänderung ist der ein- sowie der austretende Wärmestrom entscheidend. Gemeinsam mit den beiden oben genannten Gleichungen, der spezifischen Wärmekapazität c_p , der Dichte d_x des Schichtmaterials sowie den Radien r_x der Schichten kann die Temperaturänderung für eine Schicht x wie folgt berechnet werden (vgl. [2]).

$$\Delta\vartheta_x = \frac{P'_{in,x} - \dot{Q}'_{out,x}}{c_{p,x} \cdot d_x \cdot (r_x^2 - r_{x-1}^2) \cdot \pi} \cdot \Delta t \quad (3.19)$$

3.4 Umsetzung des Modells

Die Umsetzung des in dieser Arbeit verwendeten Modells in MATLAB/SIMULINK beruht hauptsächlich auf der in der Diplomarbeit von DI Dominik Fasthuber [2] erstellten Version. Es wurden einige kleine Änderungen aufgrund des thermischen Modells in der Dissertation von Dr.techn. Andreas Schuster [8] vorgenommen. Hierbei zählt vor allem die Berücksichtigung des PEN - Leiters³ als zusätzliche (kleine) Wärmequelle. Die Berücksichtigung dieses Leiters wirkt sich jedoch nur sehr gering auf die Erwärmung des Erdkabels aus, da der Strom der über diesen Leiter fließt, nur ein Bruchteil des Stroms der anderen drei Leiter ist. Es kommt nur aufgrund der unsymmetrischen Belastung der drei Stränge zu einem Stromfluss im PEN - Leiter und da die Unsymmetrien relativ klein sind, ist auch der Strom relativ gering. Genauere Informationen sind aus den beiden oben genannten Arbeiten zu entnehmen.

MATLAB/SIMULINK ist für die Umsetzung des Modells besonders geeignet, weil eine zeitschritt-basierte Berechnung benötigt wird und sich dieses Programm dafür hervorragend eignet. Es werden die Temperaturen in einem Zeitabstand von einer Minute berechnet.

³kombinierter Schutz- (PE) und Neutralleiter (N)

Das thermische Modell hängt im wesentlichen von drei Komponenten ab, dem Kabel, dem Bettungsmaterial und der Umgebungstemperatur. Diese Komponenten wurden bereits im Kapitel 2 näher beschrieben.

Die Eingangsgrößen des Modells sind die berechneten Strangströme und die Ausgangsgrößen sind die Leitertemperaturen, die Summe der Wärmewiderstände, die Umgebungstemperatur, die dielektrischen Verluste sowie der Wirkwiderstandsbelag. Die Ausgangsgrößen des thermischen Modells werden von der Ladesteuerung als Eingangsgrößen benötigt, um die Temperaturentwicklung abschätzen zu können.

3.5 Erwärmungsverlauf eines Kabels

Für die Umsetzung einer Ladesteuerung zur Begrenzung der Temperatur eines Kabels, ist neben der aktuellen Temperatur auch der Erwärmungsverlauf des Kabels nach einem Lastsprung interessant. In den im vorigen Kapitel erwähnten Arbeiten wurde vor allem der sich einstellende Temperaturverlauf des Kabels anhand der Belastung untersucht. Auf die Fragestellung wie schnell sich die stationären Temperaturen nach einem Belastungssprung einstellen, wurde nicht eingegangen. Diese Information ist für die Umsetzung dieser Arbeit jedoch essentiell.

Aufgrund des leicht modifizierten thermischen Modells wird der Erwärmungsverlauf untersucht. Dazu werden solange konstante Strangströme am Eingang des Modells eingeprägt, bis sich ein stationärer Temperaturverlauf einstellt. Danach werden die Strangströme sprunghaft geändert und der Temperaturverlauf aufgezeichnet. Man erhält damit die Sprungantwort des thermischen Modells.

Um zu untersuchen ob der Erwärmungsverlauf temperaturabhängig ist, werden folgende Parameter variiert:

- Umgebungstemperatur
- Belastung des Kabels
- Sprunghöhe der Belastung

In Abbildung 3.4 ist der Temperaturverlauf eines Leiters ⁴ (L_1) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die Sprungantwort aus mehreren Exponentialfunktionen zusammensetzt,

⁴Aufgrund der symmetrischen Belastung sieht der Temperaturverlauf bei den Leitern L2 und L3 gleich aus.

was auch mit den Literaturangaben (vgl. [10]) übereinstimmt. Die stationäre Temperaturverteilung wird erst nach einer relativ langen Zeit von 10 000 Minuten (entspricht ca. einer Woche) erreicht, jedoch ist gerade in den ersten Minuten ein starker Anstieg der Temperatur zu erkennen. Dieser Temperaturverlauf lässt sich dadurch erklären, dass zu Beginn die Leitertemperatur aufgrund der gestiegenen Stromwärmeverluste rasch ansteigt. Durch den daraus entstehenden Wärmestrom nach außen werden auch die äußeren Schichten erwärmt. Aufgrund der größeren spezifischen Wärmekapazität dieser Schichten erfolgt die Erwärmung langsamer. Steigt jedoch die Temperatur der äußeren Schichten, nimmt die Energie, die über den Wärmestrom nach außen abgeführt wird, ab. Dadurch steigt auch die Leitertemperatur bis sich der stationäre Temperaturverlauf eingestellt hat.

Der qualitative Verlauf ändert sich durch die zuvor erwähnten Parametervariationen nicht. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Erwärmungsverlauf eines Kabels weder von der aktuellen Leitertemperatur des Kabels noch von der Umgebungstemperatur abhängt. Die Sprunghöhe ändert sich natürlich gemäß der Sprunghöhe der Belastung.

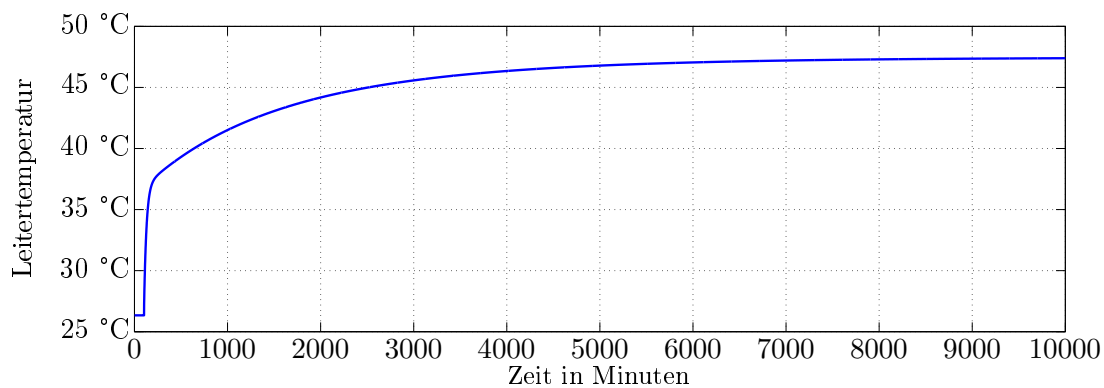


Abbildung 3.4: Erwärmungsverlauf nach einem Belastungssprung von 100 A auf 200 A und einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

Für die Umsetzung der Ladesteuerung ist vor allem der Bereich zu Beginn interessant. In Abbildung 3.5 wird dieser Bereich vergrößert dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Temperaturerhöhung nach einer Minute **ca. 5 %** und nach 10 Minuten **ca. 20 %** der Differenz der stationären Endwerte beträgt.

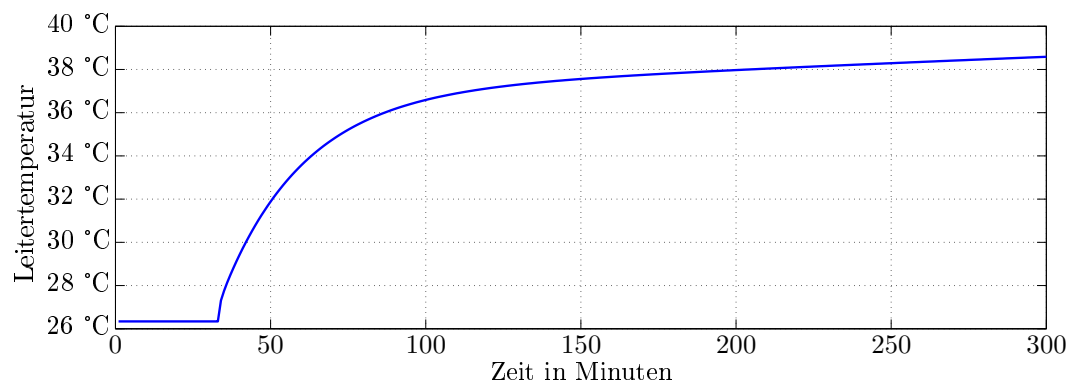


Abbildung 3.5: Vergrößerte Darstellung der ersten Minuten nach dem Belastungssprung.

4 Umsetzung der Ladesteuerung

Die Ladesteuerung soll nur dann aktiv in die Ladung der E-Taxis eingreifen, wenn ein Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur droht. Dazu muss der Frage nachgegangen werden, ab welchem Zeitpunkt die Ladesteuerung eingreifen muss. Um dies zu entscheiden, ist es notwendig, die Strangströme und die Ladeprofile zu berechnen. Mit den Ladeprofilen und den Haushaltslasten können die Strangströme berechnet und die Temperaturentwicklung abgeschätzt werden. Danach muss entschieden werden, ob und wie die Reduktion der Ladeleistung der einzelnen E-Taxis erfolgt. Nach der Reduktion werden die Strangströme erneut berechnet und die Leitertemperatur abgeschätzt. Dies geschieht solange, bis sich die abgeschätzte Temperatur des Erdkabels unter der thermischen Grenztemperatur befindet.

Es wird die Möglichkeit einer gleichmäßigen Reduktion aller E-Taxis sowie einer SOC-abhängigen Reduktion der E-Taxis untersucht.

In Abbildung 4.1 ist ein Flussdiagramm zur Visualisierung des Programmablaufs der Ladesteuerung zu sehen.

4.1 Abschätzung der Temperaturentwicklung

Um eine Überschreitung der thermischen Grenztemperatur zu vermeiden, muss die Temperaturentwicklung anhand der momentanen Belastung sowie der momentanen Leitertemperatur abgeschätzt werden. Wie bereits in Kapitel 3.5 gezeigt, hängt der Temperatursprung pro Zeitschritt infolge eines Lastsprungs nur von der Höhe des Lastsprungs ab.

Um die Temperaturentwicklung abzuschätzen, wird in jedem Zeitschritt die stationäre Endtemperatur berechnet. Es wird also berechnet, welche Temperatur sich einstellen würde, wenn ab dem betrachteten Zeitschritt die Last konstant gehalten würde. Zur Berechnung wird Gleichung 3.15 auf folgende Form gebracht.

$$\vartheta_{L_stat} = \vartheta_U + \sum T \cdot (n \cdot R'_{wr} \cdot I_z^2 + P'_{diel}) \quad (4.1)$$

Wobei der Betriebsstrom I_z als Mittelwert von I_a , I_b und I_c eingesetzt wird. Da die stationäre Endtemperatur nur für die Abschätzung benötigt wird, ist dieser Schritt zulässig

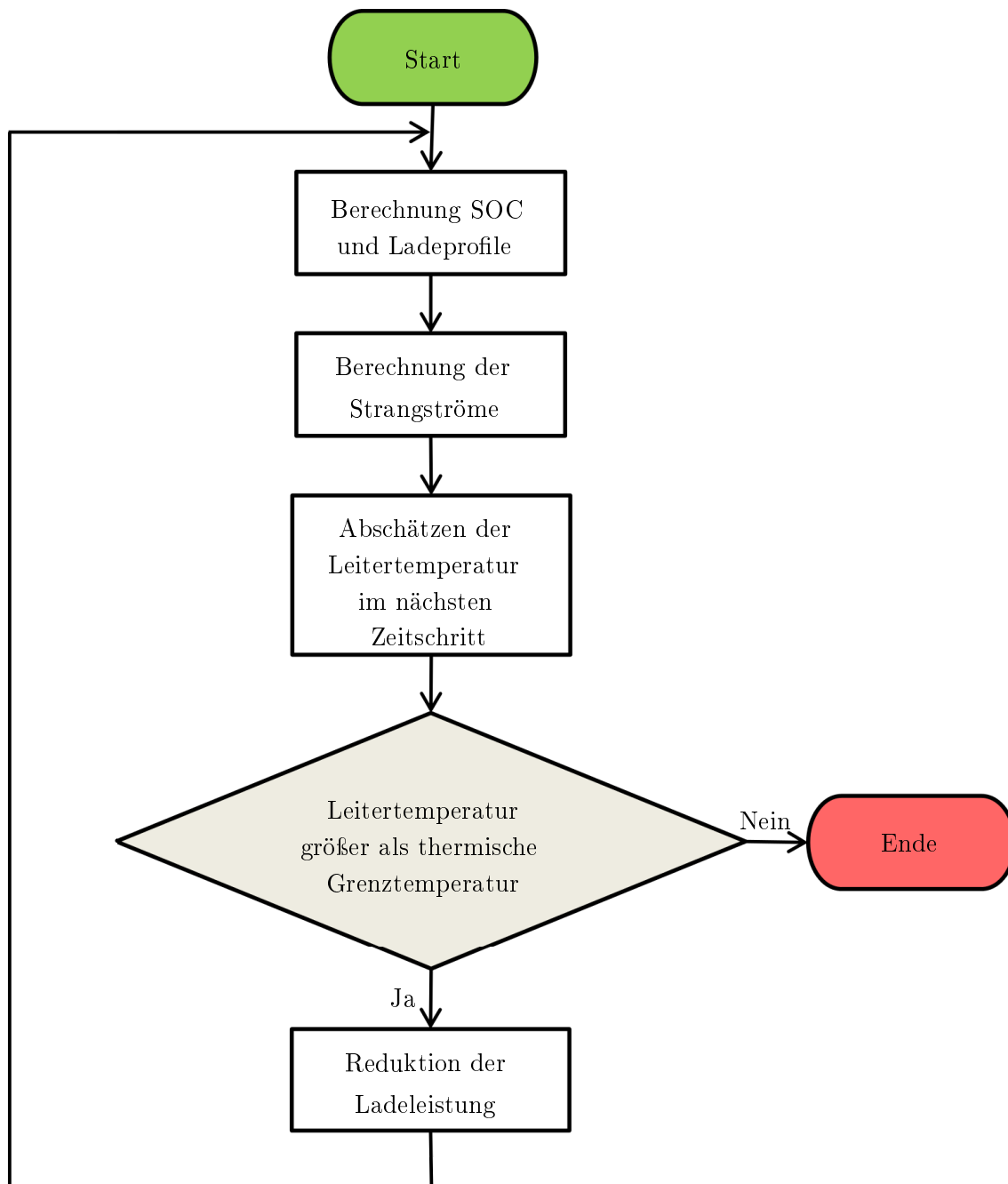


Abbildung 4.1: Flussdiagramm der Ladesteuerung für einen Zeitschritt

und der Fehler kann vernachlässigt werden. Die stationäre Endtemperatur ist ein Maß für die aktuelle Belastung und darf (kurzzeitig) über der thermischen Grenztemperatur liegen. Mit anderen Worten sind kurzzeitige Belastungen, die größer als die Nennbelastung sind, möglich, solange die Leitertemperatur unterhalb der maximal zulässigen Betriebstemperatur bleibt.

Wie bereits erwähnt, ist der Zeitpunkt ab wann die Ladesteuerung eingreift ein entscheidender Parameter. Zum einen besteht die Möglichkeit den Temperaturverlauf einige Minuten in die Zukunft zu schätzen. Dies hat den Vorteil, dass wenn nötig, frühzeitig die Ladeleistung der E-Taxis reduziert werden kann und man sich somit langsam der thermischen Grenztemperatur annähert. Der Nachteil ist, dass die Haushaltslast nicht wie für die Abschätzung angenommen, über mehrere Zeitschritte konstant bleibt, sondern sich in jedem Zeitschritt ändert. Außerdem wird durch die frühzeitige Reduktion der Ladeleistung eine zum Teil unnötige Verminderung des SOC vorgenommen, die sich wiederum negativ auf die Erfüllbarkeit der Wege auswirken kann.

Aufgrund dessen wurde in dieser Arbeit die Temperaturentwicklung nur für den nächsten Zeitschritt (entspricht 1 Minute) geschätzt. Wie in Kapitel 3.5 bereits angeführt, erhöht sich die Temperatur um ca. 5 % der Temperaturdifferenz zwischen der aktuellen Leitertemperatur und der stationären Endtemperatur.

$$\vartheta_{L_1Min} = \vartheta_L + 0,05 \cdot (\vartheta_{L_stat} - \vartheta_L) \quad (4.2)$$

Befindet sich der berechnete Temperaturwert des nächsten Zeitschritts ϑ_{L_1Min} über der thermischen Grenztemperatur, wird die Ladesteuerung aktiv. Dies hat den Vorteil, dass die Ladung der E-Taxis solange als möglich ohne Beeinflussung stattfindet. Erst wenn innerhalb der nächsten Minute die maximal zulässige Betriebstemperatur überschritten wird, greift die Ladesteuerung ein und reduziert die Ladeleistung der E-Taxis.

4.2 Berechnung der Ladeprofile und des SOC

Die Temperatur des Erdkabels hängt zu einem erheblichen Teil von den Ladeprofilen der TSP-Cluster ab. Die Ladeprofile sind wiederum abhängig von der Batteriegröße, dem Ladezustand der Batterie (SOC) und der verwendeten Ladeleistung. In dieser Arbeit werden Batteriegrößen ($E_{Batterie}$) von 24 kWh und 48 kWh berücksichtigt, wobei die momentan am Markt erhältlichen batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge eher im Bereich der 24 kWh angesiedelt sind (z.B. Nissan Leaf [7]). Die Ladeleistung wird nicht variiert und beträgt 50 kW.

Für die Berechnung des SOC wird der Verbrauch der E-Taxis während der Fahrt benötigt. Diese Daten wurden, wie im Kapitel 2.1 erwähnt, aus dem Projekt ZENEM übernommen.

Da der Verlauf des Verbrauchs zwischen den Standzeiten an den Taxistandplätzen nicht von Interesse ist, wird der gesamte Verbrauch einer Fahrt beim Ankommen am Taxistandplatz abgezogen. Dies hat einen SOC Verlauf zur Folge, der während der Fahrt konstant bleibt und somit nicht der Realität entspricht. Für die Ladesteuerung sind nur die SOC Werte während den Standzeiten interessant. Der genaue SOC Verlauf während der Fahrt kann ohnehin nicht exakt wiedergegeben werden, da die Verbrauchswerte der Taxis nur für die gesamte Fahrt vorliegen und man nicht davon ausgehen kann, dass der Verbrauch während der gesamten Fahrt konstant ist. Als Beispiel wird beim Anfahren eines Fahrzeugs mehr Energie benötigt, als beim Warten an einer roten Ampel.

Ladecharakteristik einer Lithium-Ionen Batterie

Um den SOC berechnen zu können, muss die Ladecharakteristik der Batterie bekannt sein. Zur Bestimmung der Ladecharakteristik, werden die Kennwerte der Lithium-Ionen-Zelle benötigt. Die Ladeschlussspannung U_{Ls} ist die maximale Spannung, auf die eine Li-Ionen Zelle geladen werden darf. Weiters werden SOC Grenzen SOC_{min} und SOC_{max} eingeführt, um eine Tiefenentladung sowie eine zu hohe Ladung im Modell zu verhindern.

$$\begin{aligned} U_N &= 3,6 \text{ V} \\ U_{Ls} &= 4,2 \text{ V} \\ SOC_{min} &= 5 \% \\ SOC_{max} &= 95 \% \end{aligned} \tag{4.3}$$

Die Ladung der Li-Ionen Batterie erfolgt über das I-Ua Verfahren. Dieses Verfahren setzt sich aus zwei Phasen zusammen, welche durch den Ladeumschaltzeitpunkt s voneinander getrennt sind. In der ersten Phase wird solange mit konstantem Strom geladen (I-Phase), bis die Zellspannung die Ladeschlussspannung erreicht. Da der Zellspannungsanstieg jedoch nicht sehr groß ist kann man vereinfacht annehmen, dass in dieser Phase mit konstanter Leistung $P(t) = P_{Lade}$ geladen wird. Nach Erreichen des Umschaltzeitpunkts s wird die Ladespannung auf die Ladeschlussspannung begrenzt (Ua-Phase) und der Ladestrom fällt mit zunehmender Ladedauer exponentiell ab. Aufgrund der konstanten Ladespannung fällt auch die Leistung in dieser Phase exponentiell ab. Beim Erreichen des Ladeabschaltstroms I_{Ls} wird die Ladung beendet, um eine Überladung der Batterie zu verhindern. Die Gleichungen für I_{Ls} und s wurden aus dem Projekt ZENEM übernommen. [11]

$$I_{Ls} = P_{Lade} \cdot (0,005806) + 0,009677 \quad (4.4)$$

$$s = P_{Lade} \cdot (-0,007527) + 0,826344 \quad (4.5)$$

In der Phase mit konstanter Spannung lässt sich die Ladeleistung der Batterie mit folgender Gleichung beschreiben.

$$P(t) = P_{Lade} \cdot e^{\frac{s-SOC(t-1)}{k_L}} \quad (4.6)$$

Der Faktor k_L wird so gewählt, dass das Erreichen des Vollladezustands ($SOC = 100\%$) mit dem Erreichen des Ladeabschaltstroms zusammenfällt. (vgl. [9])

$$k_L = \frac{100 - s}{\ln(\frac{P_L}{P_{Ls}})} \quad (4.7)$$

$$P_{Ls} = \frac{U_{Ls}}{U_N} \cdot I_{Ls} \cdot E_{Batterie} \quad (4.8)$$

Mit der Ladeleistung pro Zeitschritt lässt sich der neue SOC berechnen, wobei Δt aufgrund der Simulationsschrittweite von 1 min gleich $\frac{1}{60}$ ist. Der Wirkungsgrad des gesamten Ladeprozesses η_{Lade} wird mit 90 % angenommen.

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{P(t)}{E_{Batterie}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{Lade} \quad (4.9)$$

In Abbildung 4.2 wird der zeitliche Verlauf des SOC und der Ladeleistung bei einer 50 kW Ladung einer 24 kWh Batterie dargestellt. Aufgrund der hohen Ladeleistung benötigt die Vollladung nur 55 min, jedoch ist der Ladeumschaltzeitpunkt schon bei 45 % des SOC. Im Vergleich dazu, befindet sich der Ladeumschaltzeitpunkt bei der einphasigen Ladung (3,68 kW) bei ca. 80 % des SOC.

Um das Gesamtladeprofil eines TSP-Cluster zu erhalten, ist es notwendig, alle Ladeleistungen der E-Taxis, die sich an diesem TSP-Cluster befinden, zu summieren.

$$P_{TSP_x}(t) = \sum P(t) \quad \forall \text{ Taxi am Taxistandplatz } x \quad (4.10)$$

In Abbildung 4.3 ist das Ladeprofil eines TSP-Cluster für einen beispielhaften Tag dargestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl der betrachteten E-Taxis, kommt es zu längeren Zeitspannen (am dargestellten Tag z.B. zwischen 17 Uhr und 19 Uhr) an denen sich kein E-Taxi am TSP-Cluster befindet. Während diesen Zeitspannen wird die Leitertemperatur nur durch die Umgebungstemperatur und die Haushaltslastprofile bestimmt.

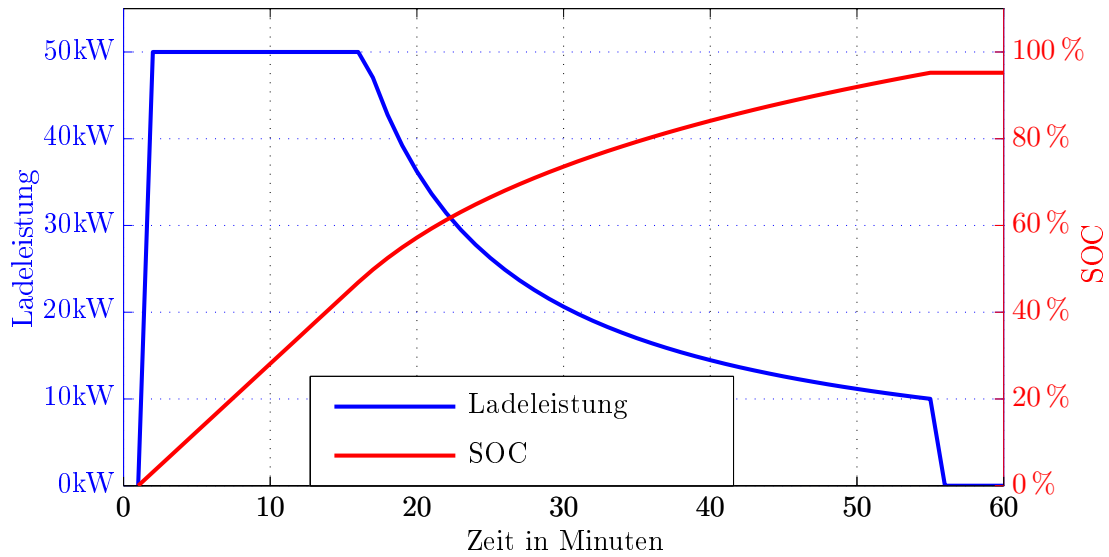


Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf des SOC und der Ladeleistung bei einer 50 kW Ladung und einer Batteriekapazität von 24 kWh.

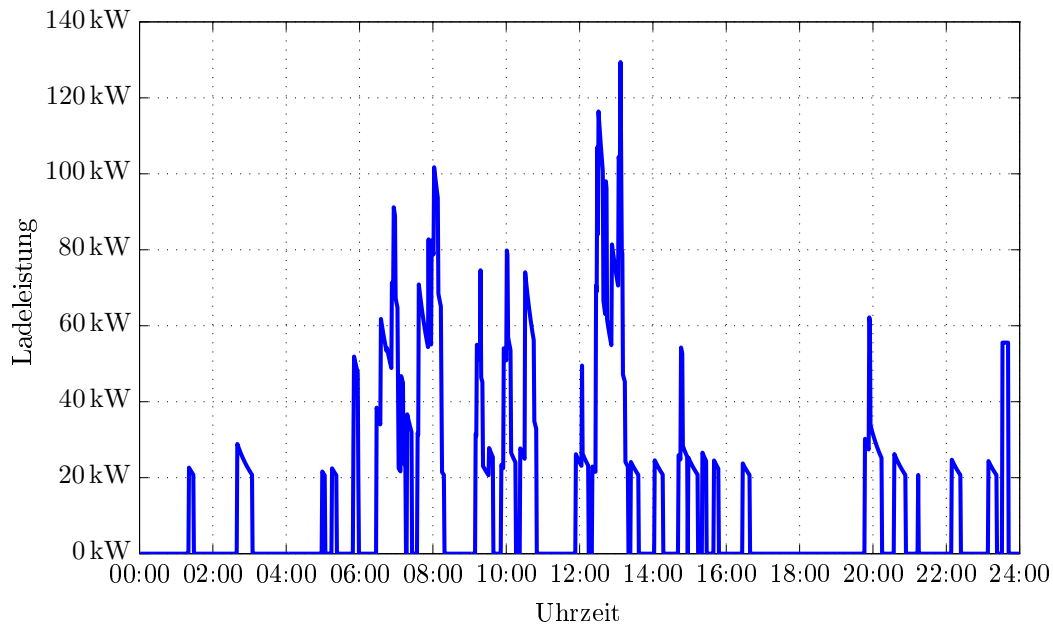


Abbildung 4.3: Ladeprofil eines TSP-Cluster an einem beispielhaften Tag.

4.3 Berechnung der Strangströme

Für die Berechnung der Leitertemperaturen benötigt das thermische Modell die Strangströme als Eingangsgröße. Daher müssen diese anhand der Haushaltslastprofile und der Ladeprofile der E-Taxistandplätze berechnet werden. Zur Berechnung der Ströme müsste eine

Lastflussberechnung mit einem Netzsimulationsprogramm wie z.B. NEPLAN durchgeführt werden, da jedoch die Spannungshaltung, wie in ZENEM gezeigt, keine Problematik darstellt (vgl. [11]) wird auf eine Lastflussberechnung (zugunsten der Simulationsdauer) verzichtet und durch eine Berechnung im MATLAB/SIMULINK Modell ersetzt.

Bei der Berechnung der Strangströme wird wie folgt vorgegangen. Mit den gemessenen Haushaltslastdaten (Knotenwerte von P und Q) werden die Summen der Wirk- und Blindleistung berechnet. Zu der Wirkleistung aufgrund der Haushaltslast wird die Ladeleistung des jeweiligen Taxistandplatzes addiert. Der Faktor 3 erklärt sich aus der 3-phasigen Ladung, es wird ein Drittel der Gesamtladeleistung pro Strang berücksichtigt.

$$P_{Summe} = \sum_{i=1}^n P_{Knoten_i} + \frac{P_{Lade}}{3} \quad (4.11)$$

$$Q_{Summe} = \sum_{i=1}^n Q_{Knoten_i} \quad (4.12)$$

Danach wird mit der Summenscheinleistung der Strangstrom berechnet.

$$S_{Summe} = \sqrt{P_{Summe}^2 + Q_{Summe}^2} \quad (4.13)$$

$$I_{Strang} = \frac{S_{Summe}}{U_{Nenn_Strang}} \quad (4.14)$$

Der Strom durch den PEN-Leiter folgt aufgrund der unsymmetrischen Belastung durch die Haushalte mit

$$I_{PEN} = \left| \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{I_a}{\sqrt{3}} + \underline{a}^2 \cdot \frac{I_b}{\sqrt{3}} + \underline{a} \cdot \frac{I_c}{\sqrt{3}} \right) \right| \quad (4.15)$$

wobei es sich bei $\underline{a}$ um den Drehoperator handelt.

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.16)$$

Die Berechnung der Strangströme wird für alle TSP-Cluster, die eine Ladeinfrastruktur besitzen, durchgeführt.

Bei dieser Art der Berechnung wird die Spannung entlang des Erdkabels als konstant angenommen. Der daraus resultierende Fehler ist jedoch so klein, dass er vernachlässigt werden kann, weil er sich nur minimal auf die Leitertemperatur auswirkt.

4.4 Ladesteuerungsmechanismen

Besteht die Gefahr einer Überschreitung der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Kabels, muss es zu einer Reduktion der Ladeleistung der einzelnen E-Taxis kommen. Betrachtet werden hier alle 20 TSP-Cluster. Aufgrund der bereits beschriebenen Ladecharakteristik ist die Ladeleistung bei E-Taxis mit niedrigem SOC (Konstantstromphase) größer. Somit steigt während der I-Phase der SOC auch schneller als in der Ua-Phase (siehe 4.2) an.

In dieser Arbeit werden zwei Varianten einer Ladesteuerung betrachtet. Bei der ersten Variante wird die Ladeleistung aller, gleichzeitig an einem TSP-Cluster, ladender E-Taxis mit einem konstanten Faktor multipliziert. Bei der zweiten Variante erfolgt die Reduktion der Ladeleistung auf Basis des SOC. E-Taxis mit geringem SOC werden bevorzugt geladen.

4.4.1 Variante 1: Gleichmäßige Reduktion der Ladeleistung

Wie bereits erwähnt, ist die Ladeleistung bei E-Taxis mit einem SOC kleiner als der Ladeumschaltzeitpunkt konstant, und fällt danach exponentiell ab. Dieses exponentielle Abklingen „hilft“ der Leitertemperatur des Erdkabels, da es mit voranschreitender Zeitdauer automatisch zu einer Reduktion der Ladeleistung kommt. Sollte dieser Effekt jedoch nicht ausreichen, wäre die einfachste Variante, die Ladeleistung aller E-Taxis am betrachteten TSP-Cluster mit einem konstanten Faktor zu multiplizieren. Würde man diesen Faktor unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig ladenden E-Taxis ansetzen, würde die Reduktion der Ladeleistung eine Abhängigkeit zu der Anzahl der E-Taxis besitzen. Als Beispiel sei ein TSP-Cluster mit drei und ein TSP-Cluster mit sechs gleichzeitig ladenden E-Taxis angenommen. Ist der Reduktionsfaktor unabhängig von der Anzahl und die Ladesteuerung muss eingreifen, wird in einem Fall dreimal die Ladeleistung und im anderen sechsmal die Ladeleistung mit dem Reduktionsfaktor reduziert. Nimmt man an, dass alle E-Taxis den gleichen SOC haben, ist die Reduktion in dem einen Fall doppelt so groß als im anderen. Deshalb wurde der Faktor noch durch die Anzahl der gleichzeitig ladenden E-Taxis am betrachteten TSP-Cluster dividiert. Er wurde so gewählt, dass die Reduktion maximal 10 % von P_{Lade} beträgt.

$$P(t)_{reduziert} = P(t) \cdot \frac{k_{red}}{Anz_{E-Taxi}} \quad (4.17)$$

Wenn also die Ladeleistungen aller E-Taxis an einem TSP-Cluster mit einem konstanten Reduktionsfaktor (z.B.: 10 %) multipliziert wird, ist die Leistungsreduktion bei den E-Taxis mit niedrigem SOC höher. Dies hat zur Folge, dass die Fahrzeuge, die ohnehin schon einen niedrigen Batterieladezustand haben, mehr zur Reduktion beitragen, als die Fahrzeuge mit höherem Batterieladezustand. Desto niedriger der Ladezustand der Batterie ist, desto mehr

Wegstrecken existieren, die mit der in der Batterie gespeicherten Energie nicht erfüllbar sind. Um die Erfüllbarkeit der Wegstrecken zu maximieren, wäre eine Ladestrategie die E-Taxis mit niedrigen SOC bevorzugt sinnvoller.

4.4.2 Variante 2: SOC - abhängige Reduktion der Ladeleistung

Wie im vorigen Kapitel erklärt, wirkt sich eine SOC abhängige Ladestrategie besser auf die Anzahl der erfüllbaren Wegstrecken aus. Vor allem bei niedrigem SOC kann es schon bei kurzen Fahrten dazu kommen, dass die gespeicherte Energie in der Batterie nicht ausreicht und das E-Taxi während der Fahrt „liegen“ bleibt. Das heißt je höher der SOC, desto mehr Fahrten, aus dem Pool aller mit einer vollen Batterie erreichbaren Fahrten, können erreicht werden.

Deshalb werden in der **zweiten Ladestrategie die E-Taxis mit niedrigem SOC bevorzugt**. Dazu wird eine Reduktionsfunktion $f(SOC)$ eingeführt. Es handelt sich dabei um eine Geradenfunktion mit negativer Steigung.

$$f(SOC) = \begin{cases} 1 & \text{für } k \cdot SOC + d > 1 \\ k \cdot SOC + d & \text{sonst} \\ 0 & \text{für } k \cdot SOC + d < 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Die reduzierte Ladeleistung berechnet sich mit folgender Gleichung.

$$P(t)_{\text{reduziert}} = P(t) \cdot f(SOC) \quad (4.19)$$

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, wird die Reduktion der Ladeleistung in einer Schleife abgearbeitet. Es wird die Ladeleistung pro Schleifendurchlauf um einen gewissen Betrag reduziert und solange die abgeschätzte Leitertemperatur über der thermischen Grenztemperatur ist, wird diese Schleife durchlaufen. Nach jedem Schleifendurchlauf muss die Reduktionsfunktion angepasst werden, damit die Ladeleistung mehrerer Fahrzeuge reduziert wird. Dies geschieht durch eine Parallelverschiebung der Funktion nach unten. Somit schneidet diese den Wert 1 bei einem niedrigeren SOC und es werden mehr Fahrzeuge in die Reduktion miteinbezogen.

In Abbildung 4.4 ist die Funktion für vier verschiedene Schleifendurchläufe dargestellt. Im ersten Schleifendurchlauf startet die Reduktion bei einem SOC von 70 % und fällt dann innerhalb von 30 % auf den Wert 0 ab (blaue Kennlinie). Somit wird die Ladeleistung im ersten Schritt nur für die E-Taxis reduziert, die bereits einen sehr hohen SOC haben. Sollte die Leistungseinsparung nicht ausreichen, wird die Reduktionsfunktion parallel nach unten verschoben. Dies geschieht durch eine Verkleinerung von d in Gleichung 4.18 und

ist solange möglich bis d den Wert 0 erreicht hat und kein E-Taxi (unabhängig vom SOC) mehr lädt. Die vier verschiedenen Funktionen in Abbildung 4.4 sind als Beispiel gedacht und es ist zu erkennen, dass mit steigender Anzahl der Schleifendurchläufe die gesamte Reduktionsfunktion nach links wandert. Im Modell wird die Reduktionsfunktion natürlich in kleineren Schritten nach unten verschoben.

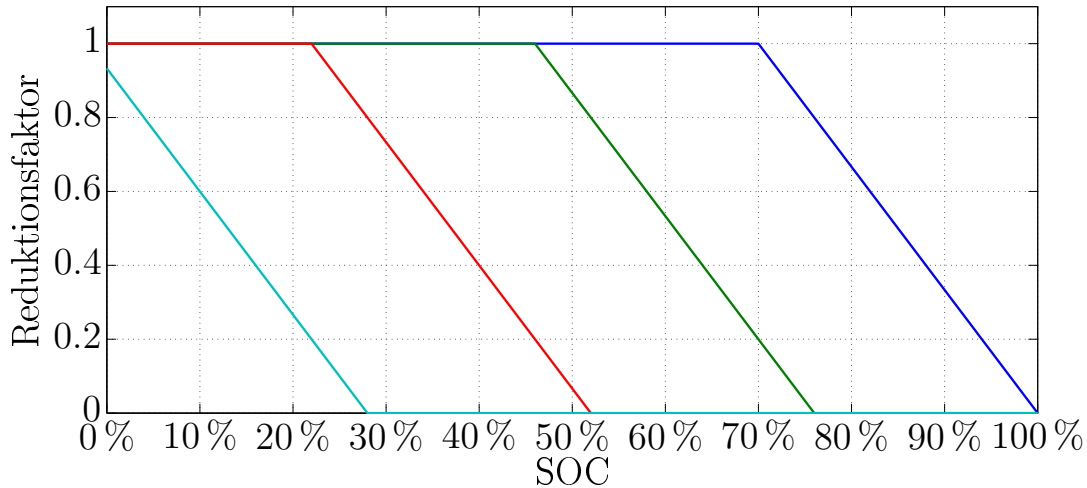


Abbildung 4.4: SOC - abhängige Reduktionsfunktion für 4 verschiedene Schleifendurchläufe.

Bestimmung der Parameter der Reduktionsfunktion

Bei der Wahl der Parameter k und d der Reduktionsfunktion muss ein Mittelmaß zwischen der Bevorzugung von Fahrzeugen mit kleinem SOC und der Reduktion der Ladeleistung der restlichen E-Taxis gefunden werden.

Dazu wurde eine Simulation unter Extrembedingungen durchgeführt. Damit die Ladesteuerung oft eingreifen muss, wurde bei dieser Simulation die 3-fache Haushaltslast angenommen. Diese Annahme ist natürlich nicht sehr realistisch und entspricht auch keinem der betrachteten Szenarien in Kapitel 5, jedoch können hier die Auswirkungen der unterschiedlichen Reduktionsfunktionen am besten bewertet werden.

Die untersuchten Parametervariationen sind in Tabelle 4.1 ersichtlich.

Tabelle 4.1: Parametervariationen zur Bestimmung einer geeigneten Reduktionsfunktion

Parameter	Konfiguration 1	Konfiguration 2	Konfiguration 3	Konfiguration 4
k	-1,667	-3,333	-5	-10
d	2,167	3,333	5	10

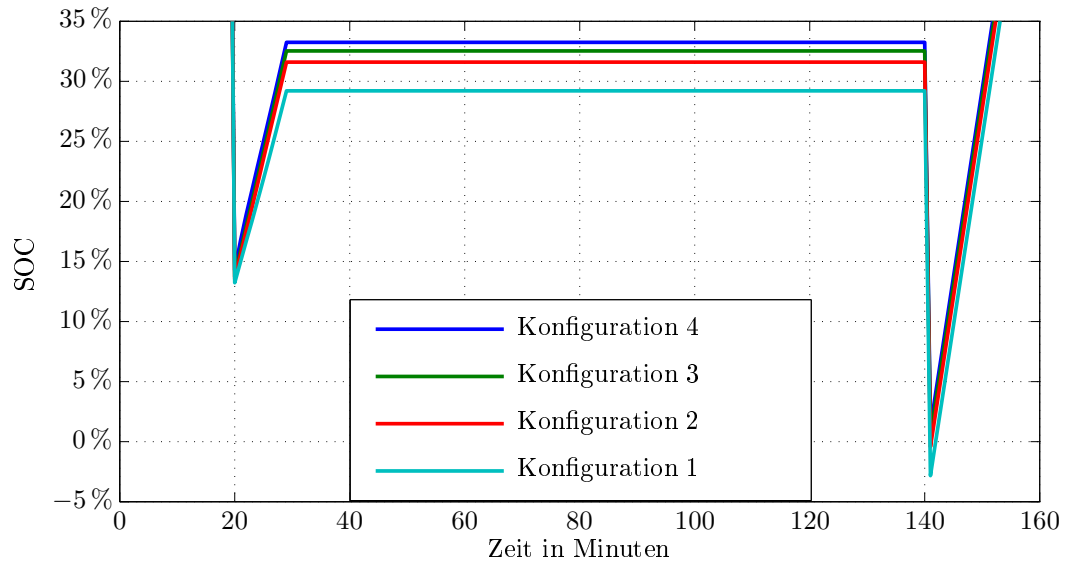
Dabei wurde die Steigung k variiert und der Offset d durch die Geradengleichung bestimmt. Bei Konfiguration 1 wird d so bestimmt, dass die Reduktionsfunktion bei einem SOC von 100 % den Wert 0,5 annimmt. Bei den Konfigurationen 2 bis 4 soll die Reduktionsfunktion bei einem SOC von 100 % gleich 0 sein.

Die unterschiedlichen Steigungen bewirken eine unterschiedliche Bevorzugung der E-Taxis mit niedrigem SOC. Abbildung 4.5 zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Parameterkonfigurationen anhand zweier ausgewählter E-Taxis. Die Ladeleistung beider Fahrzeuge wird während der gleichen Lastspitze reduziert. In diesem Zeitraum ist eine große Reduktion der Ladeleistung erforderlich, um unter der thermischen Grenztemperatur zu bleiben und somit wird auch die Ladeleistung der E-Taxis mit niedrigem SOC reduziert.

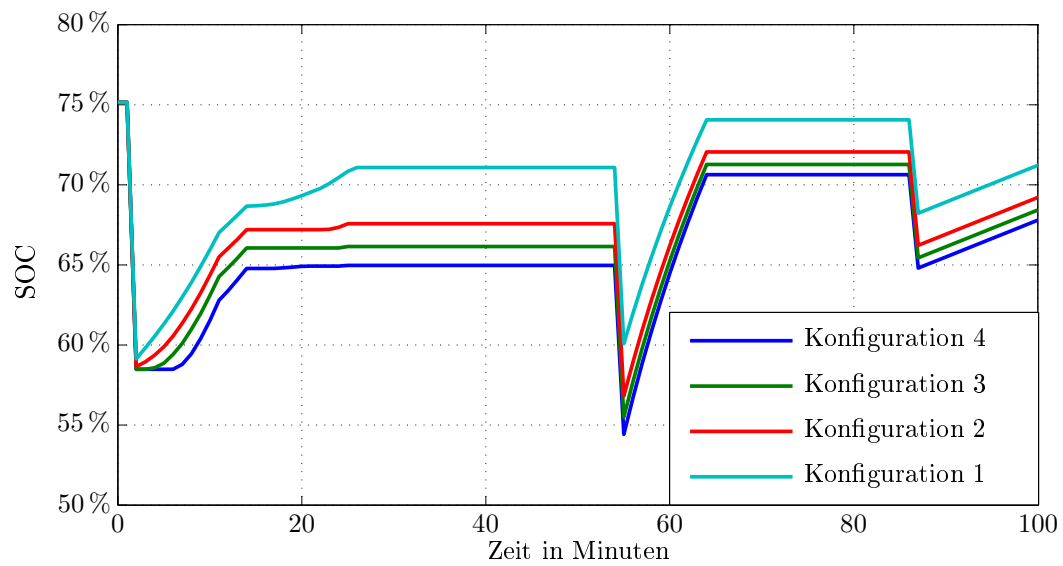
In Abbildung 4.5 (a) werden die vier Konfigurationen bei einem Fahrzeug mit niedrigem SOC verglichen. Je steiler die Steigung k gewählt wird, desto mehr wird dieses Fahrzeug bei der Ladung bevorzugt. Aufgrund des sehr niedrigen SOC von 14 % beim Start des Ladevorgangs wird die Ladeleistung in allen vier Konfigurationen leicht reduziert und der Unterschied ist nur schwer erkennbar. Wählt man bei der Ladung des E-Taxis die Parameterkonfiguration 4 für die Reduktionsfunktion, kommt es zu einer Verbesserung des minimalen SOC von vier Prozentpunkten gegenüber Konfiguration 1. Vergleicht man jedoch die vierte mit der zweiten Konfiguration kommt es nur zu einer Verbesserung von 1,6 Prozentpunkten. Daraus lässt sich schließen, dass sich mit zunehmender Steilheit der Steigung der minimale SOC verbessert, jedoch wird diese Verbesserung immer kleiner.

In Abbildung 4.5 (b) werden die vier Parameterkonfigurationen anhand eines E-Taxis mit mittlerem SOC verglichen. Auffällig ist, dass nach der Ankunft am Taxistandplatz in Konfiguration 3 und 4 nicht sofort mit der Ladung begonnen wird. Ab Minute 14 wird die Ladung des Fahrzeugs in allen Parameterkonfigurationen ausgesetzt, wobei die Aussetzdauer in Konfiguration 1 nur zwei Minuten lang dauert, während in Konfiguration 2 neun Minuten lang nicht geladen wird. In der Abbildung ist das Eingreifen der Ladesteuerung sehr gut zu erkennen. Vergleicht man den ersten Ladevorgang mit der Ladung nach ca. einer Stunde, so ist eine massive Reduktion der Ladeleistung in diesem Zeitraum zu erkennen. Dies führt zu dem in der Abbildung ersichtlichen abgeflachten SOC Verlauf. Der SOC ist bei der Ladung mit der ersten Parameterkonfiguration beim Verlassen des Taxistandplatzes um 6,1 Prozentpunkte höher als bei der Ladung mit der Vierten. Der Unterschied zwischen Konfiguration 2 und 4 beträgt 2,6 Prozentpunkte.

Aufgrund dieser Erhebungen wird die **Parameterkonfiguration 2** für die weiteren Simulationen gewählt. Der Grund dafür ist, dass es bei steigender Steilheit der Reduktionsfunktion, nur mehr zu geringen Verbesserungen bei kleinen SOC Werten kommt. Es wird somit ein Mittelmaß zwischen der Verbesserung bei kleinem SOC, und der Verschlechterung bei mittleren SOC gewählt.



(a)



(b)

Abbildung 4.5: Vergleich der unterschiedlichen Parameterkonfigurationen anhand eines E-Taxis mit niedrigem SOC (a) und einem E-Taxi mit mittleren SOC (b).

4.5 Umsetzung des Modells in MATLAB/SIMULINK

Da das verwendete thermische Modell in MATLAB/SIMULINK umgesetzt wurde, wird auch das Gesamtmodell in MATLAB/SIMULINK implementiert. Wie aus Abbildung 4.6 ersichtlich ist, wurden die Ein- und Ausgangsgrößen des Gesamtmodells wie folgt definiert.

Eingangsgrößen:

- Gemessene Haushaltslastprofile
- Matrix Taxi_Standorte
- Matrix Taxi_Energieverbrauch

Ausgangsgrößen:

- Leitertemperatur aller TSP-Cluster
- Ladeprofile aller TSP-Cluster
- SOC aller E-Taxis

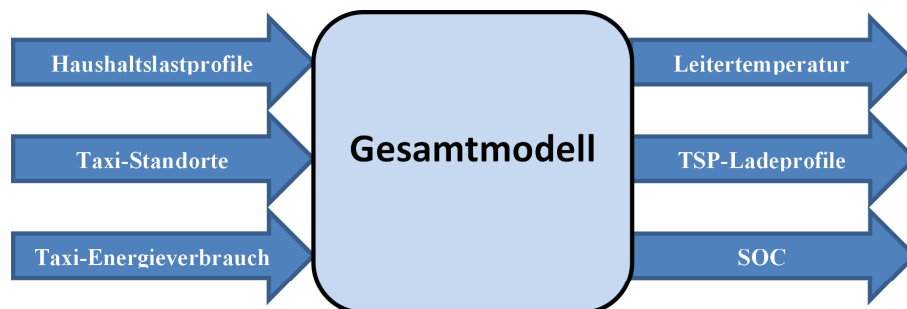


Abbildung 4.6: Ein- und Ausgangsgrößen des Gesamtmodells.

Das Gesamtmodell gliedert sich in zwei Teilbereiche:

- Die thermische Modellierung aller 20 TSP-Cluster mit einer Ladeinfrastruktur.
- Ein Ladesteuerungsblock, in dem der SOC sowie die Ladeprofile berechnet werden.

Bei der thermischen Modellierung der einzelnen Erdkabel an den 20 betrachteten TSP-Cluster wird das angepasste thermische Modell, welches in Kapitel 3.4 beschrieben wurde, verwendet. Dazu werden 20 separate thermische Modelle in das Gesamtmodell eingefügt, wobei alle mit den gleichen Parametern konfiguriert werden (siehe Anhang A). Jedes thermische Modell simuliert die Leitertemperatur anhand der zuvor berechneten Strangströme. Die Ladesteuerung an sich wird über eine „*Embedded MATLAB™ Function*“ in SIMULINK eingebunden. Bei „*Embedded MATLAB™*“ handelt es sich um eine Teilmenge der MATLAB

Sprache. Nähere Informationen dazu sind im Benutzerhandbuch zu finden (vgl. [3]).

In diesem Simulationsblock wird die Ladesteuerung anhand des in Abbildung 4.1 dargestellten Flussdiagramms abgearbeitet. Zunächst erfolgt für jeden der 20 TSP-Cluster die Berechnung der Ladeprofile. Mit diesen Daten werden die Strangströme für alle Taxistandplätze berechnet.

Die erste Berechnung der Strangströme dient dazu, die Leitertemperatur im nächsten Zeitschritt abzuschätzen. Die Reduktion der Ladeleistung erfolgt für jeden der 20 Taxistandplätze separat und wird solange wiederholt, bis sich die Leitertemperatur im nächsten Zeitschritt unter der thermischen Grenztemperatur befindet. Somit wird dieser Simulationsblock in Abhängigkeit der Leitertemperatur pro Zeitschritt unterschiedlich oft durchlaufen.

In Abbildung 4.7 ist ein Übersichtsbild des Aufbaus des Modells dargestellt, aus dem man die Ein- und Ausgangsgrößen der beiden Teilbereiche erkennen kann.

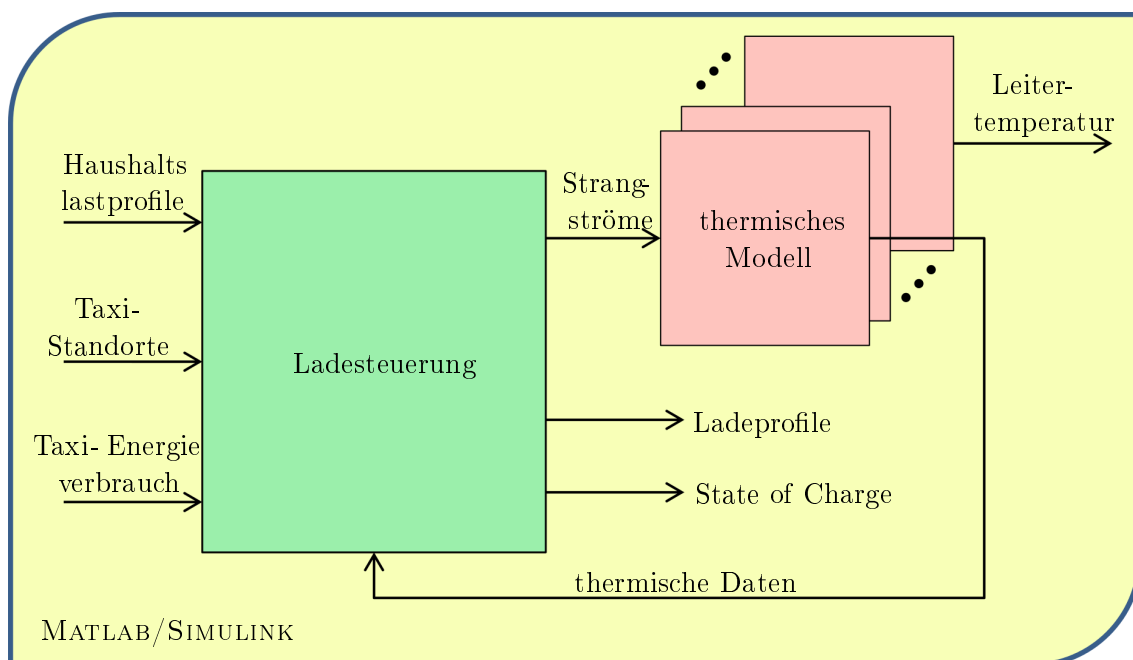


Abbildung 4.7: Übersichtsbild des Gesamtmodells

Die Eingangsgrößen der Ladesteuerung setzen sich aus den gemessenen Haushaltslastprofilen, den beiden Matrizen Taxi_Standorte und Taxi_Energieverbrauch sowie den thermischen Daten zusammen.

Im Parameter „thermische Daten“ sind die Ausgangsgrößen aller thermischen Modelle zusammengefasst, der pro TSP-Cluster folgende Größen beinhaltet:

- Umgebungstemperatur

- Summe der Wärmewiderstände aller Schichten
- Wirkwiderstandsbelag
- Dielektrische Verluste des Erdkabels
- Aktuelle Leitertemperatur

Die beiden Matrizen `Taxi_Standorte` und `Taxi_Energieverbrauch` beinhalten die benötigten Informationen über die einzelnen E-Taxis und werden in Kapitel 2.1 näher beschrieben.

Die Ausgangsgrößen der Ladesteuerung werden durch die berechneten Strangströme pro TSP-Cluster, die Ladeprofile pro TSP-Cluster sowie dem SOC der einzelnen E-Taxis gebildet.

5 Ergebnisse

Zu Beginn dieses Kapitels werden die einzelnen Szenarien beschrieben. Danach werden die Ergebnisse der Simulation vorgestellt und die Auswirkungen der Ladesteuerung auf die Erfüllung der Wegstrecken skizziert. Die in der Simulation verwendeten Werte der einzelnen Parameter sind dem Anhang A zu entnehmen.

Es werden für alle Szenarien die Auswirkungen der Ladesteuerung gezeigt sowie die Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Ladesteuerungsmechanismen herausgearbeitet.

5.1 Definition der Szenarien

Es werden vier unterschiedliche Szenarien betrachtet und für jedes Szenario werden die beiden Ladesteuerungsvarianten miteinander verglichen.

Szenario A - Basisszenario

Das Basisszenario in dieser Arbeit wird mit den gleichen Parametern wie das *Szenario 2* aus dem Projekt ZENEM angenommen. Das heißt, die Ladung erfolgt mit 50 kW bei einem Ladestellenausbau von 20 TSP-Cluster. Zusätzlich besteht eine Lademöglichkeit mit 3,68 kW am Standplatz *Zuhause*. Diese Parameter bleiben in allen Szenarien gleich und werden nicht variiert.

Die Batteriegröße der E-Taxis wird mit 48 kWh angesetzt und die Haushaltslasten entsprechen den gemessenen Haushaltslasten.

Szenario B

Aufgrund der Netztopologie des Wiener Niederspannungsnetzes als „Offener Ring“ (Abbildung 5.1) können im Fehlerfall zusätzliche Verbraucher über das Erdkabel versorgt werden. Dabei wird die Fehlerstelle freigeschaltet und danach der Ring geschlossen. Daher können im „Worst Case“ Fall nahezu doppelt so viele Verbraucher über das Erdkabel versorgt werden als vor der Umschaltung.

Dieser Situation wird im Szenario B mit einer erhöhten Haushaltslast Rechnung getragen. Vereinfacht wird die doppelte gemessene Haushaltslast angenommen. Die Batteriegröße bleibt bei 48 kWh.

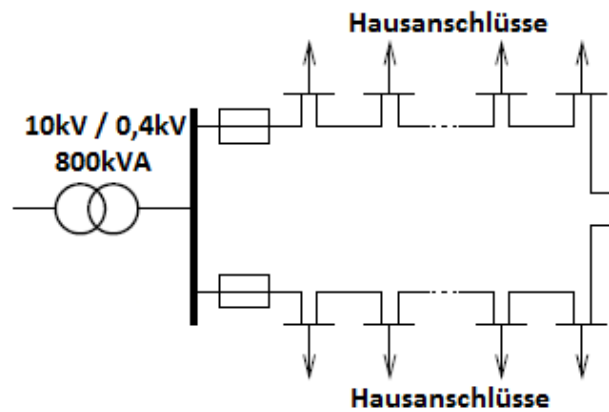


Abbildung 5.1: Skizze der Netztopologie „Offener Ring“

Szenario C

In diesem Szenario wird die Batteriegröße auf 24 kWh reduziert, da sich die Batteriekapazität der meisten momentan am Markt befindlichen Elektrofahrzeuge in dieser Größenordnung befindet. Alle anderen Parameter bleiben gleich wie in Szenario A. In ZENEM wird diese Konfiguration als *Szenario 1* bezeichnet.

Szenario D

Diesem Szenario liegen dieselben Annahmen wie in Szenario B zugrunde. Es wird somit von einer Verdoppelung der Haushaltslast ausgegangen, jedoch beträgt die Batteriekapazität 24 kWh.

5.2 Szenario A

Im Basisszenario wird die „thermisch kritischste“ Situation aus dem Projekt ZENEM betrachtet. Es existieren wenige Taxistandplätze (20) mit einer Ladeinfrastruktur und aufgrund der großen Batteriekapazität existieren viele E-Taxis die alle Wege im betrachteten Zeitraum schaffen.

5.2.1 Ungesteuertes Laden

Wird die Simulation ohne der Ladesteuerung durchgeführt, ergibt sich die Ausgangssituation für die weiteren Betrachtungen.

Ähnlich wie in den zuvor erwähnten Arbeiten kommt es zu einem Überschreiten der thermischen Grenztemperatur. Die Grenzverletzung tritt jedoch nur an einem TSP-Cluster auf. Aufgrund der in Kapitel 2.1 erklärten Unterschiede der Taxidaten kommt es auch nur zu **einer Überschreitung** der erlaubten Leitertemperatur im Erdkabel während des Betrachtungszeitraums. Wie in Abbildung 5.2 ersichtlich, wird in einer Zeitspanne von 27 Minuten die thermische Grenztemperatur von 70°C für eine PVC-Isolierung überschritten. Es wird ein Spitzenwert der Leitertemperatur von ca. 90°C erreicht. Die maximale Auslastung in diesem Zeitraum beträgt 203 %.

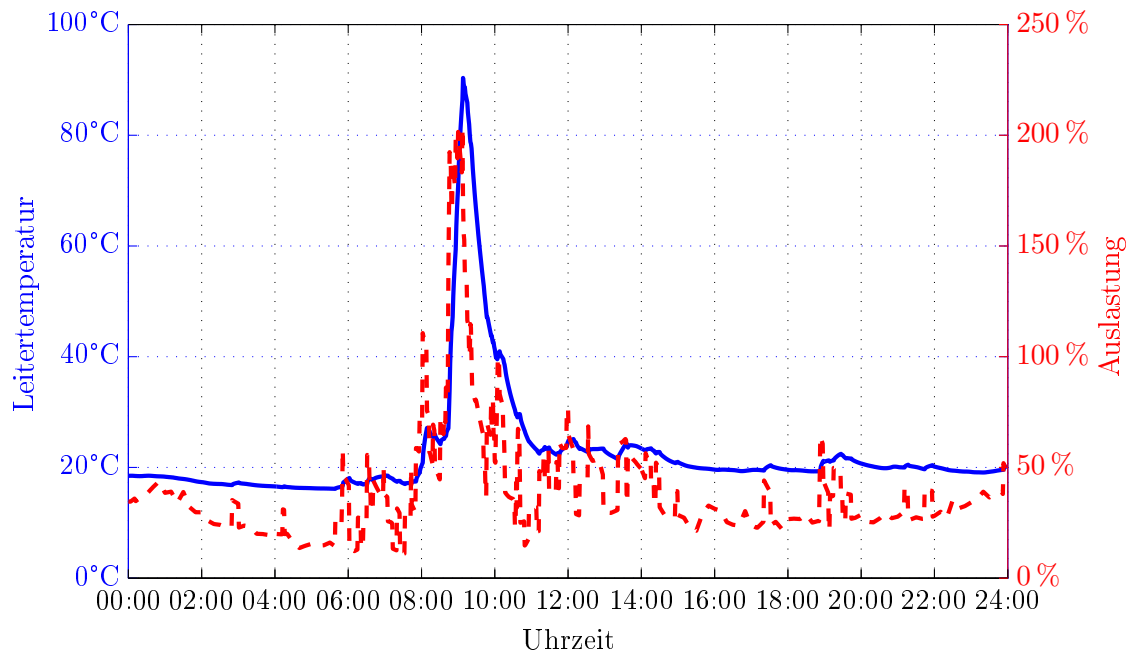


Abbildung 5.2: Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario A.

An allen anderen Taxistandplätzen kommt es durch die Zusatzbelastung zu keiner Überschreitung der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Kabels.

Während des Betrachtungszeitraums von zwei Wochen treten zwar immer wieder Auslastungsspitzen auf die größer als 100 % sind, jedoch ist die Zeitdauer der Belastung meist so gering, dass die Leitertemperatur nicht erheblich steigt. In Abbildung 5.2 ist eine solche Spitze vor der eigentlichen Überlastung um ca. acht Uhr zu sehen. Kurzzeitig steigt die Auslastung des Kabels auf ca. 110 %, die Leitertemperatur steigt jedoch nur um wenige Grad

Celsius an. Daraus lässt sich schließen, dass **Belastungsspitzen von wenigen Minuten zu keiner thermischen Überlastung des Erdkabels führen**. Dies gilt natürlich nur wenn die Auslastung des Strangs durch die Haushaltslasten eher gering ist. Aufgrund der Erkenntnisse im Projekt ZENEM ist dies durchaus plausibel. Ohne dem Einfluss der E-Taxi Ladeleistungen befanden sich dort alle Leitungsauslastungen unter 50 %.

Damit es überhaupt zu einer thermischen Überlastung kommt, müssen mehrere E-Taxis gleichzeitig über einen längeren Zeitraum am selben Taxistandplatz laden. Aufgrund der 50 kW Schnellladung sind die Elektrofahrzeuge in einer relativ kurzen Zeitdauer voll aufgeladen (siehe Abbildung 4.2). Damit die E-Taxis über einen längeren Zeitraum gleichzeitig laden, muss der SOC der Fahrzeuge relativ gering sein. Zusätzlich müssen in diesem Zeitraum immer wieder „neue“ Fahrzeuge am Standplatz ankommen, da ansonsten die Ladeleistung aufgrund der exponentiell abfallenden Ladecharakteristik abnimmt.

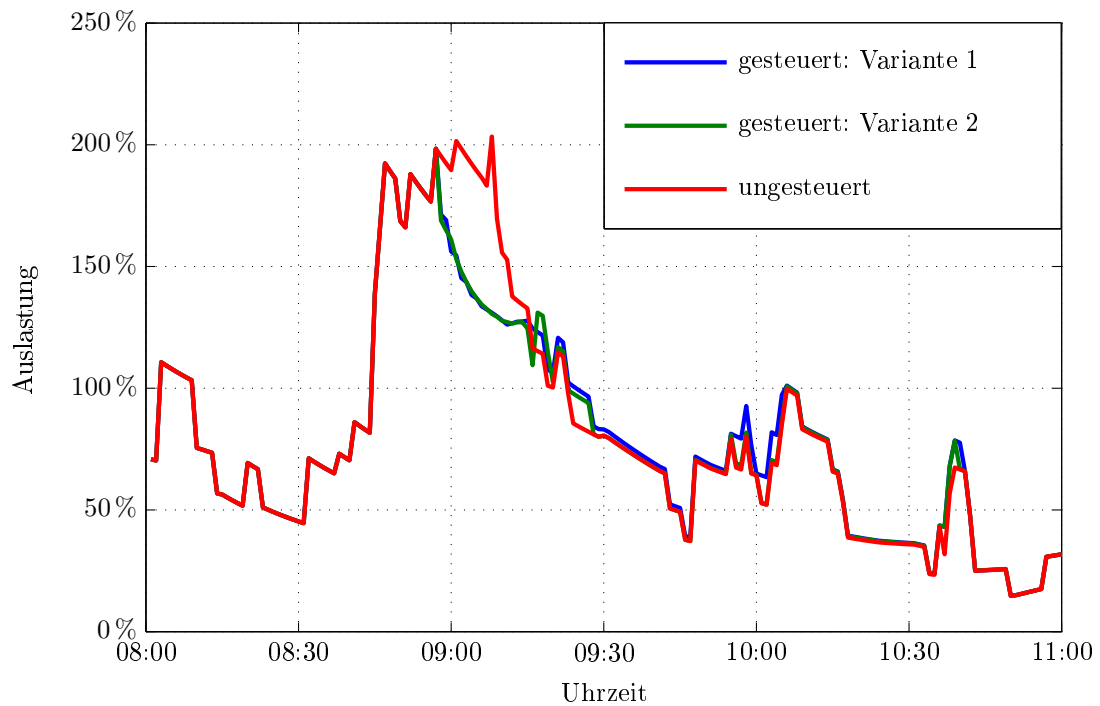


Abbildung 5.3: Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario A.

Die Überschreitung der thermischen Grenztemperatur beruht auf solch einer Situation und ist in Abbildung 5.3 (rote Kennlinie) nochmals vergrößert dargestellt. Die Auslastung bleibt über ca. 20 min auf einem sehr hohen Niveau, wobei in diesem Zeitraum die Ladeleistung aller E-Taxis an diesem TSP-Cluster zwischen 300 kW und 360 kW beträgt.

5.2.2 Gesteuertes Laden

Um das Überschreiten der thermischen Grenztemperatur zu verhindern, wird die Ladeleistung der E-Taxis mit den beiden Varianten der Ladesteuerung simuliert.

Es kommt bei beiden Varianten zu einer Reduktion der Leitertemperatur (siehe Abbildung 5.4). Der Spitzenwert der Auslastung wird nur um fünf Prozentpunkte auf 198 % reduziert. Die Zeitspanne, in der die Auslastung das Erdkabel erwärmt, wird jedoch deutlich reduziert (siehe Abbildung 5.3: blaue und grüne Kennlinie). Durch das Eingreifen der Ladesteuerung kommt es zu einer Lastverschiebung in den Bereich nach der Lastspitze. Wobei hier zu erwähnen ist, dass nicht die ganze reduzierte Ladeleistung verschoben wird. Einige Fahrzeuge laden ihre Batterie auch an anderen Taxistandplätzen.

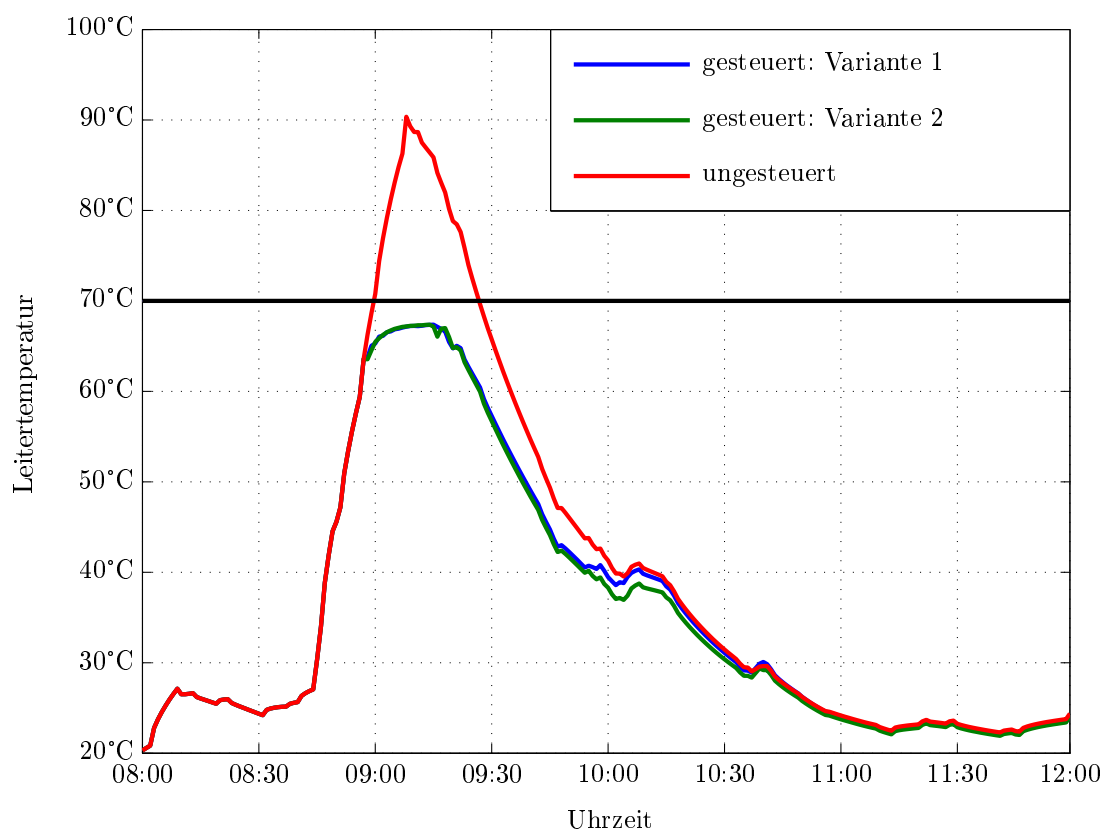


Abbildung 5.4: Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

Der Spitzenwert ist bei beiden Varianten annähernd gleich und beträgt 67,4°C. Ab dem ersten Eingreifen der Ladesteuerung unterscheidet sich der Verlauf der Leitertemperaturen

leicht. Der Verlauf von Variante 1 (Multiplikation aller Ladeleistungen mit einem konstanten Faktor) ist zwischen 09:00 Uhr und 09:30 Uhr gleichmäßiger als der Verlauf der SOC-abhängigen Reduktion (Variante 2). Dieses Verhalten lässt sich wie folgt erklären. Sobald die Ladeleistung reduziert werden muss, werden in der zweiten Ladesteuerungsvariante die Ladeleistung aller E-Taxis reduziert, deren SOC größer als 70 % ist. Befinden sich viele Fahrzeuge in diesem SOC-Bereich, kommt es im ersten Reduktionsschritt zu einer großen Leistungsreduktion. Um eine gleichmäßigere Kurve zu erhalten, müsste man die Gerade der Reduktionsfunktion weiter nach rechts verschieben. Damit würden im ersten Schritt die Ladeleistung von weniger E-Taxis reduziert.

Dies ist auch der Grund warum die Leitertemperatur in Variante 1 im Bereich um zehn Uhr größer ist als in Variante 2. Die Differenz ist jedoch sehr gering und befindet sich im einstelligen Grad Celsius Bereich. Nach einer gewissen Zeit ohne Eingreifen der Ladesteuerung stimmen die Leitertemperaturen in beiden Varianten wieder überein.

Die Reduktion wirkt sich auch auf den SOC der einzelnen E-Taxis aus. Obwohl die Ladeleistung einiger Fahrzeuge reduziert wird, **kommt es in diesem Szenario zu keinem „Liegenbleiben“ eines E-Taxis aufgrund eines zu niedrigen SOC**. Hier ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass dieses Ergebnis auf den verwendeten Mobilitätsdaten beruht. Man kann nicht automatisch davon ausgehen, dass es bei einem anderen Pool aus Taxifahrten ebenso keine Einschränkung der Mobilität gibt, da es bei gewissen E-Taxis zu einer Reduktion des Ladezustands kommt.

Ein weiterer interessanter Punkt ist der Unterschied des SOC Verlaufs der E-Taxis aufgrund verschiedener Ladesteuerungsmechanismen. In Abbildung 5.5 ist der SOC Verlauf eines beispielhaften E-Taxis gezeigt. Durch die SOC-abhängige Ladesteuerung werden die Fahrzeuge mit kleinem SOC bevorzugt. Der minimale Batterieladezustand des betrachteten E-Taxis kann um ca. zwei Prozentpunkte gegenüber Variante 1 verbessert werden. Die Differenz des SOC Verlaufs der beiden Varianten kann erst nach 13 Stunden wieder ausgeglichen werden. Dies geschieht bei einer Vollladung des Fahrzeugs am Standplatz *Zuhause*. Werden viele Fahrten hintereinander unternommen ohne die Batterie des Fahrzeugs in der Zwischenzeit voll aufzuladen, bringt eine SOC abhängige Ladestrategie eine Verbesserung des SOC bei Fahrzeugen mit niedrigen und mittleren Batterieladezustand. Erst wenn die Batterie in beiden Varianten wieder vollgeladen wird, gleicht sich der Unterschied aus.

Anhand der Abbildung ist auch der Unterschied der Ladegeschwindigkeit zwischen der 50 kW (TSP-Cluster) und der 3,68 kW Ladung (*Zuhause*) zu erkennen.

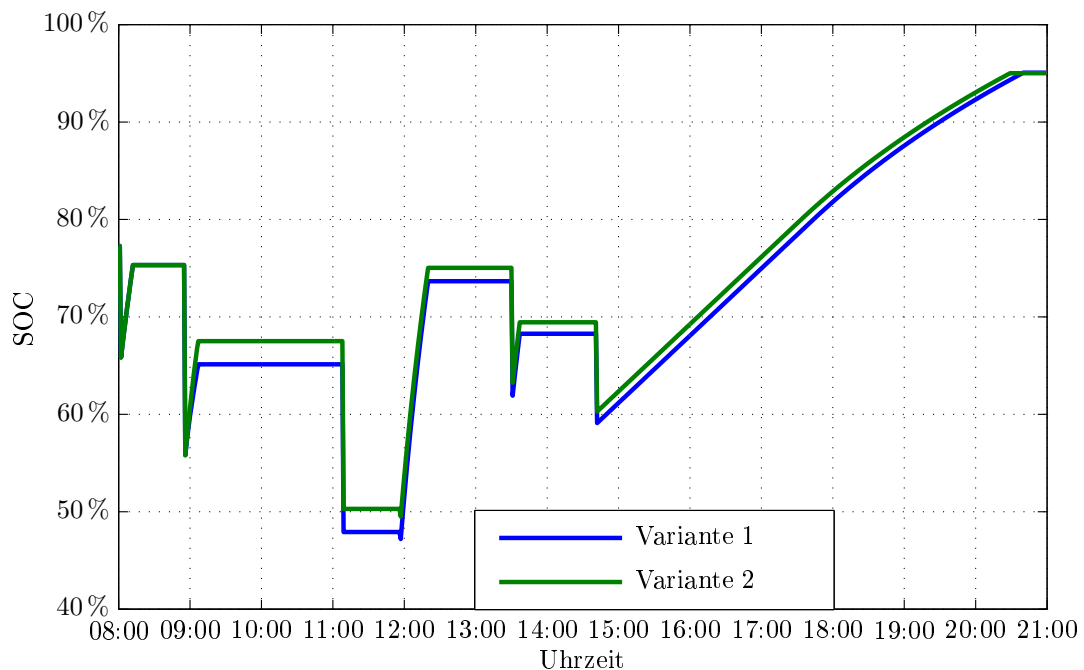


Abbildung 5.5: Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxis in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

5.3 Szenario B

Wie bereits bei der Definition der einzelnen Szenarien beschrieben, wird in diesem Szenario die Haushaltslast verdoppelt. Da sich die Batteriegröße im Vergleich zu Szenario A nicht verändert, bleibt die Anzahl der betrachteten E-Taxis gleich.

5.3.1 Ungesteuertes Laden

Durch die Erhöhung der Haushaltslast werden die Leitungen an allen TSP-Cluster mehr belastet und die durchschnittliche Leitertemperatur steigt an.

Trotz der Verdoppelung der Haushaltslastprofile, kommt es noch immer nur zu **einer Überschreitung der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Erdkabels**. Die Leitertemperatur befindet sich 45 Minuten lang über den erlaubten 70°C und erreicht einen Maximalwert von 108°C (Abbildung 5.6). Auch die Spitzenauslastung steigt auf 214 % an. Durch die größere Leitungsauslastung, aufgrund der erhöhten Haushaltslast, kommt es zu deutlich mehr kurzzeitigen Überschreitungen des Basisbemessungsstroms (Auslastungen größer als 100 %).

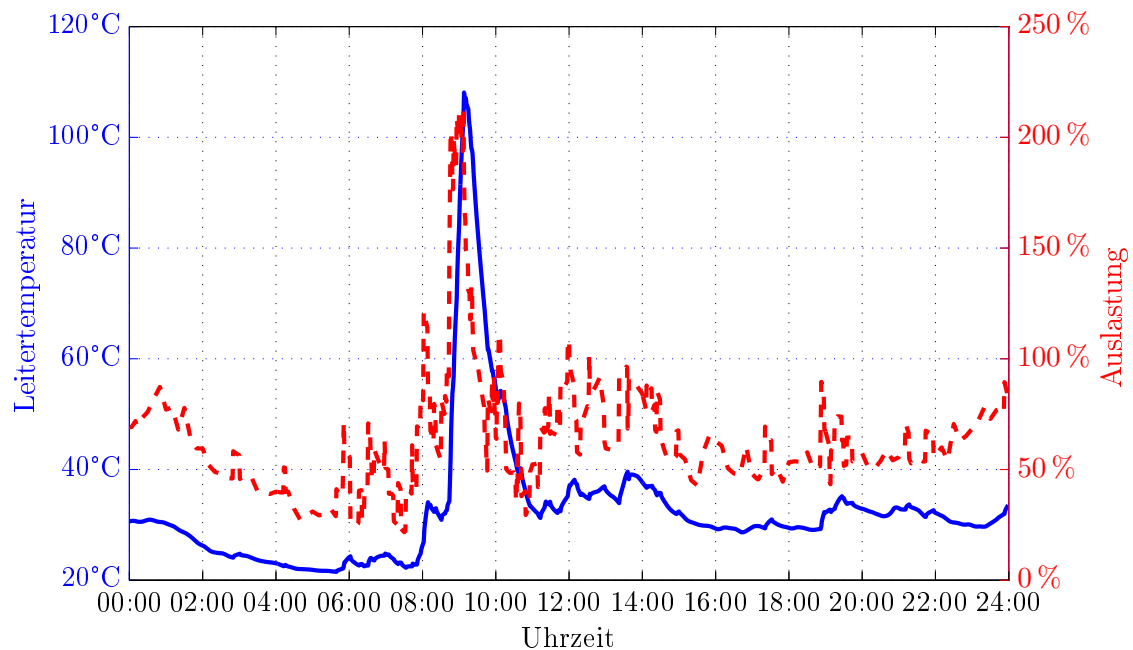


Abbildung 5.6: Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario B.

Bei einem weiteren Taxistandplatz erhöht sich die Leitertemperatur auf 55°C und liegt somit noch deutlich unter der Grenztemperatur. Es handelt sich hier um den TSP-Cluster mit der zweithöchsten Spitzentemperatur.

Daraus lässt sich schließen, dass die Überschreitung der Leitertemperatur durch die starke Konzentration von Elektrofahrzeugen am Taxistandplatz zustande kommt. Es befinden sich in diesem Zeitraum **bis zu maximal 11 E-Taxis gleichzeitig** am TSP-Cluster. Berücksichtigt man, dass zu diesem Zeitpunkt nur 184 der 350 E-Taxis im Dienst waren, befanden sich knapp 6 % aller Taxis an diesem Standplatz. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um ein Ausnahmeereignis handelt.

Es stellt sich die Frage, ob eine Ladesteuerung ökonomisch sinnvoll ist, oder ob es besser wäre, die Ladeleistung bei solchen Einzelereignissen anders zu begrenzen. Eine Möglichkeit wäre, dass nicht alle E-Taxis gleichzeitig laden können. Dies wäre durch eine begrenzte Anzahl an Ladestationen realisierbar.

5.3.2 Gesteuertes Laden

Ähnlich wie in Szenario A lässt sich das Überschreiten der thermischen Grenztemperatur durch gesteuertes Laden verhindern. Dazu wird die Simulation wieder mit beiden Ladesteuerungsmechanismen durchgeführt.

Die maximale Leitertemperatur wird bei beiden Varianten auf $67,5^{\circ}\text{C}$ begrenzt. Der Tem-

peraturbereich um 67°C dauert ca. 20 Minuten und ist somit deutlich kürzer, als die Zeitdauer der Überschreitung bei ungesteuertem Laden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

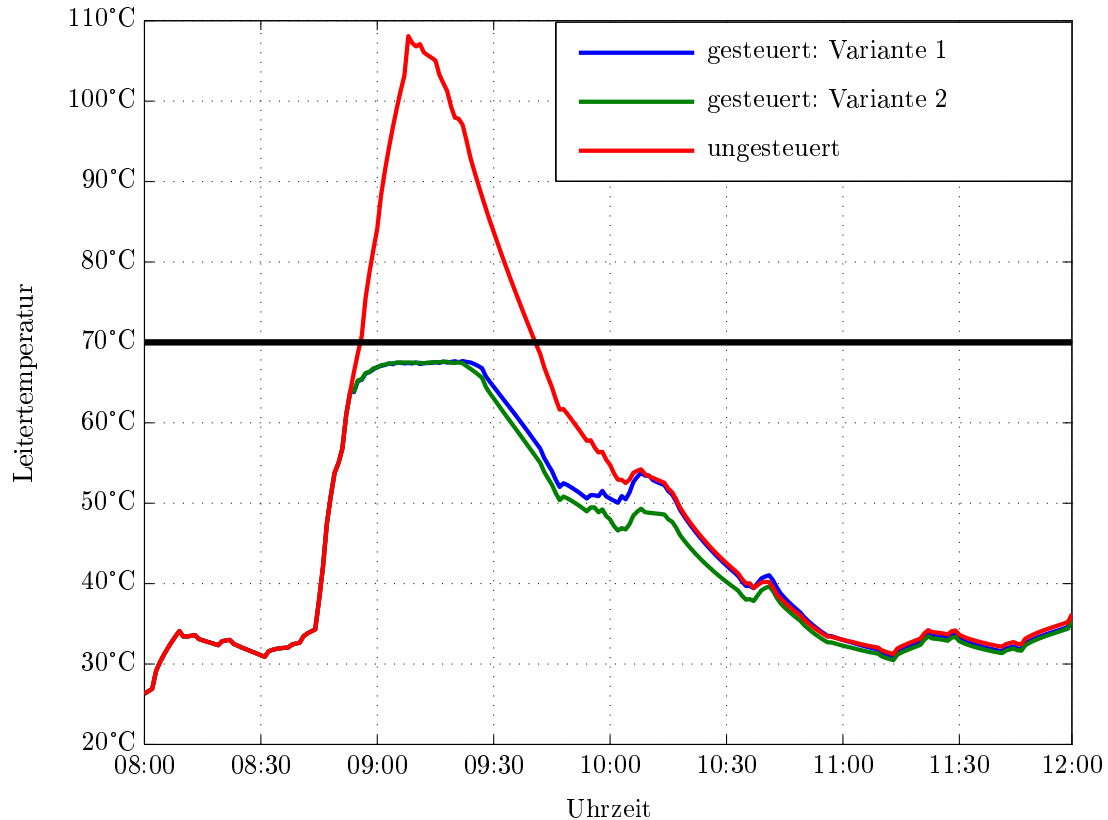


Abbildung 5.7: Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

Wie in Szenario A ist auch in diesem Szenario die Leitertemperatur nach der Spitzenauslastung bei einer SOC abhängigen Ladesteuerung geringer, als bei einer vom Ladezustand unabhängigen. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen den beiden Szenarien beträgt in Szenario B fünf Grad Celsius. Der Grund ist der gleiche wie im vorigen Szenario. Aufgrund der höheren Haushaltslast, kommt es jedoch öfter zu einer Reduktion der Ladeleistung und der im vorigen Szenario beschriebene Effekt wirkt sich öfters aus. Eine weitere Ursache für die höhere Leitertemperatur in Variante 1 ist, dass auch die E-Taxis, die gerade erst am Taxistandplatz angekommen sind und normalerweise einen niedrigeren SOC haben, von der Reduktion betroffen sind. Viele dieser Fahrzeuge bleiben noch länger am Taxistandplatz stehen und können somit zu einem späteren Zeitpunkt laden. Bei der SOC

abhängigen Ladestrategie wird die Ladeleistung der E-Taxis mit hohem Ladezustand der Batterie zuerst reduziert. Womit eher die Fahrzeuge betroffen sind, die den TSP-Cluster bald verlassen werden. Bei diesen E-Taxis ist eine spätere Ladung am gleichen Standplatz nicht möglich, außer das Fahrzeug kommt nach einer zwischenzeitlichen Fahrt wieder zum gleichen Taxistandplatz.

Anhand der in Abbildung 5.8 dargestellten Auslastung ist zu erkennen, dass die Reduktion der Ladeleistung zu einem früheren Zeitpunkt als in Szenario A beginnt. Die Ladeleistung der einzelnen E-Taxis muss mehr reduziert werden, damit die Leitertemperatur unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur bleibt. Dadurch kommt es auch zu einer größeren Lastverschiebung zu späteren Zeitpunkten. Die Gründe warum die Lastverschiebung in Variante 1 größer als in Variante 2 ist, wurden bereits oben beschrieben.

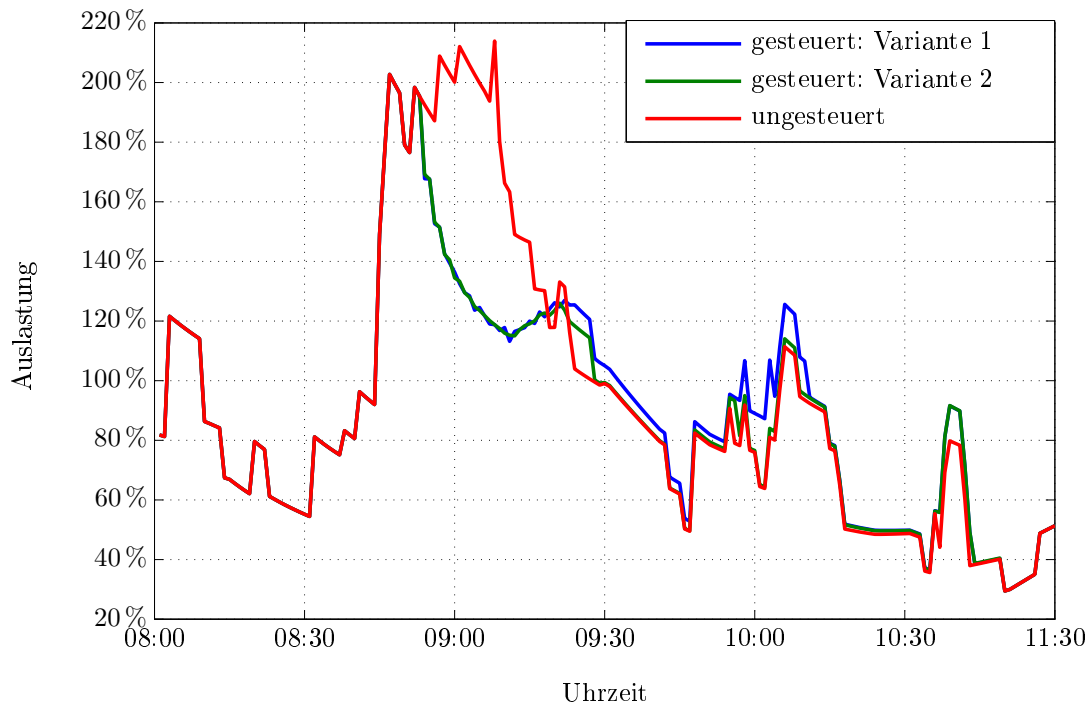


Abbildung 5.8: Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario B.

Durch die vermehrten Eingriffe der Ladesteuerung kommt es zu größeren Auswirkungen auf den SOC der einzelnen E-Taxis als im vorigen Szenario. Obwohl die Eingriffe länger und stärker sind, **bleiben auch in diesem Szenario keine E-Taxis aufgrund eines zu niedrigen SOC „liegen“**. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass dieses Verhalten auf den verwendeten Mobilitätsdaten beruht.

In Szenario A wurde gezeigt, wie sich eine SOC abhängige Ladesteuerung positiv auf die Fahrzeuge mit niedrigen und mittleren SOC auswirkt. Es gibt jedoch ebenso E-Taxis, bei denen diese Art der Ladesteuerung zu einem niedrigeren Ladezustand der Batterie

führt. Davon sind vor allem Fahrzeuge mit hohem SOC betroffen. Abbildung 5.9 zeigt den SOC Verlauf eines solchen E-Taxis. Der Zeitpunkt, an dem die Ladesteuerung beginnt einzugreifen ist dadurch zu erkennen, dass das E-Taxi in Variante 2 nicht mehr geladen wird. Wird die Ladeleistung aller E-Taxis reduziert (Variante 1), wird das E-Taxi trotz dem Eingreifen der Ladesteuerung weiter geladen. Die Reduktion der Ladeleistung ist durch die Abflachung im Vergleich zum ungesteuerten Laden zu erkennen. Dadurch kommt es bei diesem E-Taxi zu einem niedrigeren Ladezustand der Batterie aufgrund einer SOC abhängigen Ladesteuerung. Nach dem Verlassen des Taxistandplatzes legt das Fahrzeug drei Fahrten zurück, ohne eine zwischenzeitliche Möglichkeit zur Aufladung der Batterie. Trotz des niedrigeren SOC bei diesem Fahrzeug bietet die zweite Ladesteuerungsvariante Vorteile. Durch das Nichtladen bei diesem E-Taxi können die Fahrzeuge mit kleinerem SOC weiter aufgeladen werden. Weiters können mit einem SOC von 84 % noch immer sehr viele Fahrten getätigt werden.

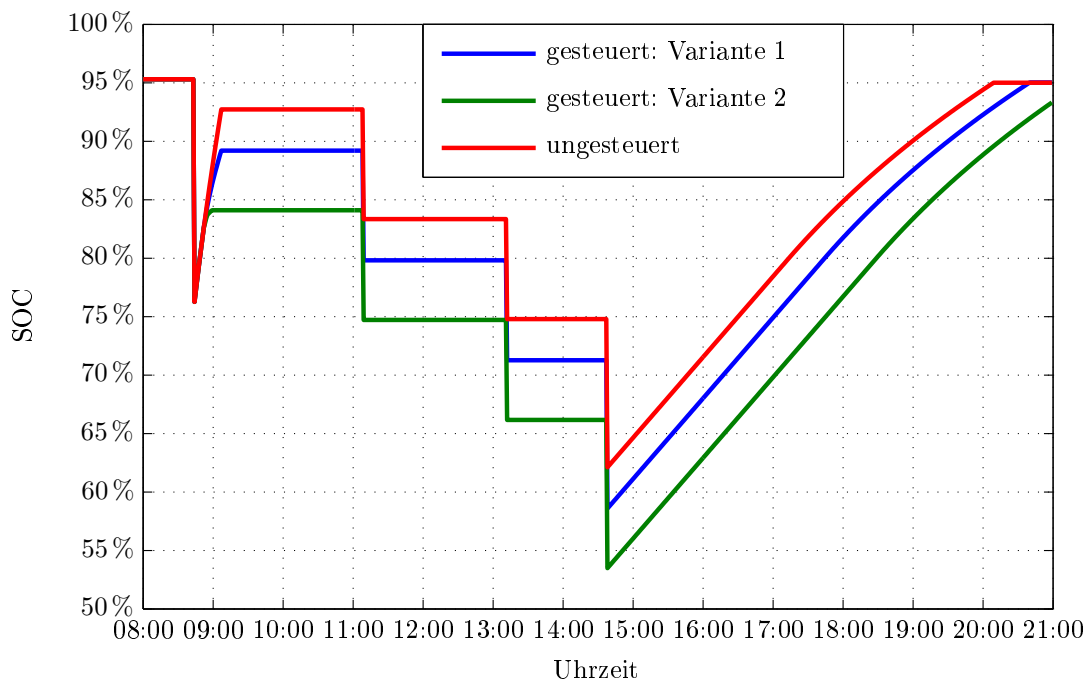


Abbildung 5.9: Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxis in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

Berücksichtigt man die in Abbildung 2.2 (a) dargestellte Verteilung des Taxi - Energieverbrauchs, erkennt man, dass für die meisten Fahrten nur wenig Energie benötigt wird. Man muss wie bei dem in Abbildung 5.9 dargestellten Fahrzeug (zwei Taxistandplätze ohne Ladeinfrastruktur) beachten, dass auch mehrere Fahrten ohne eine zwischenzeitliche Auf-

ladung zurückgelegt werden müssen. Im Projekt ZENEM wurden jedoch die TSP-Cluster so gereiht, dass die Erfüllbarkeit der Wegstrecken maximiert wird. Somit kann davon ausgegangen werden, dass alle betrachteten E-Taxis regelmäßig an einem Taxistandplatz mit einer Ladeinfrastruktur halten. Dies ist ein weiterer Punkt der für eine SOC abhängige Ladestrategie spricht.

Bei dem in Abbildung 5.9 gezeigten Verlauf handelt es sich um einen kurzen Ausschnitt des SOC Verlaufs, deshalb sei darauf hingewiesen, dass der gezeigte Minimalwert nicht der Minimalwert der zweiwöchigen Betrachtung ist.

Eine Angleichung der SOC Werte findet auch bei diesem Fahrzeug erst nach dem Laden am Standplatz *Zuhause* statt.

5.4 Szenario C

Szenario C stellt das aus heutiger Sicht realistischste Szenario für die Einführung von E-Taxis in Wien dar. Wie bereits erwähnt, befindet sich die Batteriekapazität der meisten momentan am Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge, im Bereich von 24 kWh.

Durch die Reduktion der Ladeleistung, reduziert sich auch die Anzahl der betrachteten E-Taxis von 350 auf 152. Es wurden hier jene Fahrzeuge berücksichtigt, die alle Wege innerhalb der dreiwöchigen Simulation mit einer Batteriekapazität von 24 kWh schaffen.

5.4.1 Ungesteuertes Laden

Durch die Verringerung der Batteriekapazität, verändern sich die Ladeprofile an allen Taxistandplätzen. Die Anzahl der gleichzeitig ladenden Fahrzeuge sinkt, wobei mehr Fahrzeuge mit niedrigen SOC existieren. Dies führt anhand der Ladecharakteristik zu einem erhöhten Ladeleistungsbedarf.

In diesem Szenario kommt es bei keinem der 20 TSP-Cluster zu einer Überschreitung der thermischen Grenztemperatur. Der Spitzenwert der Leitertemperatur des Erdkabels wird an einem anderen Taxistandplatz als in Szenario A und B erreicht. Abbildung 5.10 zeigt den Verlauf der Leitertemperatur sowie die Auslastung am Tag mit der höchsten Belastung. Die Leitertemperatur erreicht einen Maximalwert von 52,9 °C. Die Nennbelastbarkeit des Erdkabels wird zwischen acht Uhr und zehn Uhr mehrmals überschritten, wobei die maximale Auslastung bei 136 % liegt. Sie liegt somit deutlich unter der Auslastung aus Szenario A.

Die Anhebung der Leitertemperatur kommt dadurch zustande, da mehrmals hintereinander E-Taxis am Taxistandplatz eintreffen, deren SOC kleiner als 20 % ist. Bis zu sieben Fahrzeuge befinden sich gleichzeitig an diesem TSP-Cluster. Es handelt sich hier also schon

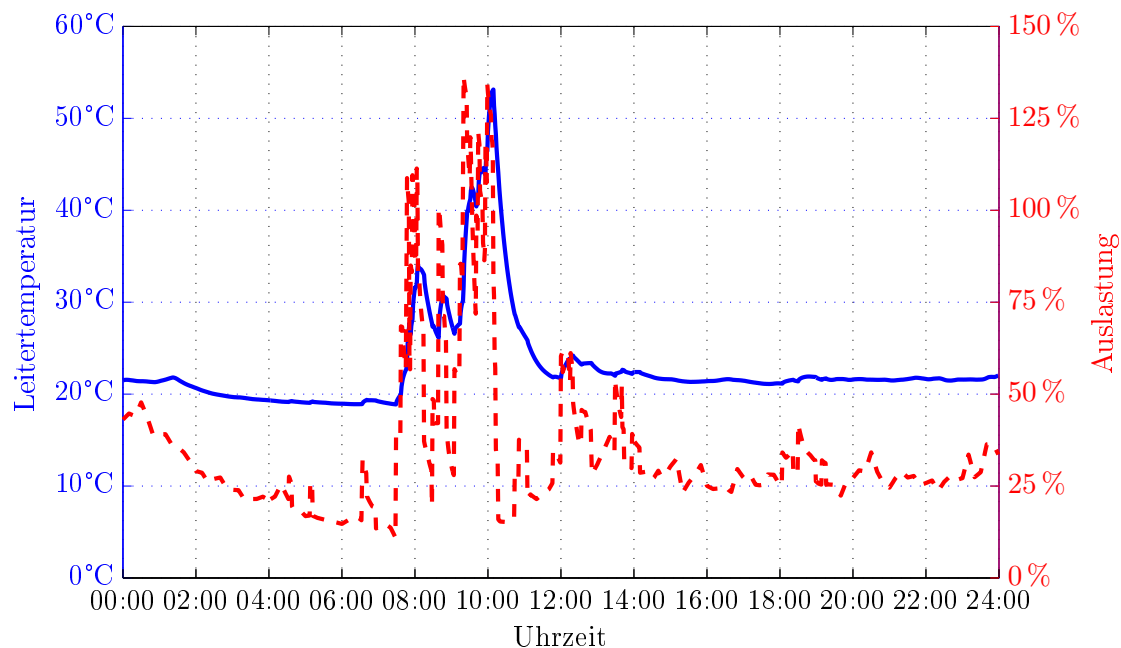


Abbildung 5.10: Leitertemperatur und Auslastung am Taxistandplatz mit der höchsten Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario C.

um ein „*Worst Case*“ *Szenario* in Anbetracht der Batteriegröße und der berücksichtigten E-Taxis.

Trotzdem kommt es zu keiner Überschreitung der erlaubten Leitertemperatur. Die Ergebnisse aus diesem Szenario werfen die Frage auf, ob es bei der Einführung von E-Taxis überhaupt zu thermischen Problemen an den Erdkabeln kommt. Die Antwort hängt stark von der Anzahl der E-Taxis ab. Viele der Fahrzeuge fallen durch die Halbierung der Batteriekapazität, aufgrund einiger weniger Fahrtstrecken die zu lange sind, weg. Die meisten Wege könnten auch mit einer 24kWh Batterie erledigt werden. Schafft man es vonseiten der Taxivermittlungsgesellschaft diese wenigen Fahrten abzufangen, müssten weit mehr E-Taxis in der Betrachtung berücksichtigt werden. Die Fahrten, die nicht mit einem Elektrofahrzeug gemeistert werden können, könnten durch gezielte Vermittlung von ein paar konventionellen Taxis erledigt werden. Kann so die Anzahl der E-Taxis erhöht werden, kann es durchaus auch unter den Rahmenbedingungen dieses Szenarios, zu einer Überschreitung der thermischen Grenztemperatur kommen.

Da es zu keiner Verletzung der Grenztemperatur kommt, liefert die Simulation mit gesteuertem Laden die gleichen Ergebnisse wie soeben beschrieben. **Die Einführung einer Ladesteuerung ist in diesem Szenario nicht notwendig.** Auch beim SOC der einzelnen E-Taxis kommt es zu keiner Veränderung und somit auch zu keiner Veränderung in

der Erfüllbarkeit der Wegstrecken.

5.5 Szenario D

Wie im Szenario B wird auch in diesem Szenario die Haushaltslast verdoppelt. Die Batteriekapazität ist jedoch dieselbe wie in Szenario C und somit bleibt auch die Anzahl der berücksichtigten E-Taxis gleich.

5.5.1 Ungesteuertes Laden

Berücksichtigt man die erhöhte Haushaltslast kommt, es zu einer kurzzeitigen Überschreitung der thermischen Grenztemperatur des Erdkabels. Diese tritt am gleichen Taxistandplatz auf, welcher in Szenario C bereits besprochen wurde. Die maximale Leitertemperatur beträgt $72,4^{\circ}\text{C}$ und liegt somit nur geringfügig über den für eine PVC-Isolierung erlaubten 70°C . Die Zeitdauer in der die erlaubte Temperatur überschritten wird, beträgt acht Minuten (siehe Abbildung 5.11).

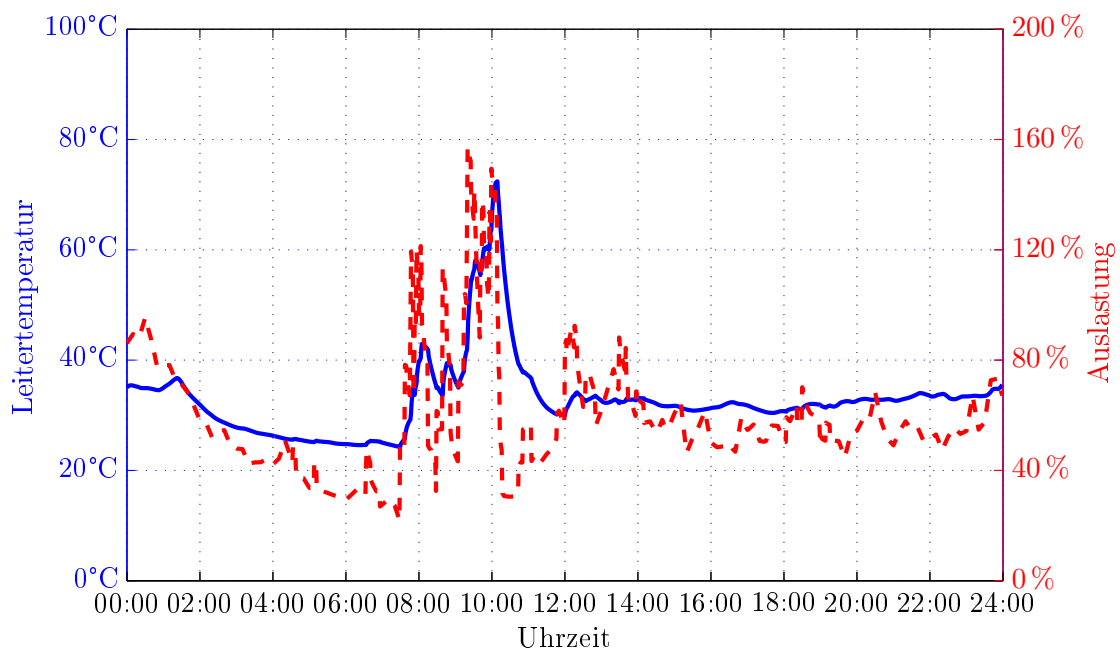


Abbildung 5.11: Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario D.

Durch die Verdoppelung der Haushaltslast kommt es auch zu einer erhöhten Auslastung des Erdkabels. Der Maximalwert liegt bei 157 %. In diesem Szenario wird die Nennbelastbarkeit insgesamt an 198 Zeitpunkten (entspricht 198 min) überschritten, wobei diese über den

gesamten Simulationszeitraum verteilt sind. Außer an dem gezeigten Tag, kommt es zu keiner nennenswerten Erhöhung der Leitertemperatur.

An allen anderen TSP-Cluster kommt es zu keiner thermischen Überlastung.

Ein Nutzen der Ladesteuerung ist auch aufgrund dieses Ergebnisses kritisch zu hinterfragen. Denn außer bei dem bereits beschriebenen „*Worst Case*“ *Szenario* kommt es trotz der verdoppelten Haushaltslast zu keiner weiteren thermischen Grenzverletzung. Es wäre auch sinnvoll zu überprüfen, ob es aufgrund dieser kurzzeitigen Überschreitungen der maximal zulässigen Betriebstemperatur überhaupt zu einer Beschädigung des Erdkabels kommt bzw. wie sich diese Überschreitungen auf die Alterung der Erdkabel auswirkt. Eventuell wäre es hier aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller, diese Überlastungen zuzulassen. Diese Fragen können im Rahmen dieser Arbeit nicht konkret beantwortet werden und bedürfen einer weiteren Betrachtung.

5.5.2 Gesteuertes Laden

Trotz der vergleichsweise geringen thermischen Grenzverletzung wird die Auswirkung der beiden Ladesteuerungsvarianten näher betrachtet.

Im Bezug auf die Leitertemperatur liefern beide Ladesteuerungsvarianten aufgrund der geringen Überschreitung der thermischen Grenztemperatur ein annähernd gleiches Ergebnis. Die maximale Leitertemperatur wird auf 68 °C begrenzt. Im Vergleich zu den ersten beiden Szenarien tritt die maximale Leitertemperatur um ca. eine Stunde später zwischen 10:00 Uhr und 10:30 Uhr auf (siehe Abbildung 5.12).

Die Auslastung des Erdkabels wird in diesem Zeitraum nur geringfügig von 150 % auf 122 % reduziert. Abbildung 5.13 zeigt den Vergleich der Auslastung zwischen ungesteuertem und gesteuertem Laden. Im Zeitraum in dem die Reduktion der Ladeleistung stattfindet (zehn Uhr), ist der Verlauf der beiden Ladesteuerungsvarianten ebenfalls annähernd ident. Erst zwischen 12:00 Uhr und 12:30 Uhr erkennt man einen Unterschied zwischen der SOC abhängigen Ladesteuerung und der SOC unabhängigen. In diesem Zeitraum wird ein Teil der zuvor reduzierten Ladeleistung „nachgeladen“. Aufgrund der beiden Ladestrategien wurde die Leistung der E-Taxis unterschiedlich reduziert und somit kommt es zur zeitlichen Differenz der Lastverschiebung zwischen der ersten und zweiten Variante. Die Erhöhung der Auslastung durch dieses zusätzliche (spätere) Laden ist gering und beträgt maximal 5 Prozentpunkte.

Die Reduktion der Ladeleistung erfolgt nicht dort wo die Auslastung am größten ist. Zum Eingreifen der Ladesteuerung kommt es erst durch die langanhaltende, hohe Auslastung

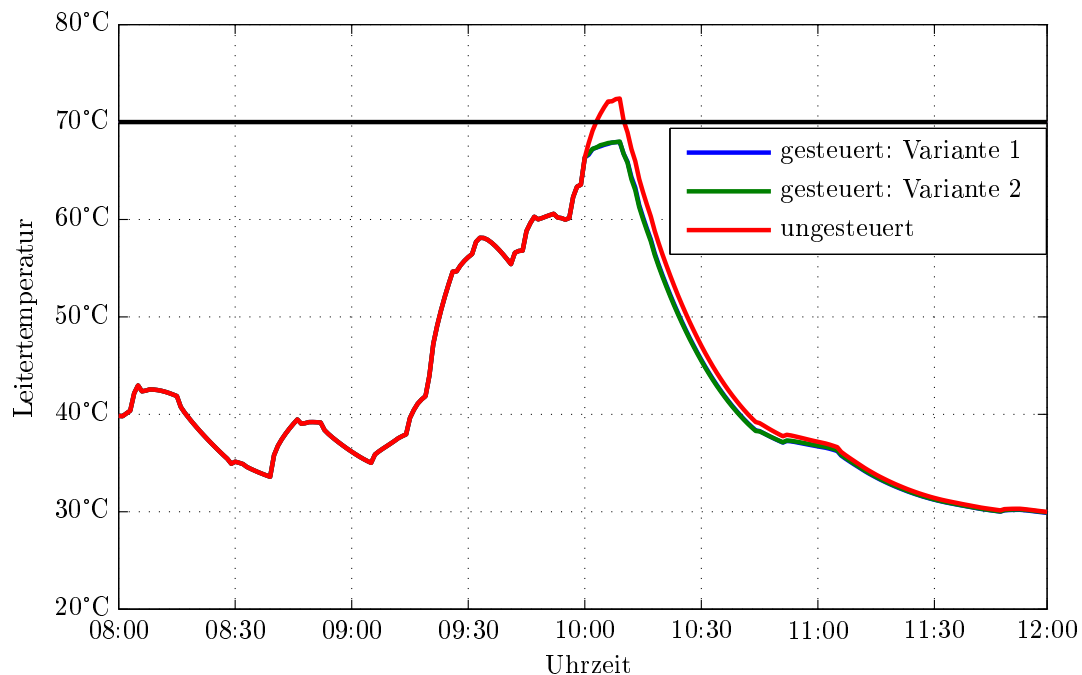


Abbildung 5.12: Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

des Stranges. In einem Zeitraum von 54 Minuten, abgesehen eines zweiminütigen Ausreißers nach unten, liegt die Auslastung über 100 %. Der Strom der über das Kabel geführt wird, liegt somit über dem Nennstrom von 275 A. Durch die thermische Trägheit (vgl. Kapitel 3.5) des Systems kommt es trotz der langen Überlast nur zu einer kurzen thermischen Grenzverletzung ohne Ladesteuerung. Mit der Ladesteuerung bleibt die Auslastung weiterhin über 100 %, jedoch kann die kurzfristige Überschreitung der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Erdkabels verhindert werden.

Wie auch in den anderen Szenarien, kommt es durch das Eingreifen der Ladesteuerung zu Veränderungen am SOC gewisser E-Taxis. Obwohl die Reduktion der Ladeleistung der E-Taxis in diesem Szenario geringer ist als in Szenario A und B, sieht man die Auswirkungen der verschiedenen Ladestrategien hier am besten. Es kommt zwar auch **in diesem Szenario zu keinem „Liegenbleiben“ eines E-Taxis aufgrund eines zu niedrigen SOC**, jedoch fällt der SOC eines E-Taxis aufgrund des Eingreifens der Ladesteuerung (Variante 1) auf 6,5 % ab. Der Ladezustand befindet sich somit nur mehr knapp über dem Schwellwert von 5 %. Der SOC Verlauf des Fahrzeugs ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Bei der SOC abhängigen Ladesteuerung (Variante 2) verändert sich der SOC dieses E-Taxis

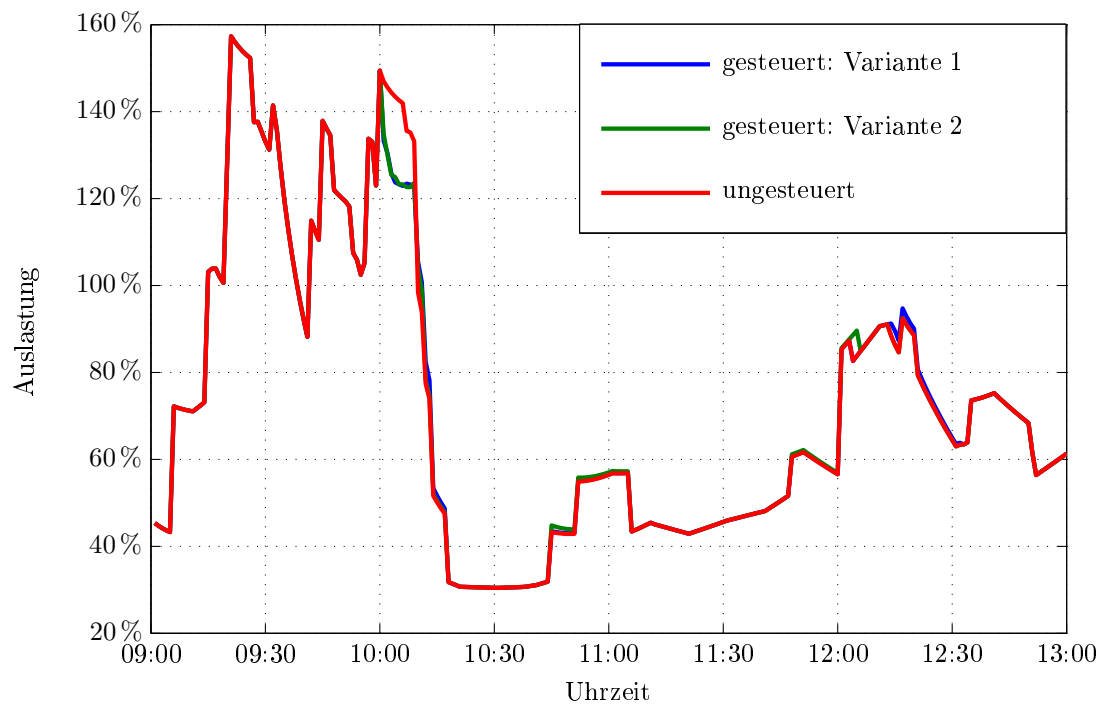


Abbildung 5.13: Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario D.

nicht im Vergleich zum ungesteuerten Laden. Die erste Ladesteuerungsvariante vermindert den minimalen Ladezustand der Batterie um 4,1 Prozentpunkte im Vergleich zur zweiten. Ein ähnliches Verhalten tritt auch bei einem weiteren E-Taxi auf. Bei beiden Fahrzeugen gleicht sich der SOC erst nach dem Laden am Standort *Zuhause* wieder an.

Bei einer SOC abhängigen Steuerung kommt es bei den verwendeten Mobilitätsdaten zu keiner Verminderung des minimalen SOC im Vergleich zum ungesteuerten Fall. Es gibt natürlich auch E-Taxis mit höherem Ladezustand der Batterie, die aufgrund der zweiten Ladesteuerungsvariante einen geringeren SOC aufweisen. Diese Verminderung wirkt sich jedoch nicht auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken aus, da es bei diesen Fahrzeugen kurz nach der Verminderung zu einer Vollauffüllung der Batterie kommt. Aufgrund dieser Erkenntnisse, **ist in diesem Szenario eine SOC abhängige Ladesteuerungsstrategie zu bevorzugen.**

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse durchaus anders sein können, wenn ein anderer Pool aus Fahrten betrachtet wird.

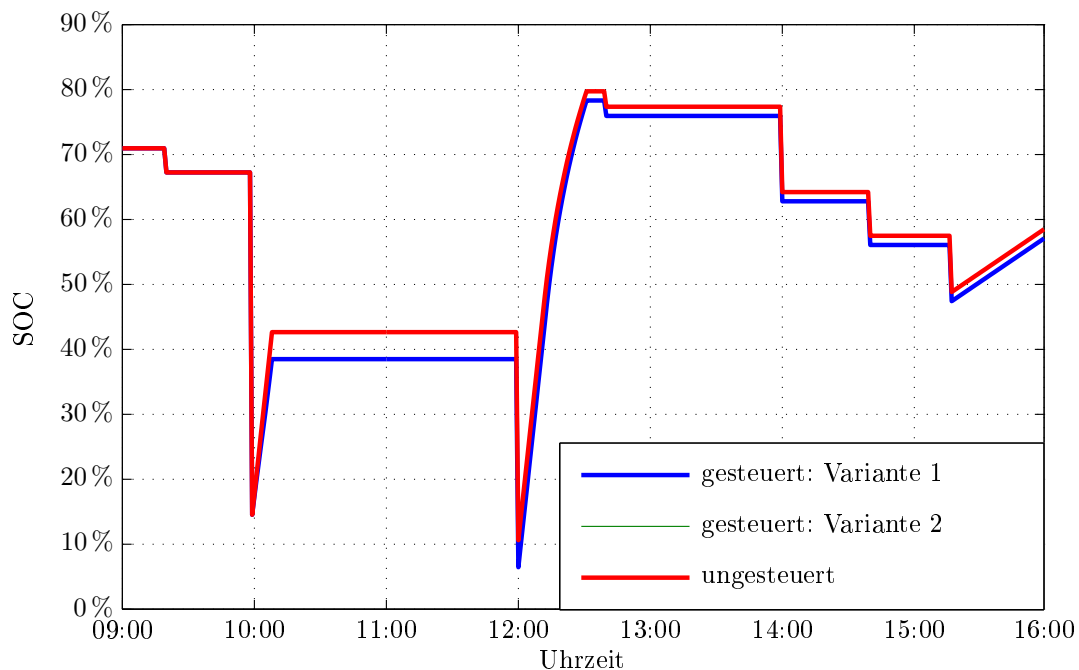


Abbildung 5.14: Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxis in Abhängigkeit der Ladesteuerungsmechanismen. Variante 1: Multiplikation aller Ladeleistungen mit konstantem Faktor; Variante 2: SOC-abhängige Reduktion der Ladeleistung

5.6 Interpretation der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien im Bezug auf die Leitertemperatur des Erdkabels sowie die Erfüllbarkeit der Wegstrecken miteinander verglichen.

5.6.1 Leitertemperatur

Fasst man die Ergebnisse aus allen vier Szenarien zusammen, so ist es durch die Einführung einer Ladesteuerung an den Taxistandplätzen möglich, die Überschreitungen der thermischen Grenztemperatur im Erdkabel zu verhindern.

In Abbildung 5.15 ist die Verteilung der Leitertemperatur anhand eines Boxplots für alle Szenarien dargestellt. Es wird die Verteilung von ungesteuertem und gesteuertem Laden verglichen. Da sich die Verteilung der beiden Ladesteuerungsvarianten nur so geringfügig unterscheidet, dass es im Boxplot nicht ersichtlich ist, wird nur ein Boxplot für das gesteuerte Laden dargestellt. Da es im Szenario C zu keiner Überschreitung der thermischen Grenztemperatur kommt, wird auch keine Ladesteuerung benötigt und somit existiert für

dieses Szenario nur ein Boxplot. Für die Erstellung der Boxplots wurden die letzten beiden Wochen des dreiwöchigen Simulationszeitraum herangezogen. Die erste Woche dient dazu, dass sich das thermische Modell einschwingt.

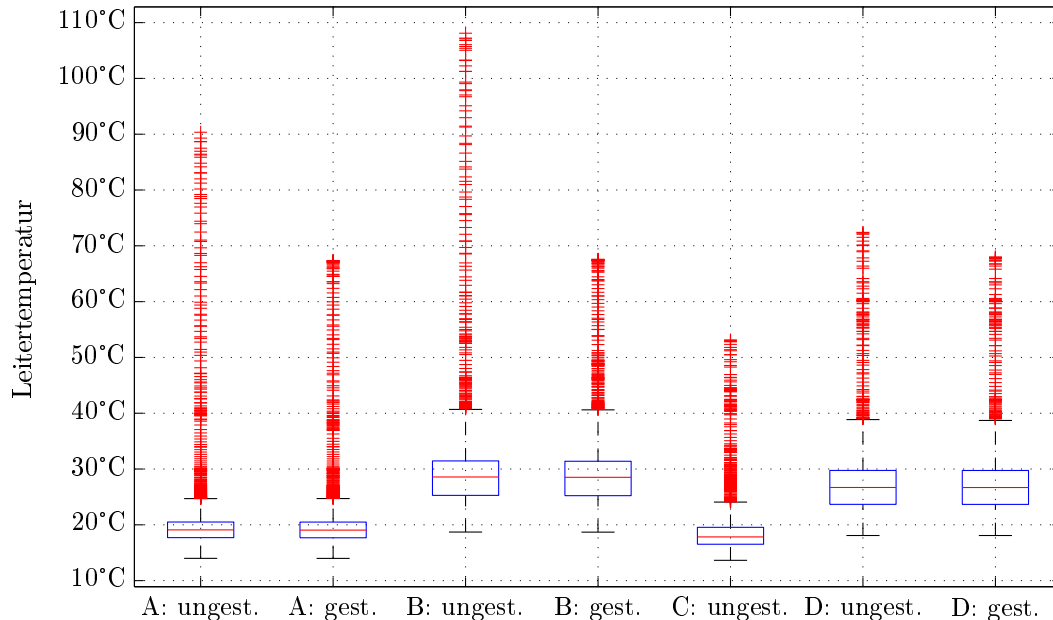


Abbildung 5.15: Vergleich der Leitertemperatur der vier Szenarien bei ungesteuertem und gesteuertem Laden anhand eines Boxplots.

Durch die Einführung einer Ladesteuerung wird in den Szenarien A, B und D die Leitertemperatur unter der maximal zulässigen Temperatur von 70 °C für eine PVC-Isolierung gehalten. Dabei wird die Ladeleistung der E-Taxis reduziert, wobei die Auslastung des Erdkabels über 100 % bleibt. Dies ist deshalb bemerkenswert, weil sich die Leitertemperatur bereits in der Nähe der 70 °C befindet und es trotz einer Auslastung von über 100 % zu keiner thermischen Grenzverletzung kommt. Der Grund dafür liegt in der langen Zeitkonstante des Erwärmungsverlaufs (Abbildung 3.4). Je länger die Leitertemperatur im Bereich der maximal zulässigen Betriebstemperatur bleibt, desto mehr muss sich die Auslastung an die 100 % annähern.

In den Boxplots ist auch zu erkennen, dass es durch die Einführung der Ladesteuerung zu einer Häufung der Temperaturwerte knapp unter 70 °C kommt. Dies ist durch die plateau-förmige Begrenzung der Leitertemperatur (vgl. Abbildung 5.7) erklärbar.

5.6.2 Erfüllung der Wegstrecken

Mit den verwendeten Mobilitätsdaten kommt es durch die Einführung einer Ladesteuerung bei keinem Szenario zu einem „Liegenbleiben“ eines E-Taxis aufgrund eines zu niedrigen

SOC.

Es kommt zwar bei einigen Fahrzeugen zu einer Reduktion des minimalen SOC aufgrund der Ladesteuerung, jedoch bleibt der Ladezustand über dem erlaubten Minimalwert von 5 %. Vergleicht man die beiden Varianten der Ladesteuerung, kommt es zu unterschiedlichen SOC Verläufen.

In Variante 1 (Multiplikation der Ladeleistung aller E-Taxis mit einem konstanten Faktor), wird die Ladeleistung aller E-Taxis reduziert, sobald die Ladesteuerung eingreift. Es kommt somit auch zu einer Leistungsreduktion bei Fahrzeugen, die einen niedrigen SOC besitzen. Vor allem im Szenario C kommt es dadurch zu einer Annäherung an die 5%-Schwelle.

Eine SOC abhängige Ladestrategie (Variante 2) bevorzugt die Fahrzeuge mit geringem und mittlerem Ladezustand der Batterie und spart mehr Ladeleistung bei den Fahrzeugen mit hohem SOC ein. Dies hat zur Folge, dass sich der Minimalwert des SOC der E-Taxis nicht (Szenario C) oder zumindest weniger stark (Szenario A und B) verschlechtert als bei der ersten Ladestrategie.

Daraus lässt sich schließen, dass sich eine SOC abhängige Ladestrategie vorteilhaft auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken auswirkt, wobei bei beiden Ladesteuerungsvarianten alle Wege erfüllbar bleiben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufbauend auf den Arbeiten über die thermische Modellierung von Kabeln in [2] und [8], wird in dieser Arbeit die Simulation der Leitertemperatur mit einer Ladesteuerung kombiniert. Dazu wurde großteils das in [2] erstellte thermische Modell verwendet und um die Modellierung des PEN-Leiters, als zusätzliche Wärmequelle, ergänzt.

Die Ladesteuerung soll verhindern, dass die Leitertemperatur die maximal zulässige Betriebstemperatur, des PVC isolierten Kabels, von 70 °C überschreitet. Dazu wird die Leitertemperatur des nächsten Zeitschritts anhand des Erwärmungsverlaufs eines Erdkabels abgeschätzt. Befindet sich dieser über der thermischen Grenztemperatur, muss die Ladesteuerung eingreifen.

Es werden zwei Ladesteuerungsvarianten betrachtet. Bei der ersten wird die Ladeleistung aller E-Taxis mit einem konstanten Faktor multipliziert. Dadurch sind immer alle Fahrzeuge vom Eingreifen der Ladesteuerung betroffen. Bei der zweiten Variante wird die Ladeleistungsreduktion in Abhängigkeit des Ladezustands der Batterie der einzelnen Fahrzeuge vorgenommen. Es wird zunächst die Ladeleistung der Fahrzeuge mit hohem SOC reduziert, bevor es zu einer Reduktion bei Fahrzeugen mit niedrigem SOC kommt.

Um die Auswirkungen der Ladesteuerung auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken zu analysieren, ist es notwendig das Taxi über mehrere Taxischichten hinweg zu verfolgen. Daher unterscheiden sich die in dieser Arbeit verwendeten Mobilitätsdaten von denen, die im Projekt ZENEM und in [2] verwendet wurden.

Es werden vier Szenarien betrachtet. Im Szenario A wird eine Batteriekapazität von 48 kWh bei normaler Haushaltslast angenommen. Szenario B besitzt die gleiche Batteriekapazität jedoch wird die Haushaltslast verdoppelt. Da die meisten momentan am Markt befindlichen Elektrofahrzeuge eine Batteriekapazität von ca. 24 kWh besitzen, wird dies im Szenario C bei einfacher Haushaltslast und im Szenario D bei doppelter Haushaltslast untersucht.

Es kommt in den Szenarien A, B und D zu einer Überschreitung der thermischen Grenztemperatur bei ungesteuertem Laden. Der Maximalwert der Leitertemperatur beträgt im Szenario A 90,4 °C und im Szenario B 108 °C. Im Szenario D kommt es nur zu einer kurzen Überschreitung der maximal zulässigen Betriebstemperatur um 2,4 °C.

Bei allen drei Szenarien kommt es nur an einem der 20 Taxistandplätze zu einer Überschreitung der thermischen Grenztemperatur. Dies ist auf die starke Konzentration von

gleichzeitig ladenden Fahrzeugen am Taxistandplatz zurückzuführen.

Aufgrund der Ladesteuerung bleibt die Leitertemperatur in allen Szenarien unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur. In allen drei Szenarien in denen es zu einer thermischen Grenzverletzung gekommen ist, wird der Maximalwert der Leitertemperatur bei ca. 68 °C gedeckelt. Durch das Eingreifen der Ladesteuerung kommt es zu einer Reduktion des SOC einzelner Fahrzeuge, jedoch bleibt bei allen E-Taxis, in allen Szenarien die Erfüllbarkeit der Wegstrecken erhalten. Dieses Ergebnis gilt für die betrachteten Mobilitätsdaten. Da es zu einer Reduktion des Ladezustands einiger E-Taxis kommt, kann es bei anders aneinander gereihten Fahrten durchaus dazu kommen, dass ein Fahrzeug aufgrund eines zu geringen SOC während der Fahrt „liegenbleibt“.

Vergleicht man die Auswirkung der beiden Ladesteuerungsvarianten so zeigt sich, dass eine SOC abhängige Ladesteuerung positive Auswirkungen auf den Minimalwert des SOC hat. Dies ist vor allem im Szenario C zu sehen. Während es bei der ersten Ladesteuerungsvariante bei einem Fahrzeug beinahe zu einem Unterschreiten des minimal erlaubten SOC von 5 % kommt, wird die Ladeleistung dieses Fahrzeugs bei der zweiten Variante nicht reduziert. Es ist somit davon auszugehen, dass sich eine SOC abhängige Ladesteuerung positiv auf die Erfüllbarkeit der Wegstrecken auswirkt.

6.1 Ausblick

Wie aus der Zusammenfassung der Ergebnisse ersichtlich, ist es möglich eine Ladesteuerung zu implementieren die einerseits die Leitertemperatur unter der thermischen Grenztemperatur hält und andererseits die Erfüllbarkeit der Wegstrecken nicht zu stark beeinflusst.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Einführung einer solchen Ladesteuerung ökonomisch sinnvoll ist. Ein Überschreiten der maximal zulässigen Betriebstemperatur kommt nur dann zustande, wenn sich viele E-Taxis gleichzeitig an einem Taxistandplatz befinden und zusätzlich der Ladezustand ihrer Batterie sehr gering ist. Es handelt sich hier um Einzelereignisse zu denen es nur sehr selten kommt. Eventuell wäre es sinnvoller, diese Ereignisse mit anderen Maßnahmen zu verhindern. Pro Taxistandplatz könnte nur eine begrenzte Anzahl an Ladestationen zur Verfügung stehen und somit die Spitzenwerte der Ladeleistung reduziert werden. Da in den Szenarien A und B bis zu elf E-Taxis gleichzeitig laden, müsste die Netzanschlussleistung des Taxistandplatzes 550 kW betragen. Dies ist in der Netzebene 7 (Niederspannungsnetz) nicht möglich. Die meisten Netzbetreiber erlauben in der Netzebene 7 eine maximale Anschlussleistung von 100 kW. Es müssten also entweder die Ladestationen begrenzt werden, oder der Anschluss in einer höheren Netzebene erfolgen. Wählt man die zweite Möglichkeit müssen bauliche Maßnahmen getroffen werden und eine Ladesteuerung zur Begrenzung der Leitertemperatur wird nicht benötigt werden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Zahl der Taxistandplätze mit einer Ladeinfrastruktur zu

erhöhen. Damit würde sich das Laden der Fahrzeuge auf mehrere Standorte verteilen und die Auswirkungen auf die Leitertemperatur wären geringer.

In dieser Arbeit wurden 350 E-Taxi berücksichtigt, die mit ihrer Batteriekapazität alle Fahrten erfüllen können. Vergleicht man diese Zahl mit den rund 2500 Funktaxi, die in Wien existieren, sieht man, dass noch ein großes Potential bei der Umstellung auf Elektrofahrzeuge existiert. Eine Möglichkeit, damit mehr Fahrzeuge alle Wege erfüllen können, wäre eine intelligente Vermittlung der Fahrzeuge durch die Vermittlungsgesellschaft. Dabei könnten gezielt Fahrzeuge für Fahrten zum Einsatz kommen, deren SOC mit der Länge der Wegstrecke zusammenpasst. Zusätzlich könnten die E-Taxis mit geringem SOC zum nächsten Taxistandplatz mit einer Ladeinfrastruktur geleitet werden.

Würde man eine Erhöhung der gleichzeitig fahrenden E-Taxis durch diese Maßnahmen schaffen, würden sich auch mehr Fahrzeuge an den Taxistandplätzen befinden. Die Auswirkungen auf die Leitertemperatur wären somit ebenfalls größer und eine Ladesteuerung könnte doch sinnvoll umgesetzt werden. Dies gilt natürlich nur dann, wenn so wenige Ladestationen pro Taxistandplatz existieren, dass ein Anschluss in der Netzebene 7 stattfinden kann und keine baulichen Maßnahmen im Bezug auf das Erdkabel getroffen werden müssen.

Literaturverzeichnis

- [1] STATISTIK AUSTRIA. *Kfz-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2013*. 2014. URL: http://www.statistik.gv.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/index.html (besucht am 28.03.2014).
- [2] Dominik Fasthuber. „Thermische Modellierung von Netzkomponenten für die Elektromobilität“. Diplomarbeit. TU Wien, 2013.
- [3] The MathWorks, Inc. *Embedded MATLAB™ User's Guide*. 2007. URL: http://soliton.ae.gatech.edu/classes/ae6382/documents/matlab/mathworks/eml_ug.pdf (besucht am 18.04.2014).
- [4] Schwechater Kabelwerke. *Energiekabel 0,6/1kV*. 2014. URL: http://www.skw.at/fileadmin/content/skw/Service/Katalog_Export_-_Inland/Export/Exportkatalog_SKW-PRAKAB_2012/Exportkatalog_-_4_Energiekabel_0_6_1_kV.pdf (besucht am 23.04.2014).
- [5] Friedrich Pötscher, Ralf Winter, Günther Lichtblau. *Elektromobilität in Österreich. Szenarien 2020 und 2050*. Report. Umweltbundesamt, 2010. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0257.pdf> (besucht am 26.03.2014).
- [6] Markus Litzlbauer. „Systemtechnische Integration von Elektrotaxis im urbanen Raum“. Dissertation (laufend). TU Wien, Mai 2014.
- [7] NISSAN. *Nissan LEAF Spec*. 2014. URL: <http://www.nissan-zeroemission.com/EN/LEAF/specs.html> (besucht am 19.03.2014).
- [8] Andreas Schuster. „Ladeinfrastruktur und Verteilnetzbelastungen durch Elektromobilität“. Dissertation. TU Wien, 2013.
- [9] Robert Strasser. „Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte“. Diplomarbeit. TU Wien, 2013.
- [10] L. Heinhold, R. Stubbe. *Kabel und Leitungen für Starkstrom*. 5. Auflage. Publicis MCD Verlag, 1999. ISBN: 3-89578-088-X.
- [11] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik u.a. *ZENEM - Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität*. Publizierbarer Endbericht. TU Wien, 2013.

- [12] Umweltbundesamt. *CO₂-Emissionen nach Sektoren 1990-2011*. 2013. URL: <http://duz.lebensministerium.at/duz/duz/theme/view/1778530/0/722/332#> (besucht am 26.03.2014).
- [13] Arnold F. Hollemann, Egon Wiberg. *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 101. Auflage. Berlin: de Gruyter-Verlag, 1995.

Abbildungsverzeichnis

1.1	CO ₂ -Emissionen nach Sektoren in Österreich 2011 [12].	2
2.1	Gemittelter Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden Elektrotaxis [11].	6
2.2	Verteilung des Energieverbrauchs.	9
2.3	Aufbau des Niederspannungskabels E-XAYY 4 x 150 SM [4]	11
2.4	Schematische Darstellung der Verlegung des Kabels im Erdboden. Quelle: [8]	12
2.5	Grafische Darstellung der Umgebungstemperatur unter der Asphaltdecke.	13
3.1	Thermisches Ersatzschaltbild eines Niederspannungskabels nach [2]	15
3.2	Zeigerdiagramm zur Veranschaulichung des Verlustfaktors $\tan \delta$ [2].	17
3.3	Temperaturfeld eines in Erde liegenden Kabels.	19
3.4	Erwärmungsverlauf nach einem Belastungssprung von 100 A auf 200 A und einer Umgebungstemperatur von 20 °C.	23
3.5	Vergrößerte Darstellung der ersten Minuten nach dem Belastungssprung.	24
4.1	Flussdiagramm der Ladesteuerung für einen Zeitschritt	26
4.2	Zeitlicher Verlauf von SOC und Ladeleistung	30
4.3	Ladeprofil eines TSP-Cluster an einem beispielhaften Tag.	30
4.4	SOC - abhängige Reduktionsfunktion	34
4.5	Vergleich der unterschiedlichen Parameterkonfigurationen.	36
4.6	Ein- und Ausgangsgrößen des Gesamtmodells.	37
4.7	Übersichtsbild des Gesamtmodells	38
5.1	Skizze der Netztopologie „Offener Ring“	41
5.2	Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario A.	42
5.3	Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario A.	43
5.4	Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden. Szenario A	44
5.5	Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxi. Szenario A	46
5.6	Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario B.	47
5.7	Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden. Szenario B	48
5.8	Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario B.	49
5.9	Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxi. Szenario B	50

5.10	Leitertemperatur und Auslastung am Taxistandplatz mit der höchsten Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario C.	52
5.11	Leitertemperatur und Auslastung ohne Ladesteuerung im Szenario D.	53
5.12	Vergleich der Leitertemperatur bei gesteuertem Laden. Szenario D	55
5.13	Vergleich der Auslastung des Erdkabels im Szenario D.	56
5.14	Vergleich des SOC eines beispielhaften E-Taxi. Szenario D	57
5.15	Vergleich der Leitertemperatur der vier Szenarien.	58
B.1	Netzplan für das in dieser Arbeit betrachtete Netz.	72

Tabellenverzeichnis

2.1	Aufbau eines Datenvektors aus den in [6] erzeugten und in dieser Arbeit verwendeten Mobilitätsdaten.	7
2.2	Kodierung der Standorte in der <i>Taxi_Standorte</i> Matrix	8
2.3	Aufschlüsselung der Kabelbezeichnung	11
2.4	Gemittelte Monatswerte der Umgebungstemperatur unter der Asphaltdecke [10].	13
3.1	Maximal zulässige Betriebstemperaturen für verschiedene Isolationsmaterialien [10].	18
4.1	Parametervariationen zur Bestimmung einer geeigneten Reduktionsfunktion	34
A.1	Basisparameter für die thermische Modellierung eines Al-Erdkabels.	68
A.2	Radien der verschiedenen Schichten.	68
A.3	Spezifische Dichten der verschiedenen Schichten.	69
A.4	Spezifische Wärmewiderstände der verschiedenen Schichten.	69
A.5	Spezifische Wärmekapazitäten der verschiedenen Schichten.	69
A.6	Parameter zur Berechnung der Ladeleistung sowie des SOC.	70
A.7	Parameter der Reduktionsfunktion (Ladesteuerungsvariante 2).	70
A.8	Batteriekapazität in den Szenarien A und B.	70
A.9	Batteriekapazität in den Szenarien C und D.	70

A Parameterliste

In diesem Kapitel werden die verwendeten Parameterkonfigurationen tabellarisch dargestellt. Es werden sowohl die Parameter der thermischen Modellierung als auch die Parameter der Ladesteuerung beschrieben.

A.1 Parameterliste für die thermische Modellierung

Die Quellen wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln zitiert, und die nachfolgenden Tabellen stellen lediglich die in dieser Arbeit verwendeten Parameter dar.

Tabelle A.1: Basisparameter für die thermische Modellierung eines Al-Erdkabels.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Spannung	U	400 V
elektr. Leitfähigkeit bei 20 °C (Al)	κ_{20}	35,4 m/(Ω mm ²)
Temperaturkoeffizient bei 20 °C (Al)	α_{20}	0,004 03/K
Permittivitätszahl	ε_r	3,5
Kapazitätsbelag	C'_b	0,4 nF/m
Verlustfaktor (PVC)	$\tan \delta$	0,013

Tabelle A.2: Radien der verschiedenen Schichten.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Radius eines Leiters	r_0	6,91 mm
Radius der Isolation	r_1	8,71 mm
Radius der Schirmung	r_2	19,5 mm
Radius des Mantels	r_3	22 mm
Radius der Sandschicht	r_4	200 mm
Radius der Kiesschicht	r_5	700 mm
Radius der Asphaltschicht	r_6	725 mm

Tabelle A.3: Spezifische Dichten der verschiedenen Schichten.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Dichte des Leiters (Al)	d_0	2,70 g/cm ³
Dichte der Isolation (PVC)	d_1	1,40 g/cm ³
Dichte der Schirmung	d_2	1,00 g/cm ³
Dichte des Mantels (PVC)	d_3	1,40 g/cm ³
Dichte der Sandschicht	d_4	1,65 g/cm ³
Dichte der Kiesschicht	d_5	1,55 g/cm ³
Dichte der Asphaltschicht	d_6	1,00 g/cm ³

Tabelle A.4: Spezifische Wärmewiderstände der verschiedenen Schichten.

Parameter	Formelzeichen	Wert
spez. Wärmewiderstand des Leiters (Al)	ϱ_0	0,00 K m/W
spez. Wärmewiderstand der Isolation (PVC)	ϱ_1	4,35 K m/W
spez. Wärmewiderstand der Schirmung	ϱ_2	0,00 K m/W
spez. Wärmewiderstand des Mantels (PVC)	ϱ_3	4,35 K m/W
spez. Wärmewiderstand der Sandschicht	ϱ_4	1,43 K m/W
spez. Wärmewiderstand der Kiesschicht	ϱ_5	1,43 K m/W
spez. Wärmewiderstand der Asphaltschicht	ϱ_6	1,25 K m/W

Tabelle A.5: Spezifische Wärmekapazitäten der verschiedenen Schichten.

Parameter	Formelzeichen	Wert
spez. Wärmekapazität des Leiters (Al)	$c_{p,0}$	0,90 J/(g K)
spez. Wärmekapazität der Isolation (PVC)	$c_{p,1}$	1,50 J/(g K)
spez. Wärmekapazität der Schirmung	$c_{p,2}$	1,00 J/(g K)
spez. Wärmekapazität des Mantels (PVC)	$c_{p,3}$	1,50 J/(g K)
spez. Wärmekapazität der Sandschicht	$c_{p,4}$	0,84 J/(g K)
spez. Wärmekapazität der Kiesschicht	$c_{p,5}$	0,84 J/(g K)
spez. Wärmekapazität der Asphaltschicht	$c_{p,6}$	1,00 J/(g K)

A.2 Parameterliste der Ladesteuerung

In diesem Abschnitt werden die Parameter, die zur Berechnung der Ladeleistung sowie des SOC, und die Parameter der Reduktionsfunktion nochmals zusammengefasst.

Tabelle A.6: Parameter zur Berechnung der Ladeleistung sowie des SOC.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Ladeleistung Taxistandplatz	P_{Lade}	50 kW
Ladeleistung Standort <i>Zuhause</i>	P_{Lade_home}	3,68 kW
minimaler SOC	SOC_{min}	0,05
maximaler SOC	SOC_{max}	0,95
Gesamtladewirkungsgrad	η_{Lade}	0,90
Ladeschlussspannung (Li-Ionen-Batterie)	U_{Ls}	4,2 V
Nennspannung (Li-Ionen-Batterie)	U_{Nenn}	3,6 V

Tabelle A.7: Parameter der Reduktionsfunktion (Ladesteuerungsvariante 2).

Parameter	Formelzeichen	Wert
Steigung	k	-3,333
Offset	d	3,333

Tabelle A.8: Batteriekapazität in den Szenarien A und B.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Batteriekapazität	E_{Batt}	48 kWh

Tabelle A.9: Batteriekapazität in den Szenarien C und D.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Batteriekapazität	E_{Batt}	24 kWh

B Netzplan

Abbildung B.1 zeigt den Netzplan für das in dieser Arbeit betrachtete Netz. Um die Ladeleistung der E-Taxis zu berücksichtigen, wurde in *Strang 2* ein Netzknoten hinzugefügt. Die thermische Modellierung des Erdkabels wird für diesen Strang durchgeführt. Dieses Netz ist für alle 20 TSP-Cluster mit einer Ladeinfrastruktur hinterlegt.

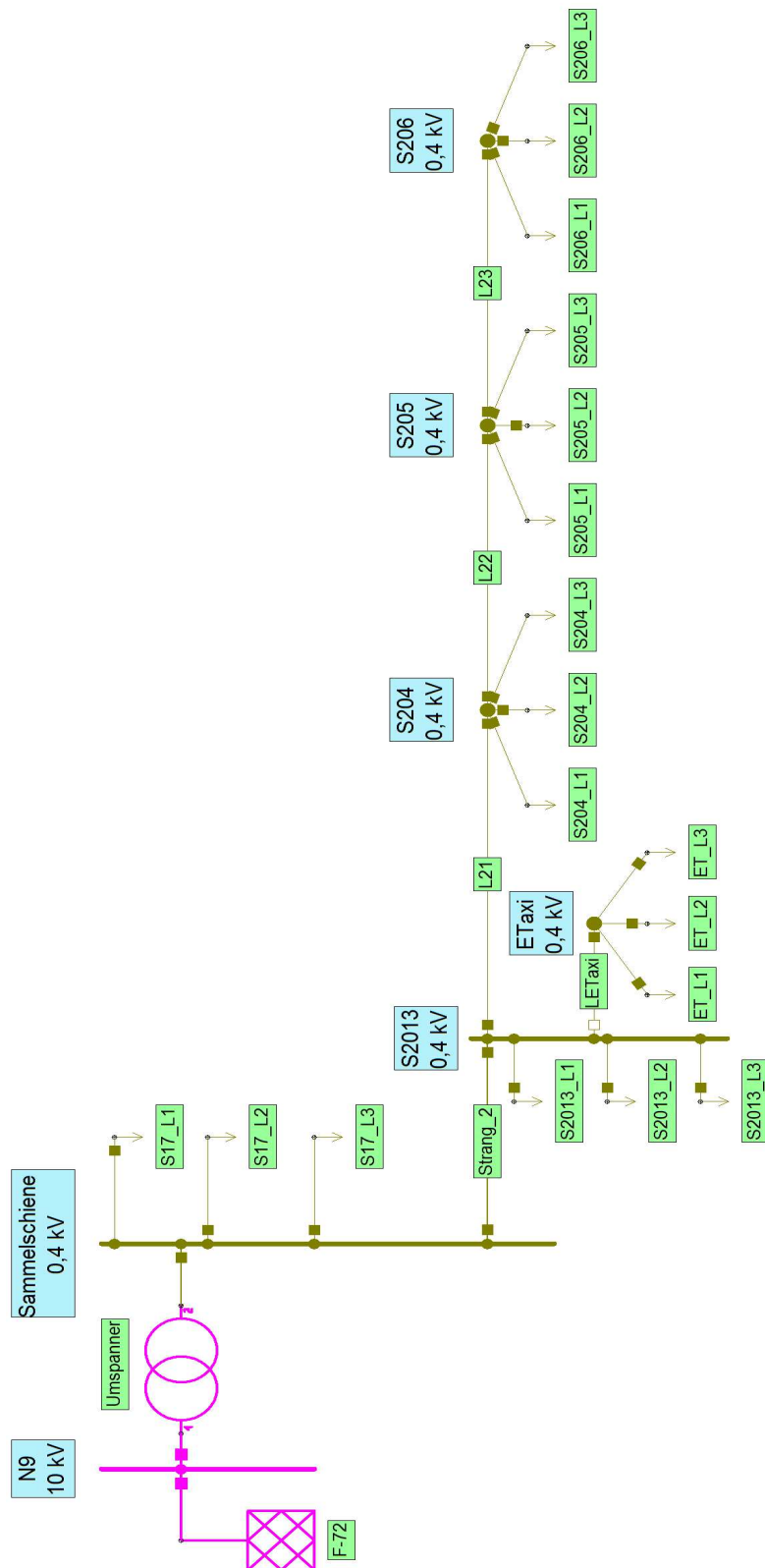


Abbildung B.1: Netzplan für das in dieser Arbeit betrachtete Netz.