

Diplomarbeit

Erstellung und Modellierung von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher mit MATLAB

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades des
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Günther Brauner

und

Dipl.-Ing. Christoph Leitinger

E373 – Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Markus Litzlbauer
0225710

Am Moos 15, 3340 Waidhofen/Ybbs

Wien, am 09. September 2009

Kurzfassung

Das rasante Wachstum des Energiebedarfs im Verkehrssektor lässt die CO₂-Emissionen drastisch in die Höhe schnellen. Dies verursacht lokale Umweltprobleme und trägt zum globalen Klimawandel bei. Auf Grund dieser umweltpolitischen und einiger wirtschaftlichen Aspekte, wie steigende Rohölpreise und Treibstoffkosten, ist die Elektromobilität aktueller denn je.

Bei einem Umstieg von Verbrennungskraftmotoren auf elektrische Antriebe kommt es zu Mehrbelastungen, welche Änderungsmaßnahmen am Energieversorgungssektor notwendig machen. Deshalb wird in dieser Arbeit mit Hilfe der Software MATLAB ein Modell entwickelt, mit dem stochastische Ladeprofile von Elektrofahrzeugen erstellt werden können. Das MATLAB-Programm bietet weiters die Möglichkeit, eine Vielzahl von Parametern zu adaptieren. Konkret werden für die Modellbildung Elektrofahrzeuge mit Li-Ionen-Batterien verwendet. Als Grundlage dienen Verkehrsstatistiken des motorisierten Individualverkehrs in Österreich, aus denen sich die Modellparameter ergeben. Für 100 BEV aus einem Fahrprofilmix werden die berechneten Ergebnisse zu einem Gesamtladeprofil zusammengeführt und die resultierenden Zusammenhänge besprochen. Da die häufigsten Ladevorgänge in Wohngebieten stattfinden werden, ist ein Vergleich von Gesamtladeprofilen mit normierten Haushaltslastprofilen von großem Interesse. Dieser wird für ein Szenario mit 200 Haushalten durchgeführt.

Finden die Ladevorgänge sofort nach der Ankunft zu Hause ungesteuert statt, kommt es zur Erhöhung der Abendlastspitze. Es wird gezeigt, dass mehrmaliges Laden pro Tag – ermöglicht durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur – diese Auswirkung mindert. Ein verbraucherseitig gesteuertes Laden hingegen hat die kontrollierte Verschiebung der Ladeenergie in die Nachtlastsenke zum Ziel. Dazu werden einige Szenarien erarbeitet, ihre Vor- und Nachteile geschildert und Realisierungsansätze geboten.

Abstract

The rapid growth of the power demand in the transport sector results in a dramatic increase of carbon dioxide emissions. This causes not only local environmental problems, but also contributes significantly to the global climate change. Against the background of these environmental and moreover some economic aspects, like rising crude oil prices and fuel costs, electric mobility has never been more in focus than today.

A future change from combustion engines to electric drives leads to additional loads, which gives rise to the necessity to take corrective measures in the energy supply sector. In order to be able to scrutinize the impacts on the power grid, a model has been developed with the help of the software MATLAB to generate stochastic load profiles for electric vehicles. MATLAB offers the possibility to vary a huge number of parameters. The model exclusively deals with electric vehicles with lithium ion batteries. All parameters originate from the transport statistics of the motorized individual traffic in Austria. In the end the calculated outcome of a driving profile mix for 100 battery-powered electric vehicles is consolidated into an overall load profile and the resulting implications are discussed. As a consequence of the assumption that most charging processes take place in residential areas, a comparison of the overall load profiles with standardized load profiles for regular households is carried out. The underlying scenario comprises 200 households.

If the charging processes are started immediately after the respective arrivals at home without being controlled, this will result in a rise of the evening load peak. It is shown that by means of several load cycles per day - provided the expansion of the charging infrastructure - this negative effect is limited. Anyway, the overall goal is a well controlled consumer-oriented charging process in order to shift the energy consumption to the night load depression. For this purpose several scenarios are elaborated and its advantages and drawbacks are described. Finally various approaches for the implementation of the highlighted scenarios are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung und Zieldefinition	1
1.3	Gliederung der Arbeit	2
2	Datenerhebung und Parameterfindung.....	4
2.1	Verkehrsdaten.....	4
2.2	Fahrzeugparameter	7
2.2.1	Auswahl des Energiespeichers	8
2.2.2	Ladecharakteristik der Li-Ionen-Batterie	9
3	Modellbildung und Profilerstellung.....	11
3.1	Modellaufbau.....	11
3.2	Das MATLAB-Programm	13
3.2.1	Programmstruktur.....	14
3.2.2	Programmeigenschaften	14
3.3	Auswahl der betrachteten Fahrprofile	18
3.3.1	Das Fahrprofil Berufspendler	19
3.3.2	Das Fahrprofil Dienstfahrer.....	19
3.3.3	Das Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe.....	20
3.3.4	Das Fahrprofil Freizeit	20
3.4	Normalverteilung der Beginnzeiten der Wege	22
3.4.1	Beginnzeiten Berufspendler	24
3.4.2	Beginnzeiten Dienstfahrer	25
3.4.3	Beginnzeiten private Erledigungen/Einkäufe	26
3.4.4	Beginnzeiten Freizeit.....	27
3.4.5	Einschränkungen	30
3.5	Streckenprofile der einzelnen Fahrprofile	30
3.6	Ladeprofile einzelner BEV der vier Fahrprofile.....	33
3.6.1	Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Berufspendler	33
3.6.2	Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Dienstfahrer	35
3.6.3	Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe.....	36
3.6.4	Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Freizeit.....	37
3.7	Ladestartzeitpunkte der vier Fahrprofile	38
3.8	Summenladeprofile der vier Fahrprofile	40
4	Ergebnisse, Vergleiche und Variationen	44
4.1	Gesamtladeprofil des Fahrprofilmixes aus 100 BEV	44
4.2	Vergleich von Gesamtladeprofil mit Haushaltslastprofilen.....	47
4.3	Parametervariationen	49
4.3.1	Variation der Anzahl der BEV	50
4.3.2	Variation der Weglängen.....	51
4.3.3	Variation der Standardabweichungen.....	53
4.3.4	Variation der Ladeleistung	54

5	Ladeszenarien und Umsetzungsstrategien	57
5.1	Das ungesteuerte Laden.....	57
5.1.1	Ladevorgang einmal pro Tag im betrachteten Netz	58
5.1.2	Ladevorgang nach jeder Fahrt an verschiedenen Orten	59
5.1.3	Ladevorgang nach jeder Fahrt im betrachteten Netz.....	60
5.2	Das gesteuerte Laden.....	61
5.2.1	Laden ab Punkt 22:00 Uhr.....	62
5.2.2	Verteiltes Laden in einem Zeitfenster	63
5.2.3	Optimiertes Laden in den Lastsenken	65
6	Schlussfolgerungen	68
7	Zusammenfassung	70
	Literaturverzeichnis.....	72
	Abkürzungsverzeichnis.....	74
	Abbildungsverzeichnis.....	75
	Tabellenverzeichnis.....	79

1 Einleitung

Die Elektromobilität ist zwar kein Allheilmittel, aber möglicherweise die beste Alternative zu Benzin und Diesel. Der Energiebedarf des Verkehrssektors wächst mit einer beunruhigenden Geschwindigkeit, insbesondere stärker als in allen anderen Sektoren des Endverbraucherbereichs. Da fast ausschließlich fossile Treibstoffe zur Deckung des benötigten Energiebedarfs im Einsatz sind, lassen die daraus resultierenden CO₂-Emissionen nichts Gutes für die Zukunft unserer Umwelt erwarten. Um eine Reduktion der klima- und umweltrelevanten Schadstoffe zu erreichen, ist der Suche nach alternativen Antriebskonzepten und Energieträgern höchste Priorität zuzuordnen, was unweigerlich zur elektrischen Mobilität führt.

1.1 Motivation

Elektrofahrzeuge haben eine lange Geschichte. Schon die ersten Autos wurden elektrisch angetrieben. Jedoch verdrängte der Verbrennungskraftmotor dieses Antriebskonzept komplett. Auslöser dafür waren die unzureichenden Energiespeicher. Damalige Batterien besaßen zu geringe Reichweiten bei zu großem Gewicht und Volumen. Heute reichen die Energiedichten zumindest für den Einsatz der elektrischen Mobilität im Nahverkehr aus. Die Investitionskosten der Elektroautos liegen hingegen heute immer noch über jenen handelsüblicher Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmotoren. Getrieben von den steigenden Preisen fossiler Treibstoffe, der Verknappung der Öl-Reserven und der Umweltproblematik, wird die Elektromobilität in den nächsten Jahren weiter an Wichtigkeit zunehmen. Das notwendige Potential hat der elektrische Antrieb auf jeden Fall: Elektrofahrzeuge erreichen eine viel höhere Effizienz verglichen mit konventionellen Fahrzeugen. Sie verursachen geringere lokale Umweltbelastungen, ermöglichen die Nutzung regenerativer Energieträger und könnten sogar zur Rückspeisung von Energie in das elektrische Verteilnetz herangezogen werden.

1.2 Problemstellung und Zieldefinition

Die Infrastruktur zum Laden der Batterien in Elektrofahrzeugen ist im Wesentlichen durch das elektrische Verteilnetz schon gegeben. Allerdings verursacht ein Umstieg vom

Verbrennungskraftmotor auf den elektrischen Antrieb einen Mehrbedarf an elektrischer Energie¹ und bewirkt eine zusätzliche Netzbelastung. Darauf muss mit einer Adaption der Kraftwerkskapazität und der Netzstruktur reagiert werden. Solche Änderungen beanspruchen von der Planung bis zur Umsetzung viele Jahre. Deshalb ist es notwendig, schon jetzt das Verhalten einer großen Anzahl von Elektrofahrzeugen im elektrischen Netz abzuschätzen. In dieser Arbeit wurde dafür ein Bottom-Up Ansatz gewählt, bei dem vom einzelnen Fahrzeug ausgegangen und über die Modellierung der Ladeprofile auf den gesamten Leistungsbedarf geschlossen wird.

Daraus ergibt sich folgende Zieldefinition für diese Arbeit:

Erhebung relevanter Eingangsgrößen und Parameter zur Erstellung eines Modells, welches die Analyse von stochastischen Ladeprofilen mobiler Energiespeicher entsprechend einiger entwickelter Szenarien zulässt. Die Realisierung soll mit Hilfe der Software MATLAB erfolgen und eine vielfältige Variation der Parameter ermöglichen. Dabei sind mögliche Ladestrategien zu erarbeiten und zukünftige Aufgaben und Entwicklungsschritte für die Ladelogistik von Elektrofahrzeugen zu formulieren.

1.3 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist abgesehen von der Einleitung in fünf weitere Kapitel unterteilt. Im ersten wird ein Überblick über die verwendeten Verkehrs- und Fahrzeugdaten gegeben, und ausgewählte Parameter werden erläutert. Danach folgt das umfangreichste Kapitel, in dem zu Beginn das verwendete Modell erklärt und anschließend Schritt für Schritt die Entstehung der Ladeprofile behandelt wird. Im Anschluss wird das gewonnene Gesamtladeprofil analysiert und mit Haushaltslastprofilen verglichen. Darauf folgt ein Kapitel, in dem mehrere Szenarien unterschiedlicher Ladestrategien erstellt und die Ergebnisse besprochen werden. Abgerundet wird diese Arbeit durch die Formulierung der Schlussfolgerungen und einer Zusammenfassung.

¹ Hier eine grobe Abschätzung: Laut [1] gibt es derzeit rund 4,3 Millionen Pkw in Österreich, mit denen nach [3] durchschnittlich 13.500 km pro Jahr zurückgelegt werden. Unter der Annahme, dass 25 % der Pkw in Österreich rein elektrisch betrieben werden und diese einen Verbrauch von 0,20 kWh/km verursachen, ergibt sich ein Energiebedarf von 2,9 TWh/a. Im Jahr 2007 betrug der energetische Endverbrauch elektrischer Energie in Österreich nach [4] 57,6 TWh. Somit würde der Mehraufwand rund 5 % des Endverbrauchs entsprechen.

Da nicht die gesamte Realität sondern nur Teile davon in einem Modell abgebildet werden können, ist die richtige Wahl der Eingangsgrößen von ganz entscheidender Bedeutung. Deshalb wird den verwendeten Verkehrs- und Fahrzeugdaten und den daraus definierten Parametern zu Beginn ein Kapitel gewidmet.

Im anschließenden Kapitel wird das vereinfachte Modell vorgestellt und die ausgewählten Fahrprofile im Detail beschrieben. Weiters wird kurz auf die Software MATLAB eingegangen und Struktur und Funktion des selbst erstellten Programms erläutert. Darauf folgt die Nachbildung der Beginnzeiten durch Normalverteilungen, deren Eigenschaften erklärt werden. Jedes Fahrprofil besitzt ein eigenes Streckenprofil, Ladezustandsprofil und Ladeprofil. Diese werden grafisch dargestellt und deren Besonderheiten besprochen.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich eingangs mit der Analyse des Gesamtladeprofiles von 100 BEV der vier Fahrprofile. Dabei wird vor allem auf die Extremwerte der benötigten Leistung eingegangen. Danach erfolgt ein Vergleich des Gesamtladeprofiles von 100 BEV mit dem Haushaltlastprofil H0 Winter von 200 Haushalten. Nachfolgend werden noch die Auswirkungen von Parametervariationen auf das Gesamtladeprofil erläutert.

Im anschließenden Kapitel wird auf drei erarbeitete Szenarien des ungesteuerten Ladens eingegangen und die resultierenden Gesamtladeprofile dargestellt. Weiters werden auch drei Strategien des gesteuerten Ladens vorgestellt und deren Umsetzung und Auswirkungen besprochen. Nach einer Schlussfolgerung wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung beendet.

2 Datenerhebung und Parameterfindung

Damit ein Modell für die Berechnung der werktäglichen Lastprofile von Elektrofahrzeugen entworfen werden kann (siehe Kapitel 3), muss zuvor auf die benötigten bzw. verwendeten Daten und Parameter eingegangen werden. Diese können in zwei Gruppen unterteilt werden, nämlich Verkehrsdaten und Fahrzeugparameter.

Zur Nachbildung der täglichen Wege von Elektrofahrzeugen müssen folgende verkehrsrelevante Fragen beantwortet werden:

- Wie viele Strecken werden pro Tag mit dem Auto zurückgelegt?
- Zu welchen Uhrzeiten beginnen die Fahrten, und wann enden sie wieder?
- Wie viele Kilometer werden pro Weg gefahren?

Um im Anschluss von den täglich zurückgelegten Strecken auf den dafür benötigten Leistungs- bzw. Energiebedarf zu schließen, bedarf es noch der Klärung folgender Punkte, welche das Elektrofahrzeug und dessen Eigenschaften betreffen:

- Wie viel Energie wird pro zurückgelegtem Kilometer benötigt?
- Welche Batterie wird für die Energiespeicherung verwendet, und welche Parameter weist diese auf?
- Wie sieht die Ladecharakteristik dieser Batterie aus?
- An welchen Orten wird das Fahrzeug abgestellt, und besteht dort eine Möglichkeit die Batterie zu laden?

Die Beantwortung dieser Fragen wird in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgenommen.

2.1 Verkehrsdaten

Der Bestand aller Personenkraftwagen in Österreich betrug im Jahre 2008 rund 4,3 Mio. Fahrzeuge. Davon waren laut [1] nur 146 mit einem Elektroantrieb ausgestattet. Diese geringe Zahl von Elektrofahrzeugen ist wahrscheinlich der Grund, warum es noch keine ausreichenden Verkehrsstudien gibt, die sich im Speziellen mit der elektrischen Mobilität

auseinandersetzen. Dadurch gestaltete sich die Suche nach verwertbaren Unterlagen zur Beschreibung des Fahrverhaltens von Elektrofahrzeugen als äußerst schwierig und mühsam. Zu guter Letzt wurde mit dem bmvit (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) ein Partner gefunden, der die nötigen Verkehrsstudien lieferte. Die Daten, welche in dieser Arbeit verwendet werden, beziehen sich auf den gesamten motorisierten Individualverkehr und somit auf Fahrzeuge aller Antriebsarten in Österreich. Dies ist sinnvoll, da der MIV den Hauptanteil am Modal-Split ausmacht. Die Aufteilung des Modal-Splits für Niederösterreich ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

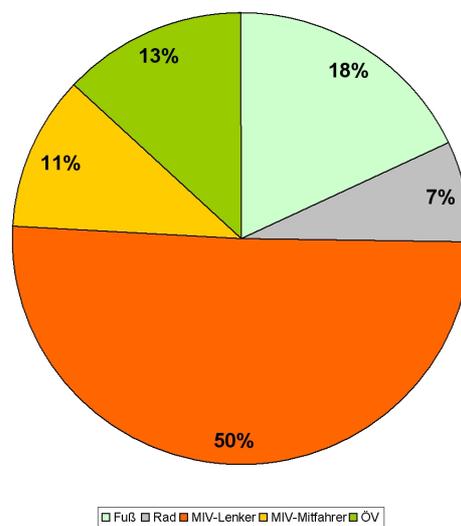


Abbildung 2.1: Aufteilung des Modal-Splits in Niederösterreich 2003 [2]

Aus den vorhandenen Daten wurden für den Bereich Verkehr folgende vier Eingangsparameter ausgewählt, welche sich alle auf Werkzeuge beziehen:

- Anzahl der Wege pro Tag
- Beginnzeiten der Wege
- Strecke pro Weg
- Zeitdauer pro Weg

Laut [2] werden pro Tag im Durchschnitt 3,7 Wege zurückgelegt. Die Beginnzeiten der Wege nach [5] sind für vier unterschiedliche Wegzwecke in Abbildung 2.2 dargestellt. Auskunft über die durchschnittliche Länge pro Strecke laut [6] gibt die Abbildung 2.3,

und die durchschnittliche Dauer der Wege nach Wegzweck und Geschlecht werden in Abbildung 2.4 gezeigt.

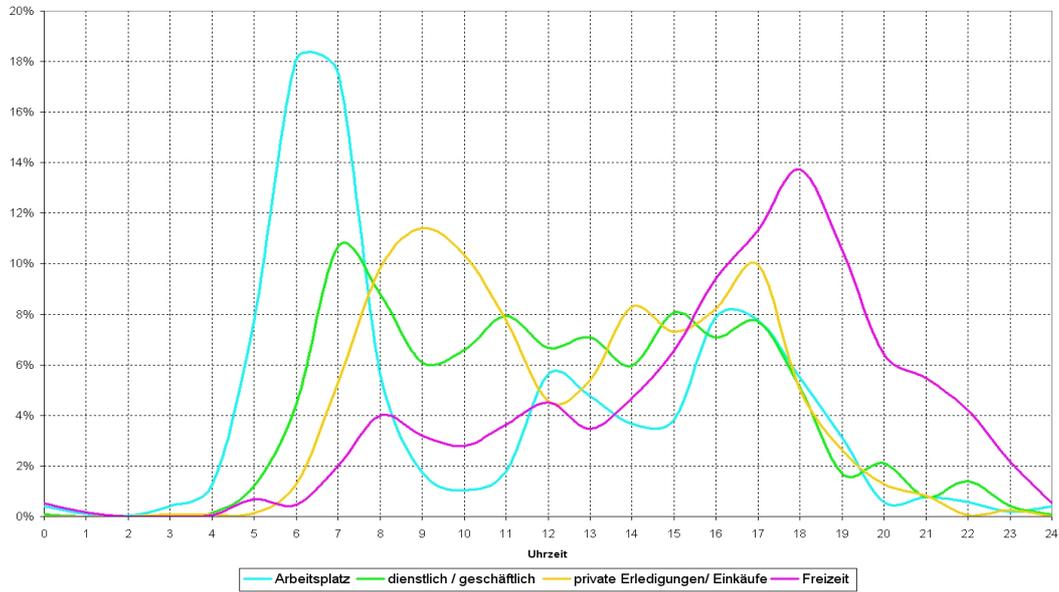


Abbildung 2.2: Werktäglich zeitlicher Verlauf der Beginnzeiten der Wege pro Tag nach Wegzweck in Niederösterreich 2003

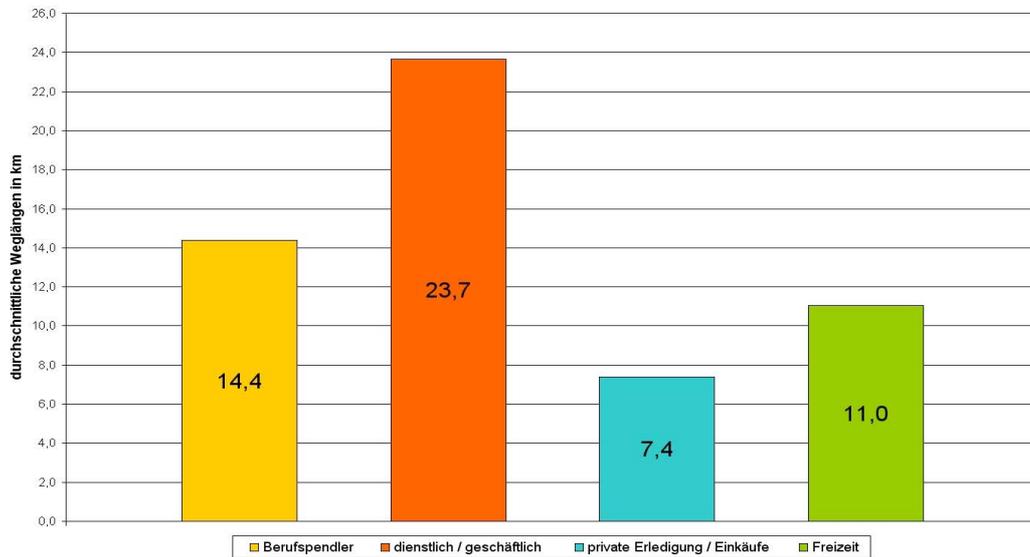


Abbildung 2.3: Durchschnittliche Längen der werktäglichen Wege des österreichischen MIV nach Wegzweck 1995

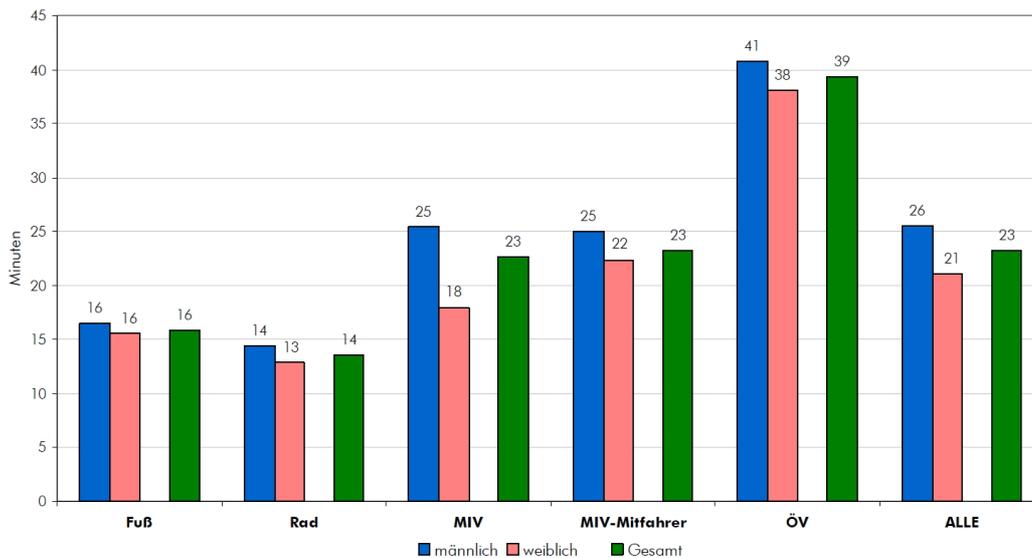


Abbildung 2.4: Durchschnittliche werktägliche Wegdauer in Minuten nach Wegzweck und Geschlecht Österreich 1995 [2]

2.2 Fahrzeugparameter

Im Unterkapitel 2.1 wurden die Parameter zur Beschreibung des Fahrverhaltens möglicher Lenker von Elektrofahrzeugen ausgewählt. Jene Parameter, die das Fahrzeug, den Energiespeicher und deren Eigenschaften betreffen, werden hier beschrieben. Diese sind:

- Grid-to-Wheel-Verbrauch
- Batterienennenergiemenge
- Ladecharakteristik

Der Verbrauch eines Fahrzeuges ist im Wesentlichen von der Größe und dem Gewicht abhängig. Je höher die beiden Faktoren, desto größer fallen Roll- und Luftwiderstand aus, und damit wächst auch der Energiebedarf zur Beschleunigung sowie zur Überwindung von Steigungen. Der Grid-to-Wheel-Verbrauch wird in [7] je nach Art des Fahrzeuges mit 0,12 kWh/km bis 0,16 kWh/km angegeben. Betrachtet man den Verbrauch gemeinsam mit der Distanz, welche mit einer Batterieladung zurückgelegt werden soll, kommt man zur Batterienennenergiemenge. Diese beträgt je nach betrachtetem Fall laut [7] zwischen 10 kWh und 25 kWh.

2.2.1 Auswahl des Energiespeichers

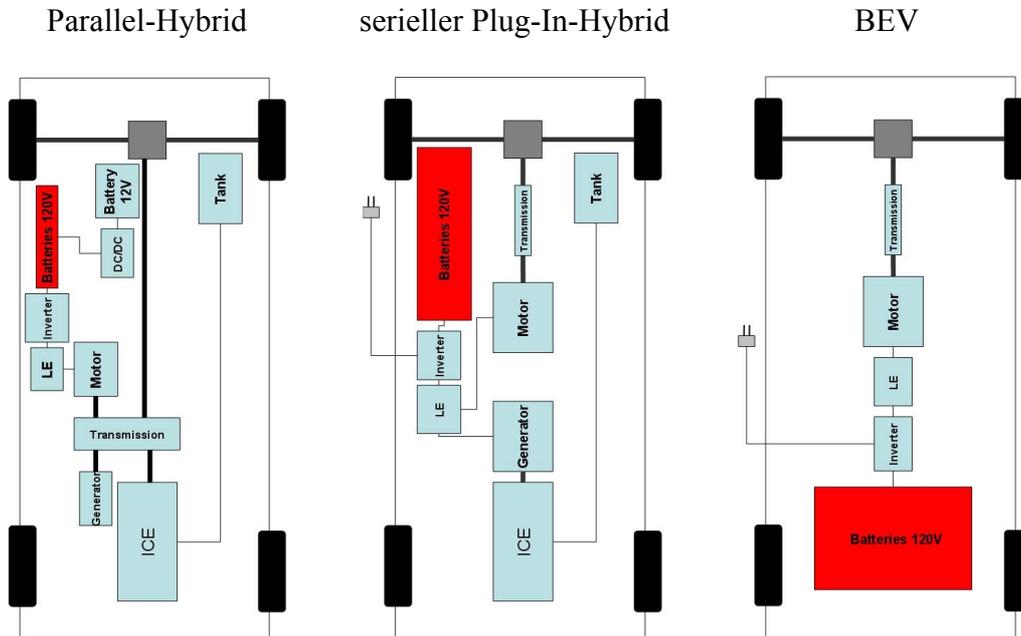


Abbildung 2.5: Vergleich Parallel-Hybrid, serieller Plug-In-Hybrid und reines Elektrofahrzeug (in Anlehnung an [9])

In Abbildung 2.5 ist der schematische Aufbau eines Parallel-Hybrids, eines seriellen Plug-In-Hybrids und eines BEV dargestellt. Sie zeigt deutlich, dass die Batterie des BEV wesentlich größer als die der Hybrid-Fahrzeuge auszulegen ist. Die typischen Batteriegrößen beim Parallel-Hybrid liegen bei rund 2 kWh und beim BEV zwischen 15 kWh und 25 kWh. Dazwischen sind die Batteriekapazitäten des seriellen Plug-In-Hybrids einzuordnen.

Beim BEV muss auf Grund des Fehlens eines Verbrennungskraftmotors, die gesamte Antriebsenergie aus der Batterie geholt werden. Daraus wird klar, dass der Erfolg der elektrischen Mobilität im Wesentlichen von den Entwicklungen am Batteriesektor abhängig ist. Für die folgende Modellierung der Lastprofile wurden – wie in [7] – Lithium-Ionen-Batterien gewählt, da sie im Vergleich zu NiMH- und ZEBRA-Batterien höhere spezifische Leistungs- und Energiedichten aufweisen (siehe Abbildung 2.6). Weiters schneiden die Li-Ionen-Batterien nach [7] in den Bereichen Hochstromfähigkeit und Effizienz sehr gut ab und besitzen ein großes Weiterentwicklungspotenzial.

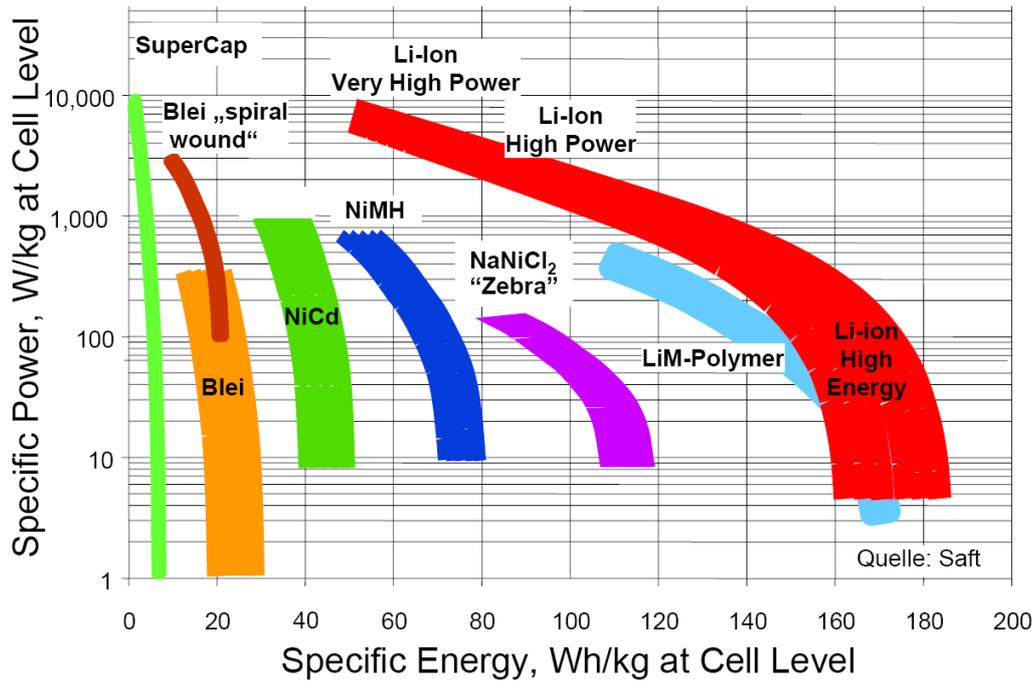


Abbildung 2.6: Vergleich verschiedener Batteriesysteme [10]

2.2.2 Ladecharakteristik der Li-Ionen-Batterie

Laut [7] ist das übliche Ladeverfahren von Li-Ionen-Batterien die IUa-Ladung. Dieses Verfahren besteht aus zwei hintereinander folgenden Phasen. In der ersten Phase wird mit konstantem Strom und in der zweiten Phase mit konstanter Spannung geladen. Da sich in der Stromphase die Zellenspannung nur gering ändert, wird in dieser Phase auch die Ladeleistung als konstant angenommen. Die Stromphase endet, wenn der Ladeumschalt- punkt s in % des SOC erreicht worden ist. Danach folgt die Spannungsphase, deren Ladeleistung P ergibt sich laut [7] zu

$$P = P_{\text{konst}} + e^{\frac{s-\text{SOC}}{kl}} \quad (2.1)$$

P_{konst} ... Konstantladeleistung der Stromphase

s Ladeumschalt- punkt

SOC... state of charge (auf deutsch “Ladezustand”)

kl Ladeabschaltstrom

$$kl = \frac{100 - s}{\ln\left(\frac{P_{konst}}{P_{LS}}\right)} \quad (2.2)$$

$$P_{LS} = \frac{U_{LS}}{U_N} \cdot I_{LS} \cdot E_{Batt} \quad (2.3)$$

P_{LS} Ladeabschaltleistung

U_{LS} Ladeschlussspannung

U_N Nennspannung

I_{LS} Ladeabschlussstrom

E_{Batt} ... Nennenergiemenge

Bis auf die Nennenergiemenge der Batterien ist die Ladecharakteristik für alle im Modell verwendeten Batterien gleich. Abbildung 2.7 zeigt zusammenfassend die abgegebene Ladeleistung des Ladegeräts, und in Tabelle 2.1 sind die Werte der verwendeten Batterieparameter angeführt. Die Parameter wurden aus [7] übernommen. Bei einer Ladung über eine Steckdose (230 V~, 16 A) kann eine maximale Leistung von 3,68 kW entnommen werden. Unter Berücksichtigung eines Ladegerätwirkungsgrades von 97 % ergibt sich eine maximale Konstantladeleistung von 3,57 kW.

Konstantladeleistung	P_{konst}	3,57 kW
Ladeumschaltpunkt	s	80 %
Ladeschlussspannung	U_{LS}	4,2 V
Nennspannung	U_N	3,6 V
Ladeabschlussstrom	I_{LS}	0,03 C-Rate

Tabelle 2.1: Konstantladeleistung, Ladeumschaltpunkt, Ladeschlussspannung, Nennspannung und Ladeabschlussstrom der verwendeten Ladecharakteristik der Li-Ionen-Batterien

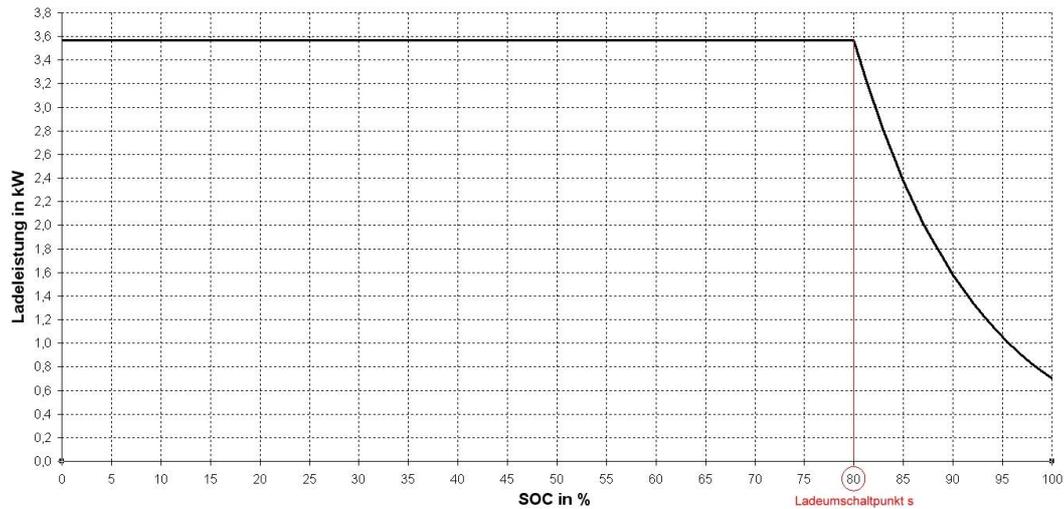


Abbildung 2.7: Ladeleistungsverhalten in Abhängigkeit des Ladestandes SOC von Li-Ionen-Batterien (in Anlehnung an [7])

3 Modellbildung und Profilerstellung

Die Realität ist ein System, das auf Grund seiner enormen Komplexität weder vollständig erfasst noch abgebildet werden kann. Um trotzdem Analysen durchführen und Aussagen über die Zukunft treffen zu können, tritt ein abstraktes Abbild an ihre Stelle. Dieses Abbild wird als Modell bezeichnet und repräsentiert Teilstücke der Realität. Das Modell wird nun stellvertretend für das gesamte System untersucht.

3.1 Modellaufbau

Ziel dieser Modellbildung ist es, mit Hilfe eines selbst erstellten MATLAB-Programms möglichst genaue werktägliche Ladeprofile von Elektrofahrzeugen zu erhalten. Den Eingang des Modells bildet ein Mix aus unterschiedlichen Fahrprofilen. Dabei besteht jedes Fahrprofil aus einer Vielzahl von Elektrofahrzeugen. Innerhalb eines Fahrprofils besitzen alle BEV dieselben Verkehrs- und Fahrzeugdaten. Das MATLAB-Programm berechnet dann für jedes BEV das entsprechende Ladeprofil und summiert die erhaltenen Ergebnisse zu einem Gesamtladeprofil des Fahrprofilmixes auf. Dieses Gesamtladeprofil stellt den Ausgang des Modells dar und wird in weiterer Folge für Vergleiche mit

Haushaltslastprofilen und zur Erstellung verschiedener Szenarien und Ladestrategien herangezogen. In Abbildung 3.1 wird ein Überblick des Modells gegeben.

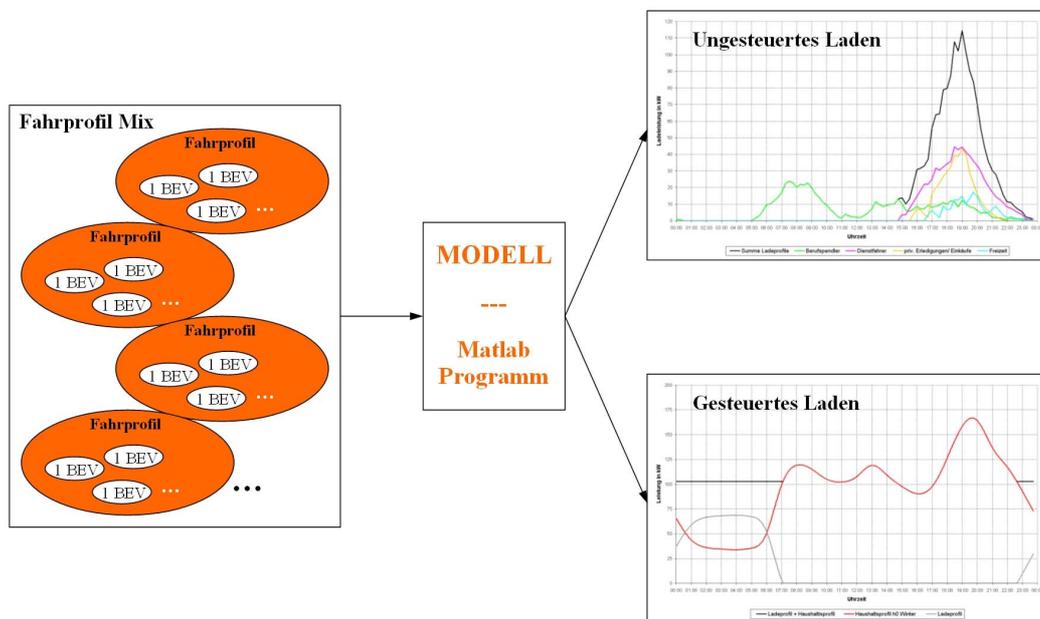


Abbildung 3.1: Modellüberblick

Die Gesamtheit aller Modellparameter, welche sich aus den sieben – im Kapitel 2 auf Seite 4 – formulierten Fragestellungen ergeben, ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. Auf der linken Seite sind die Eingangsparameter zusammengefasst, wobei sich die gold hinterlegten Felder auf die Verkehrsdaten beziehen, die dunkelrot hinterlegten Felder die Fahrzeugparameter und die orange hinterlegten Felder die Ladeparameter darstellen. Auf der rechten Seite befindet sich der Modellausgang mit den berechneten Ladeprofilen verschiedener Szenarien.

Eingangsgrößen

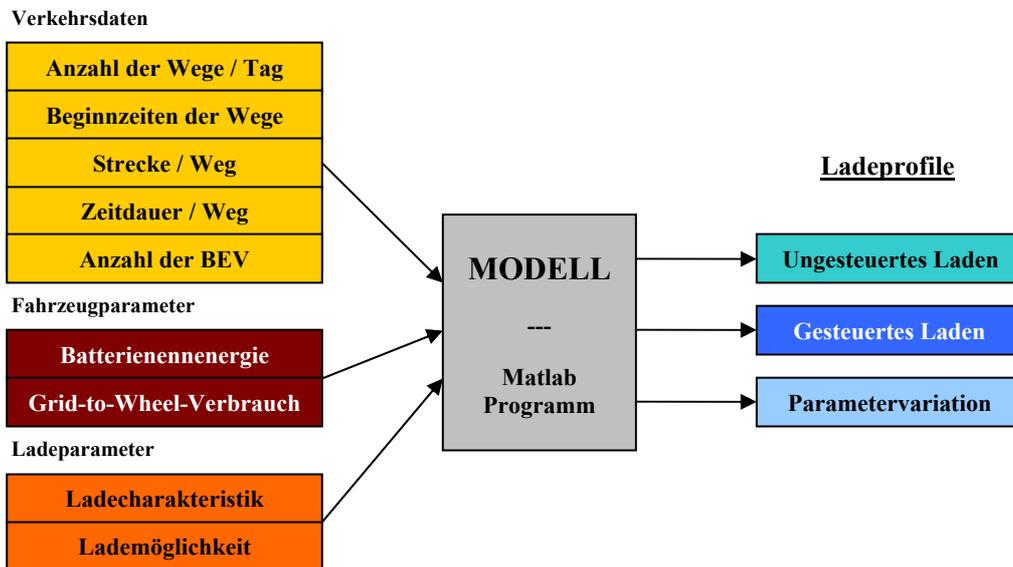


Abbildung 3.2: Auflistung aller für das Modell verwendeten Eingangsparameter und Ausgangsgrößen

3.2 Das MATLAB-Programm

Dieses Unterkapitel liefert einen groben Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise des MATLAB-Programms².

Vorweg soll eine kurze Erläuterung die verwendete Software erklären. MATLAB ist plattformunabhängig und dient der Lösung von mathematischen Problemen. Primär ist die Software für eine numerische Berechnung mit Hilfe von Matrizen ausgelegt. Hiervon leitet sich auch der Name ab: MATrix LABoratory.

Programmiert wird unter MATLAB in einer proprietären Programmiersprache. Der Programmcode wird in so genannten m-Files, das sind einfache ASCII-Textdaten, abgespeichert. MATLAB bietet auch die Möglichkeit mit Hilfe von GUI (engl. „Graphical User Interface“) eine graphische Benutzeroberfläche zu gestalten. Dies führt zu einer benutzerfreundlichen Interaktion mit dem Programm.

² Für nähere Informationen, siehe [11]

3.2.1 Programmstruktur

Das selbst geschriebene MATLAB-Programm zur Erstellung und Modellierung von Ladeprofilen wurde so ausgelegt, dass jeder relevante Parameter einfach editiert werden kann und man somit rasch und unkompliziert zu Ergebnissen verschiedener Szenarien kommt. Diese können graphisch in Diagrammen angezeigt und ausgedruckt bzw. zur weiteren Verarbeitung oder Archivierung in externen Dateien gespeichert werden. Es besteht die Möglichkeit, die einzelnen Werte des Ergebnisses wahlweise in Abständen von einer Minute oder einer Viertelstunde berechnen zu lassen. Nachfolgend werden die Eigenschaften der einzelnen Unterprogramme kurz beschrieben.

3.2.2 Programmeigenschaften

Stellvertretend für alle Module des MATLAB-Programms ist der Aufbau des Unterprogramms „Berechnung – ungesteuertes Laden“ in vereinfachter Form als Flussdiagramm in Abbildung 3.3 dargestellt. Die genaue Erläuterung oder Auflistung des gesamten Programmcodes ist nicht Teil dieser Arbeit und würde darüber hinaus zu umfangreich ausfallen. Das Hauptmenü des MATLAB-Programms ist in Abbildung 3.4 ersichtlich. Von diesem gelangt man in folgende fünf Unterprogramme:

Erstellen und Editieren der Profile

Hier wird dem Benutzer ermöglicht, jeden relevanten Parameter der vier Fahrprofile zu editieren. Das fertige Fahrprofil kann anschließend in einer Datei gespeichert und zu einem anderen Zeitpunkt wieder geladen werden.

Berechnung – ungesteuertes Laden

In diesem Unterprogramm können das Streckenprofil und der Verlauf der Ladekapazität SOC für ein einzelnes BEV, wie auch das Ladeprofil für ein oder mehrere BEV, berechnet werden. Weiters ist es möglich, die Ladeleistung des Fahrprofilmixes anzuzeigen und mit verschiedenen Haushaltslastprofilen zu vergleichen. Die berechneten Daten können in eine CSV-Datei (engl. „comma separated volume“) exportiert werden, um weitere Verarbeitungsschritte z.B. in EXCEL zu ermöglichen.

Berechnung – gesteuertes Laden

Hier können verschiedenste Szenarien des gesteuerten Ladens erstellt und abgebildet werden. Durch Eingabe einer Start- und Endzeit kann ein Ladefenster definiert werden, in dem die einzelnen BEV geladen werden dürfen. Das Programm berechnet damit die Ladeleistung des im Unterprogramm „Erstellen und Editieren der Profile“ definierten Fahrprofilmixes und ermöglicht den graphischen Vergleich mit Haushaltslastprofilen. Weiters können auch Szenarien erstellt werden, die auf das Laden während der Senke der Haushaltslast (z.B. in der Nacht) optimiert sind. Alle Ergebnisse können zum Archivieren oder Weiterverarbeiten in eine Datei gespeichert werden.

Analyse von Parametervariationen

Dieses Unterprogramm ermöglicht eine Variation verschiedener Parameter und stellt die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Ladeprofil des Fahrprofilmixes dar. Über ein Eingabefeld sind Stärke und Anzahl der Variationen veränderbar. Die Ergebnisse können mit Haushaltslastprofilen graphisch verglichen bzw. in Dateien exportiert und gespeichert werden.

Konfiguration - Ladecharakteristik

Dieses Unterprogramm ermöglicht dem Benutzer noch weitere Variablen zu editieren. Dazu gehören:

- Batterie- und Ladeparameter
(z.B. Batterienennspannung und Ladeschlussspannung)
- Haushaltssparameter
(z.B. Anzahl und Jahresenergiebedarf der Haushalte)
- Parameter für das gesteuerte Laden

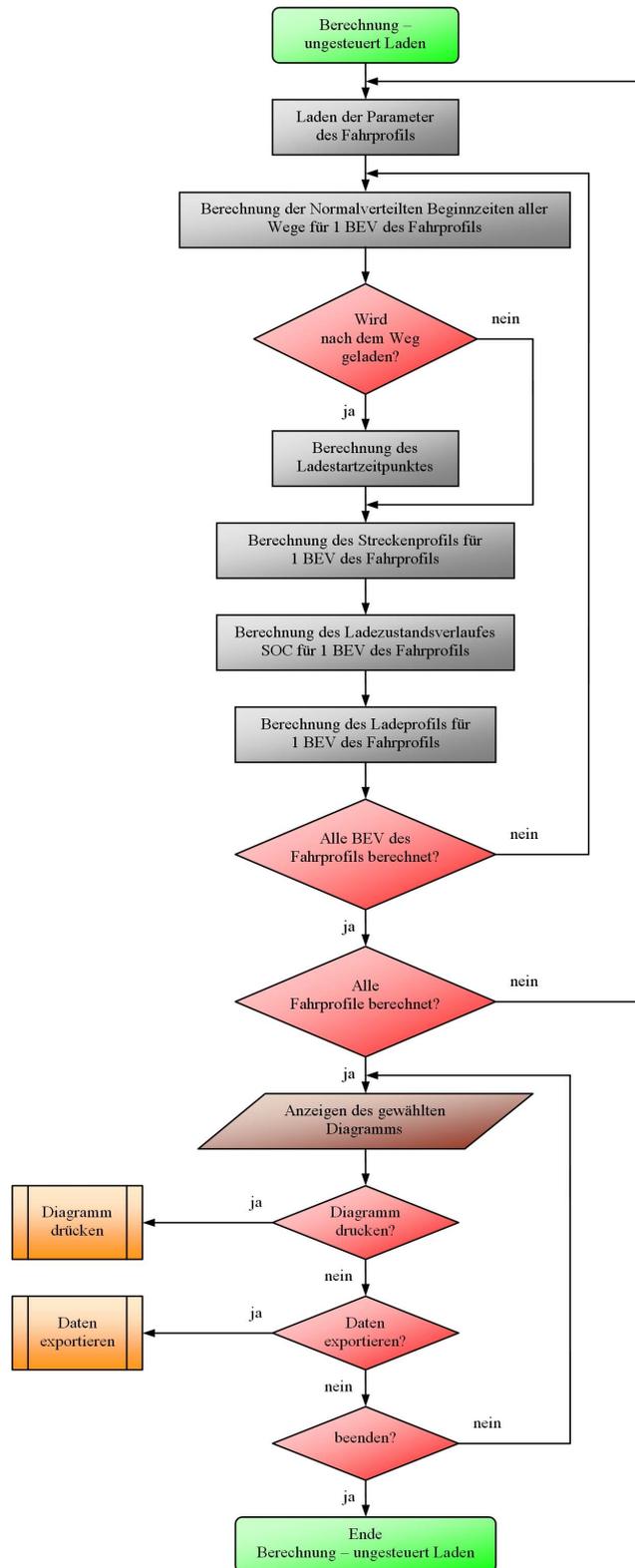


Abbildung 3.3: Flussdiagramm für das Unterprogramm „Berechnung – ungesteuertes Laden“

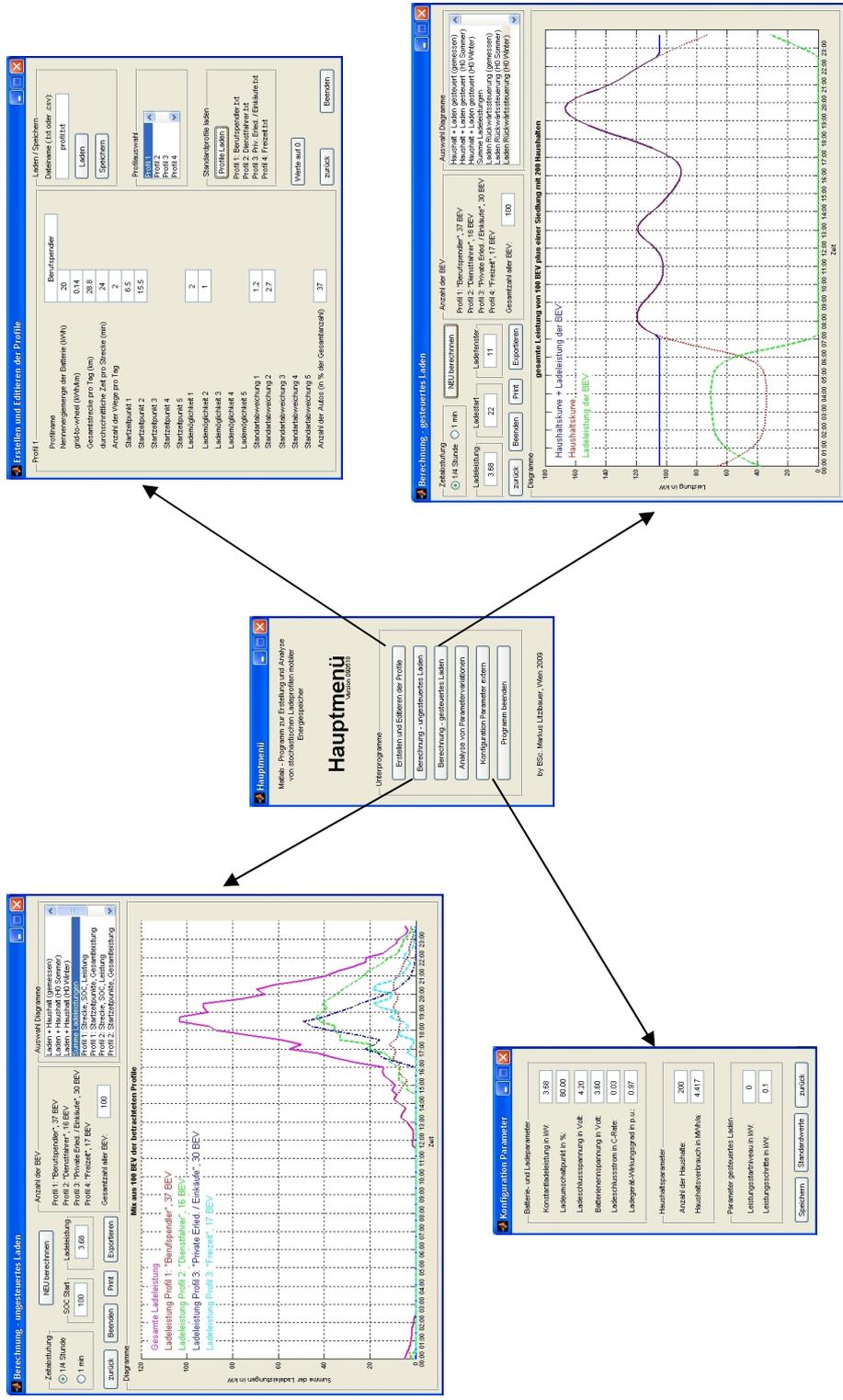


Abbildung 3.4: Hauptmenü und Unterprogramme des MATLAB-Programms

3.3 Auswahl der betrachteten Fahrprofile

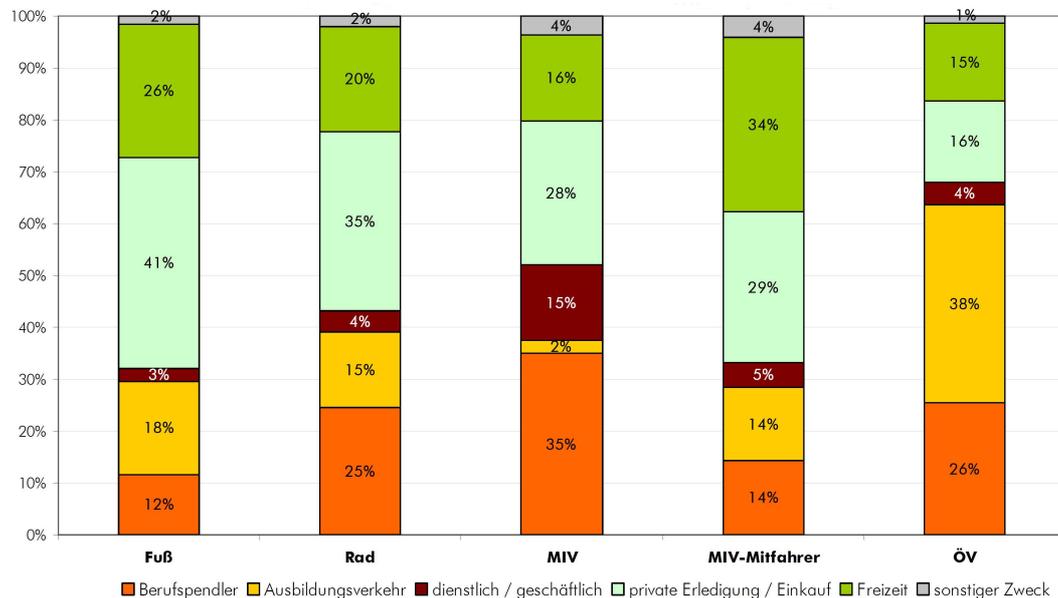


Abbildung 3.5: Anteil der werktäglichen Wege nach Wegzweck und Modal-Split Österreich 1995 [2]

Die Grundlage der Fahrprofilauswahl bildet die mittlere Säule in Abbildung 3.5, welche die Anteile der werktäglichen Wege nach Wegzweck für den motorisierten Individualverkehr in Österreich darstellt. Die vier häufigsten Wegzwecke – das sind Berufspendler, private Erledigungen/Einkäufe, dienstlich/geschäftlich (später als Dienstfahrer bezeichnet) und Freizeit – bilden die in weiterer Folge verwendeten Fahrprofile. Das Fahrprofil Freizeit ist im Vergleich zu [7] eine Erweiterung um ein viertes Profil und somit eine Verfeinerung des Modells. Die Vereinigung dieser vier Fahrprofile stellt den zu betrachtenden Fahrprofilmix dar. In den nachfolgenden Unterabschnitten wird auf die Details der einzelnen Fahrprofile eingegangen. Dabei beziehen sich die gesamten Werte stets auf Werktage.

Wären die Fahrprofile auf die Aufteilung der Wegzwecke eines Sonntags (anstatt eines Werktags) bezogen, würde das Fahrprofil Freizeit stark dominieren (siehe Abbildung 3.6). Da Sonn- und Feiertage keine typischen Fahrmuster aufweisen, müssten diese gesondert betrachtet werden.

3.3.3 Das Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe

Die BEV dieses Fahrprofils legen pro Weg im Mittel 7,4 Kilometer [6] zurück und benötigen für eine Strecke durchschnittlich 16 Minuten [2]. Laut [7] werden pro Tag vier solcher Wege absolviert. Wie bei den beiden vorhergehenden Fahrprofilen wurden auch bei diesem der Grid-to-Wheel-Verbrauch und die Nennenergiemenge der Batterie von [7] übernommen. Die Werte der Parameter betragen 0,12 kWh/km und 20 kWh. In diesem Fahrprofil werden die Batterien nur zu Hause nach der letzten Fahrt geladen.

3.3.4 Das Fahrprofil Freizeit

Beim letzten Fahrprofil beträgt die durchschnittliche Weglänge laut [6] 11 km und wird zweimal pro Tag zurückgelegt. Die im Mittel pro Strecke benötigte Zeit ist 25 Minuten [2]. Grid-to-Wheel-Verbrauch und Batterienennenergiemenge sind identisch mit jenen Annahmen vom Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe und besitzen die Werte 0,12 kWh/km und 10 kWh. Das Aufladen der Li-Ionen-Batterie findet nur zu Hause einmal pro Tag nach der letzten Fahrt statt.

Zur besseren Veranschaulichung wurden in Tabelle 3.1 alle relevanten Parametergrößen der vier Fahrprofile gemeinsam aufgelistet. Nähere Informationen zur Wahl der eingesetzten Werte der Standardabweichungen σ und Erwartungswerte μ werden noch im Unterkapitel 3.4 gegeben.

Fahrprofile	Berufspendler	Dienstfahrer	private Erledigungen/ Einkäufe	Freizeit
Nennenergiemenge der Batterie	20 kWh	25 kWh	10 kWh	10 kWh
Grid-to-Wheel-Verbrauch	0,14 kWh/km	0,16 kWh/km	0,12 kWh/km	0,12 kWh/km
Gesamtstrecke / Tag	28,8 km	71 km	29,6 km	22,1 km
Zeitdauer / Strecke	24 min	36 min	16 min	25 min
Anzahl der Wege / Tag	2	3	4	2
Erwartungswert μ_1	06:30 Uhr	07:15 Uhr	08:15 Uhr	11:30 Uhr
Standardabweichung σ_1	1,2 h	1,25 h	1,3 h	3,5 h
Erwartungswert μ_2	15:30 Uhr	11:30 Uhr	10:15 Uhr	18:00 Uhr
Standardabweichung σ_2	2,7 h	1,7 h	1,3 h	1,5 h
Erwartungswert μ_3	---	16:30 Uhr	14:15 Uhr	---
Standardabweichung σ_3	---	1,7 h	1,25 h	---
Erwartungswert μ_4	---	---	15:15 Uhr	---
Standardabweichung σ_4	---	---	1,1 h	---
Lademöglichkeit nach Weg 1	am Arbeitsplatz	nicht gegeben	nicht gegeben	nicht gegeben
Lademöglichkeit nach Weg 2	zu Hause	nicht gegeben	nicht gegeben	zu Hause
Lademöglichkeit nach Weg 3	---	zu Hause	nicht gegeben	---
Lademöglichkeit nach Weg 4	---	---	zu Hause	---
Anzahl der BEV ³	37	16	30	17

Tabelle 3.1: Auflistung der gewählten Werte aller relevanten Parameter für die vier betrachteten Fahrprofile

³ Das Zustandekommen der Fahrzeugaufteilung wird im Unterkapitel 3.7 erläutert.

3.4 Normalverteilung der Beginnzeiten der Wege

Als Basis für die Beginnzeiten der täglichen Wege jedes Fahrprofils wird die Abbildung 2.2 aus dem Unterkapitel 2.1 herangezogen. Sie stellt den zeitlichen Verlauf der werktäglichen Beginnzeiten der Wege pro Tag nach Wegzeck dar. Die Daten beziehen sich ausschließlich auf den motorisierten Individualverkehr in Österreich und nicht auf den gesamten Modal-Split.

In dieser Arbeit werden die Beginnzeiten der Wege der einzelnen BEV mit Hilfe von Normalverteilungen stochastisch nachgebildet. Dies ist wohl der bedeutendste Unterschied zum Modell aus [7], bei dem eine Gleichverteilung angewendet wurde. Der Vorteil der Normalverteilung liegt darin, dass mit den Gaußschen Glockenkurven auf die Form des Verlaufs der Beginnzeiten der Wege eingegangen werden kann. Das bedeutet: Starten laut Verkehrsstatistik in einem Zeitraum besonders viele Fahrzeuge, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Wegstart in diesem Zeitbereich auch im Modell besonders groß. Bei einer Gleichverteilung ist dies nicht möglich, dabei kann lediglich ein Bereich, in dem die Fahrzeuge ihre Wege starten, abgesteckt werden. Innerhalb dieses Zeitbereiches ist die Wahrscheinlichkeit für einen Wegstart aber für alle Zeitpunkte gleich.

Die Normalverteilung ist nach [12] formal folgendermaßen definiert:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (3.1)$$

x...Zufallsvariable

σ ...Erwartungswert

μ ...Standardabweichung

Für das Modell dieser Arbeit ist die Zufallsvariable eine Uhrzeit, die in einem Zeitraum von einem Tag, also von 00:00 Uhr bis 24:00 Uhr definiert ist. Der Erwartungswert μ ist jene Uhrzeit, die die Lage des Mittelpunktes der Normalverteilung angibt, und die Standardabweichung σ beschreibt die Breite der Verteilung. Berücksichtigt man die

tabellierten Werte der Verteilungsfunktion, gilt laut [8] näherungsweise folgende Aussage:

68,27 % aller Messwerte haben eine Abweichung von max. σ vom Erwartungswert,
95,45 % aller Messwerte haben eine Abweichung von max. 2σ vom Erwartungswert,
99,73 % aller Messwerte haben eine Abweichung von max. 3σ vom Erwartungswert.

Im Folgenden wird die Nachbildung der Verläufe der Beginnzeiten der Wege für alle vier Fahrprofile im Detail erläutert. Dabei wurden die Erwartungswerte und die zugehörigen Standardabweichungen so gewählt, dass die entstehenden Verläufe der Form der Kurven aus Abbildung 2.2 im Unterkapitel 2.1 auf Seite 6 so gut als möglich angenähert sind. Diese sind nochmals in Abbildung 3.7 bis Abbildung 3.10 als rot gefärbte Linien dargestellt.

Jede der verwendeten Gaußschen Glockenkurven eines Fahrprofils besitzt zwangsläufig denselben Flächeninhalt, da alle Wege mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % auftreten. Es kann deshalb nicht vorkommen, dass ein Fahrzeug eine Strecke pro Tag auslässt bzw. eine zusätzliche zurücklegt. Die Veränderung der Höhe einer Verteilung durch Multiplikation mit einem Faktor ist dabei nicht zulässig, da diese auch den Flächeninhalt beeinträchtigen würde.

Die Fläche unter der Summe der Gaußschen Glockenkurven und der Flächeninhalt des Verlaufes der Beginnzeiten der Wege sind ebenfalls gleich groß. Da ihre Formen allerdings nicht identisch sind, weicht auch die Anzahl der wegstartenden Fahrzeuge aus dem Modell und aus der Verkehrsstatistik zu gewissen Zeiten stärker voneinander ab. Für alle vier Fahrprofile konnten jedoch die Maximalwerte sehr gut nachgebildet werden.

3.4.1 Beginnzeiten Berufspendler

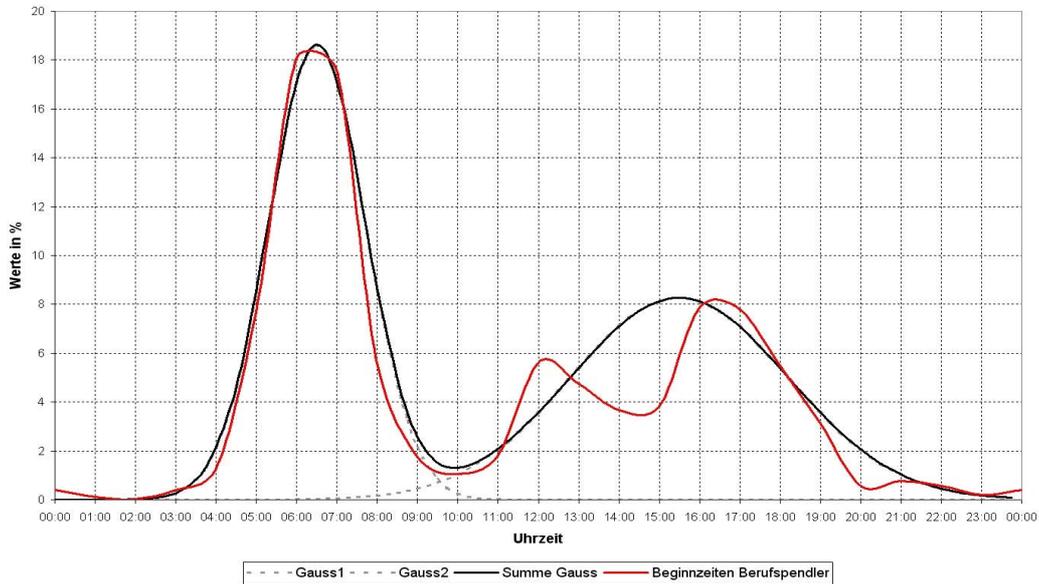


Abbildung 3.7: Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Berufspendler

Ein BEV im Fahrprofil Berufspendler legt pro Tag zwei Wege zurück. Von zu Hause z.B. in die Arbeit oder zu einer Park-and-Ride-Anlage und von dort wieder nach Hause. Deshalb wird die Verteilung der Beginnzeiten der täglichen Wege mit zwei Gaußschen Glockenkurven nachgebildet, und diese sind in Abbildung 3.7 als strichlierte Kurven dargestellt. Die erste Gaußsche Glockenkurve (Gauss1) hat ihren Erwartungswert μ auf 06:30 Uhr und eine Standardabweichung σ von 1,2 Stunden. Beim zweiten Weg liegt der Mittelwert der Gaußverteilung (Gauss2) bei 15:30 Uhr, und die dazugehörige Standardabweichung erstreckt sich über 2,7 Stunden. Dabei besitzt die Abweichung der Kurve „Summe Gauss“ von der Kurve „Beginnzeiten Berufspendler“ einen quadratischen Mittelwert (QMW) von 1,5 %.

3.4.2 Beginnzeiten Dienstfahrer

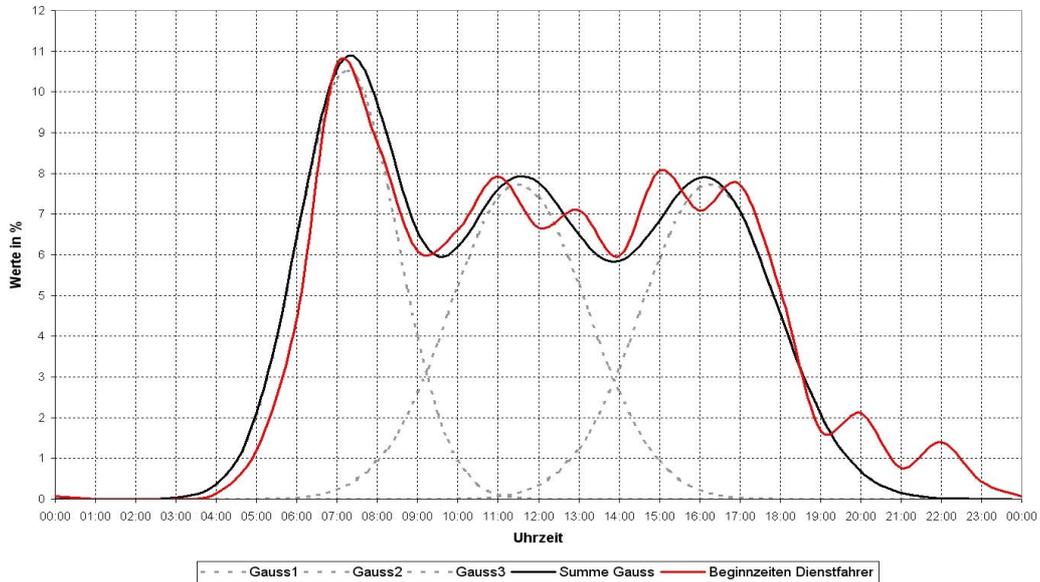


Abbildung 3.8: Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Dienstfahrer

Das Fahrprofil Dienstfahrer wurde in drei werktägliche Fahrten unterteilt und somit für jeden der drei Wege eine Gaußsche Glockenkurve verwendet. Da der Verlauf der Beginnzeiten der werktäglichen Wege mehr lokale Extremwerte besitzt als die Summe von drei Normalverteilungen ergeben, konnte der Verlauf nur näherungsweise nachgebildet werden. Die Abweichung der Kurve „Summe Gauss“ von der Kurve „Beginnzeiten Dienstfahrer“ besitzt einen QMW von 0,8 %. Dieser Wert zeigt, dass der Unterschied der beiden Kurven hier geringer ausfällt als beim Fahrprofil Berufspendler. Die verwendeten Gaußschen Glockenkurven, ihre Summe und der Verlauf der Beginnzeiten der werktäglichen Wege sind in Abbildung 3.8 ersichtlich. Der Erwartungswert μ des ersten Weges liegt bei 07:15 Uhr mit einer Standardabweichung σ von 1,25 Stunden. Der zweite Weg hat den Erwartungswert bei 11:00 Uhr und eine Standardabweichung von 1,7 Stunden. Beim dritten Weg liegt der Mittelwert bei 16:15 Uhr, und er besitzt eine Standardabweichung von 1,7 Stunden.

3.4.3 Beginnzeiten private Erledigungen/Einkäufe

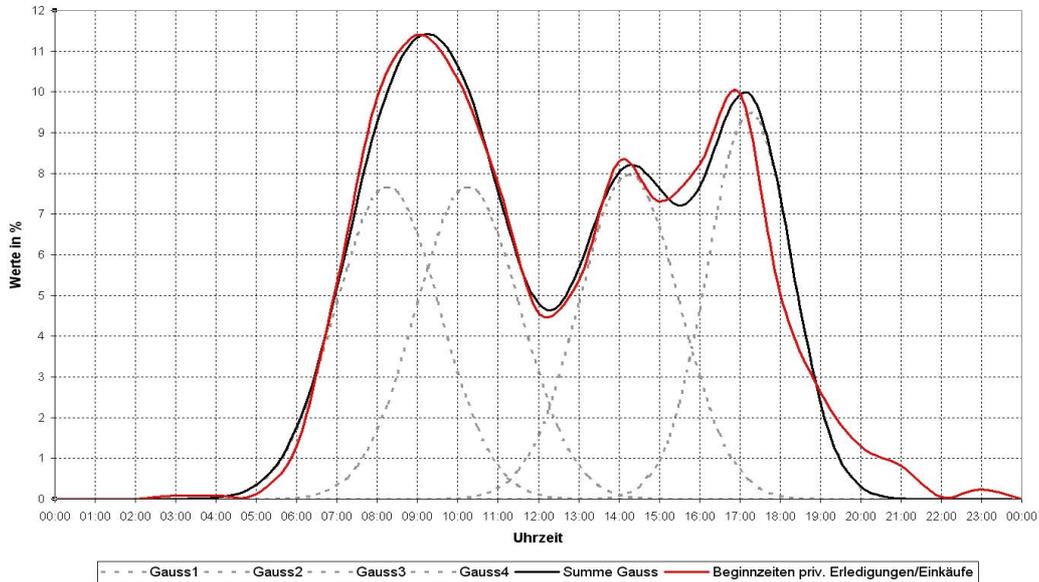


Abbildung 3.9: Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe

Das Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe besitzt in diesem Modell vier werktägliche Wege. Dieselbe Zahl an Normalverteilungen wurde zur Nachbildung der Beginnzeiten der werktäglichen Wege verwendet. Abbildung 3.9 stellt die Beginnzeiten der Wege rot gefärbt dar und zeigt außerdem die Verläufe der vier Gaußschen Glockenkurven und den Verlauf der Summe. Die Erwartungswerte μ der ersten beiden Wege liegen bei 08:15 Uhr und 10:15 Uhr, und beide besitzen die Standardabweichung σ von 1,3 Stunden. Beim dritten Weg wurde der Mittelwert bei 14:15 Uhr angesetzt und eine Standardabweichung von 1,25 Stunden gewählt. Der letzte Weg hat den Mittelwert bei 17:15 Uhr mit einer Standardabweichung von 1,1 Stunden. Die Nachbildung konnte hier am exaktesten durchgeführt werden. Die Abweichung der Kurve „Summe Gauss“ von der Kurve „Beginnzeiten priv. Erledigungen/Einkäufe“ beträgt nur 0,6 % (QMW).

3.4.4 Beginnzeiten Freizeit

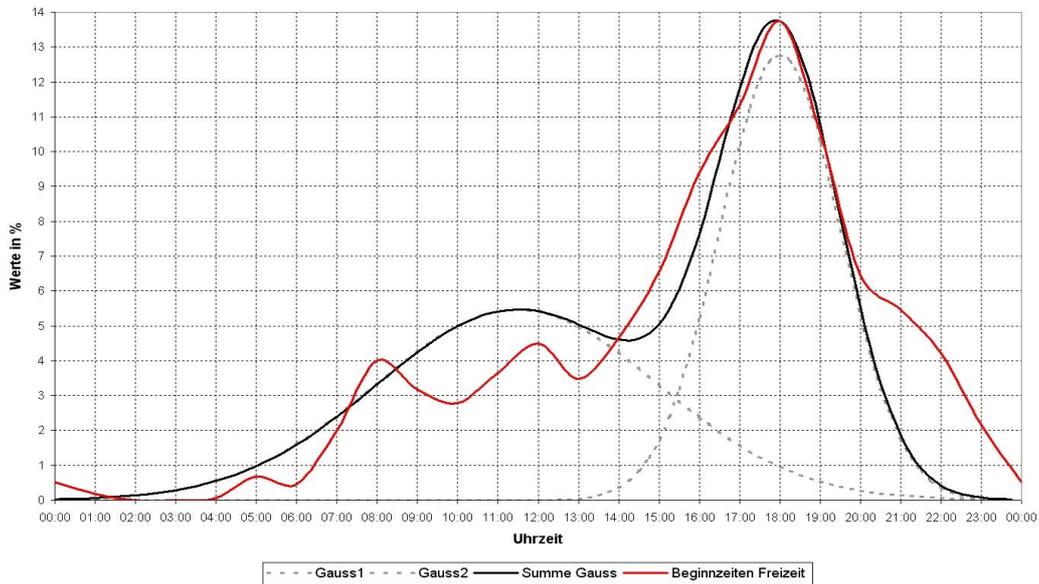


Abbildung 3.10: Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Freizeit

Für das Profil Freizeit wurden zwei Wege veranschlagt, nämlich Hin- und Rückfahrt von der jeweiligen Freizeitaktivität. Damit der Verlauf der Beginnzeiten der täglichen Wege aus [5] näherungsweise durch die beiden Glockenkurven angenähert werden konnte, musste für den ersten Weg eine relativ große Standardabweichung gewählt werden (siehe Abbildung 3.10). Die dadurch entstandene Abweichung der Kurve „Summe Gauss“ von der Kurve „Beginnzeiten Freizeit“ besitzt einen QMW von 1,5 %. Bei der Wahl einer kleineren Standardabweichung wäre die erste Glockenkurve schmaler und höher und die Abweichung zwischen Verlauf der Beginnzeiten der Wege und Summen der beiden Gaußschen Glockenkurven noch größer. Für den ersten Weg wurde der Erwartungswert μ bei 11:30 Uhr und eine Standardabweichung σ von 3,5 Stunden gewählt. Der zweite Weg besitzt den Erwartungswert bei 18:00 Uhr mit einer Standardabweichung von 1,5 Stunden.

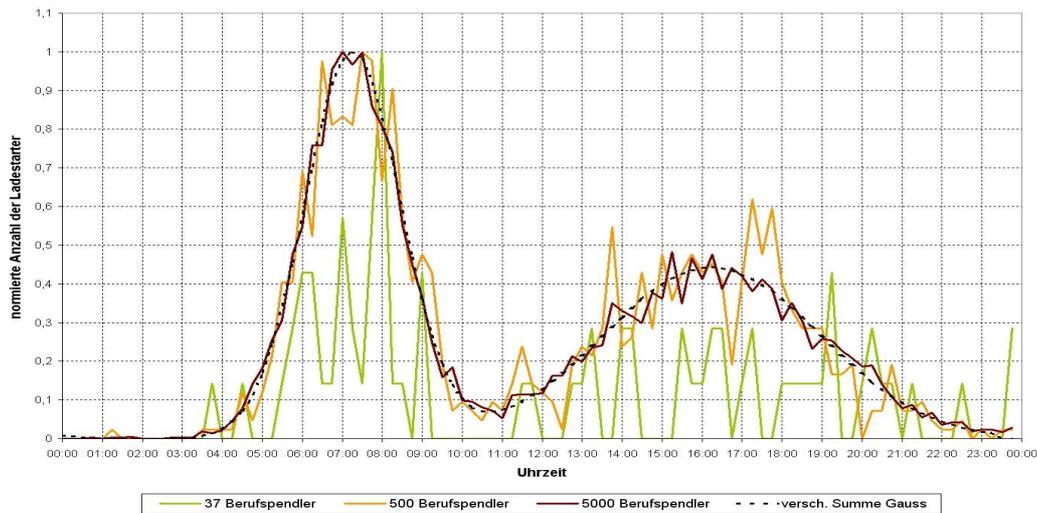


Abbildung 3.11: Verteilung der Ladestartzeitpunkte für unterschiedliche Anzahlen von BEV des Fahrprofils Berufspendler und Verlauf der um die durchschnittliche Wegdauer verschobenen Summe der Normalverteilungen

Die Ladestartzeitpunkte aller Fahrprofile werden zwar erst im Unterkapitel 3.7 besprochen, zum besseren Verständnis soll jedoch hier schon etwas vorgegriffen werden. In Abbildung 3.11 sind die Verteilungen der Ladestartzeitpunkte für drei unterschiedliche Anzahlen von BEV des Fahrprofils Berufspendler dargestellt. Die strichlierte Kurve zeigt den um die durchschnittliche Weglänge verschobenen Verlauf der Summe der Gaußschen Glockenkurven aus Abbildung 3.7 auf Seite 24. Abbildung 3.11 zeigt klar, dass der Verlauf der Ladestartzeitpunkte sich erst ab einer hohen Anzahl von BEV der Normalverteilung annähert. Für eine Anzahl von 37 Berufspendlern ist dies keinesfalls gegeben. Dies bedeutet, dass die Anzahl der BEV für die Glättung der Kurve verantwortlich ist.

Hiezu kommt, dass bei jeder neuen Berechnung im MATLAB-Programm der Verlauf der Beginnzeiten der Wege stark verändert wird (siehe Abbildung 3.11) und somit auch der um die durchschnittliche Weglänge verschobene Verlauf der Ladestarter. Grund dafür ist die Normalverteilung der Beginnzeiten der Wege. Weiters wird mit jeder neuen stochastischen Berechnung ebenfalls die Form der Ladeprofile deutlich variieren. Nähere Details zu dieser Problematik werden im Unterkapitel 4.1 erläutert.

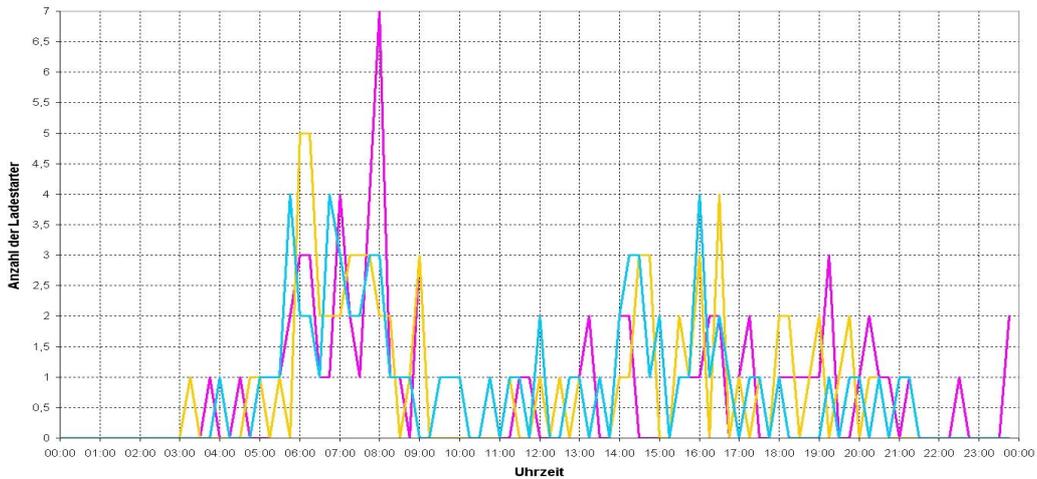


Abbildung 3.12: Veränderung der Ladestartzeitpunkte auf Grund der stochastischen Verteilung der Beginnzeiten der werktäglichen Wege; hier beispielhaft für drei gleiche Berechnungen dargestellt

In Tabelle 3.2 sind alle gewählten Erwartungswerte μ und Standardabweichungen σ der verwendeten Normalverteilungen nochmals für die vier Fahrprofile zusammengefasst.

Fahrprofile	Normalverteilungen	Erwartungswerte μ	Standardabweichungen σ
Berufspendler	Gauss1	06:30 Uhr	1,20 h
	Gauss2	15:30 Uhr	2,70 h
Dienstfahrer	Gauss1	07:15 Uhr	1,25 h
	Gauss2	11:00 Uhr	1,70 h
	Gauss3	16:15 Uhr	1,70 h
private Erledigungen/ Einkäufe	Gauss1	08:15 Uhr	1,30 h
	Gauss2	10:15 Uhr	1,30 h
	Gauss3	14:15 Uhr	1,25 h
	Gauss4	17:15 Uhr	1,10 h
Freizeit	Gauss1	11:30 Uhr	3,50 h
	Gauss2	18:00 Uhr	1,50 h

Tabelle 3.2: Erwartungswerte und Standardabweichungen der verwendeten Normalverteilungen aller vier Fahrprofile

3.4.5 Einschränkungen

Im MATLAB-Programm werden die Beginnzeiten der Wege mit Hilfe einer normalverteilten Zufallsfunktion berechnet, die genau jene Standardabweichungen σ und Erwartungswerte μ wie in Tabelle 3.2 beschrieben besitzen. Durch die Überlappung der Gaußschen Normalverteilungen nachfolgender Wege eines Fahrprofils könnte es dazu kommen, dass die zufällig berechnete Beginnzeit des Weges (i+1) vor der Beginnzeit des Weges (i) zu liegen kommt. Dies hätte zur Folge, dass das Fahrzeug den nächsten Weg antritt, bevor es den aktuellen beendet hat. Damit die Reihenfolge der Wege beibehalten wird, wurden folgende zwei notwendige Einschränkungen eingeführt:

- Die erste Fahrt darf erst nach 00:00 Uhr stattfinden.
- Der (i+1)te Weg darf erst beginnen, wenn der (i)te Weg beendet wurde.

Dies wurde im MATLAB-Programm folgendermaßen umgesetzt: Die Beginnzeit des (i+1)ten Weges wird so oft neu berechnet, bis sie größer als die Beginnzeit des Weges (i) plus der Dauer des Weges (i) ist.

3.5 Streckenprofile der einzelnen Fahrprofile

Die im letzten Unterkapitel beschriebene Normalverteilung der Beginnzeiten der Wege führt gemeinsam mit den durchschnittlichen Weglängen und der durchschnittlichen Dauer der Wege zu den einzelnen Streckenprofilen. Jedes im Modell betrachtete BEV besitzt ein anderes Streckenprofil, auch jene vom gleichen Fahrprofil. Zwar besitzen die BEV eines Fahrprofils dieselben Weglängen und -dauern, jedoch unterschiedliche Startzeitpunkte, wodurch die unterschiedlichen Streckenprofile zu Stande kommen. Die unterschiedlichen Startzeitpunkte werden durch die normalverteilte Zufallsvariable – gegeben durch Standardabweichung σ und Erwartungswert μ – gewährleistet. Dies wird für jedes einzelne BEV neu berechnet. In Abbildung 3.13 bis Abbildung 3.16 sind die Streckenprofile von einem stellvertretenden BEV aller vier Fahrprofile dargestellt. Dabei beginnen die Wege zu den definierten Erwartungswerten der verwendeten Normalverteilungen. Die roten Pfeile deuten die Richtungen und die strichliert gezeichneten Normalverteilungen den Umfang der Verschiebungen der unterschiedlichen Beginnzeiten der einzelnen BEV an. Die Fahrtgeschwindigkeit der BEV wird über die gesamte Strecke

als konstant angenommen und ergibt sich aus der Division von durchschnittlicher Weglänge durch durchschnittliche Wegdauer.

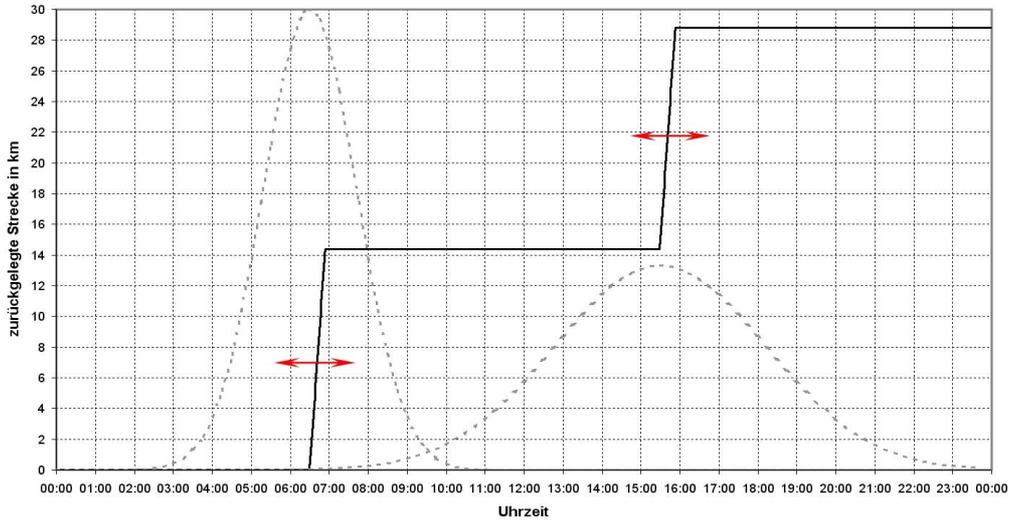


Abbildung 3.13: Streckenprofil von Berufspendlern mit den dazugehörigen Normalverteilungen

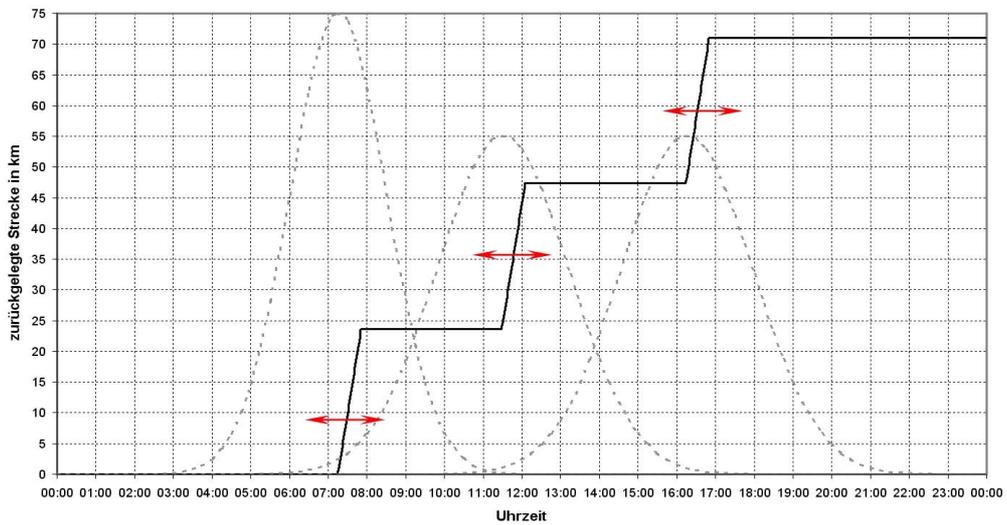


Abbildung 3.14: Streckenprofil von Dienstfahrern mit den dazugehörigen Normalverteilungen

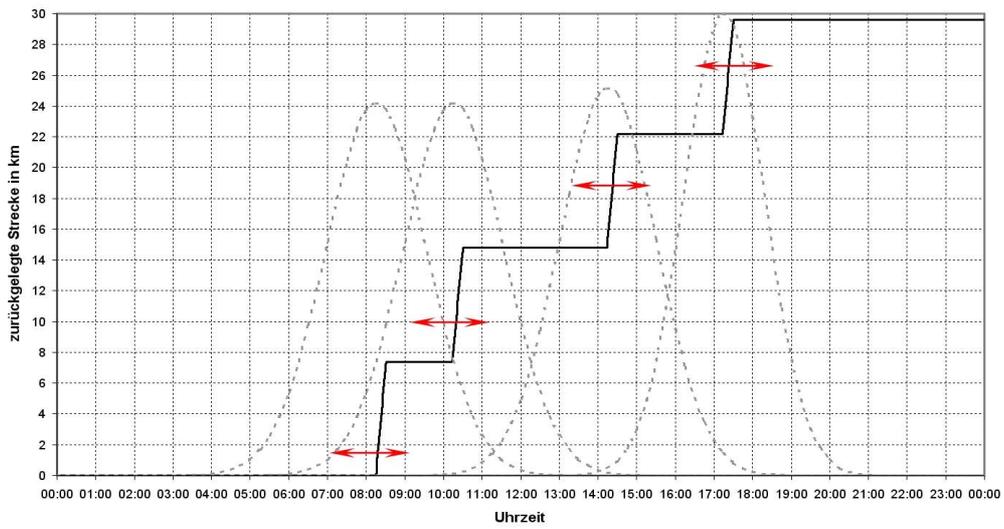


Abbildung 3.15: Streckenprofil von privaten Erledigungen/Einkäufen mit den dazugehörigen Normalverteilungen

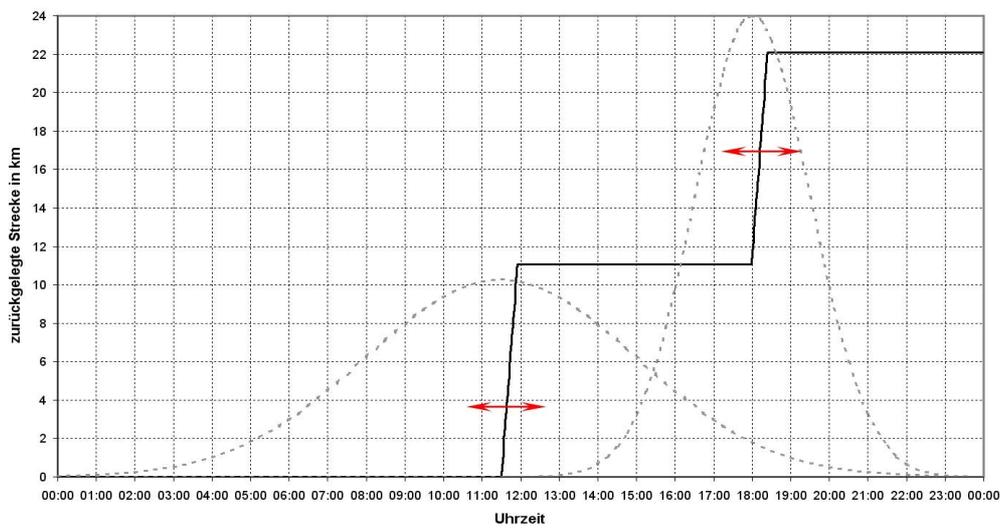


Abbildung 3.16: Streckenprofil vom Fahrprofil Freizeit mit den dazugehörigen Normalverteilungen

3.6 Ladeprofile einzelner BEV der vier Fahrprofile

In diesem Unterkapitel wird auf den Verlauf des Ladezustandes und des Ladeprofiles eines BEV aller vier Fahrprofile eingegangen. Aber auch auf die möglichen Zeiträume, wann geladen werden darf. Diese Ladefenster sind wie folgt definiert:

Geladen wird immer dann, wenn die Batterie nicht voll aufgeladen ist und das betrachtete BEV an einem Ort steht, wo es die Möglichkeit zum Laden vorfindet (siehe dazu Tabelle 3.1 auf Seite 21). Dabei wird das Ladegerät direkt nach dem Anhalten an eine geeignete Steckdose angeschlossen. Der Ladevorgang endet, wenn die Batterie komplett geladen ist oder zur Beginnzeit des nächsten Weges, egal welcher SOC bis dorthin erreicht wurde. In Abbildung 3.17 sind die möglichen Ladestartzeitpunkte und Ladefenster für ein repräsentatives BEV dargestellt.

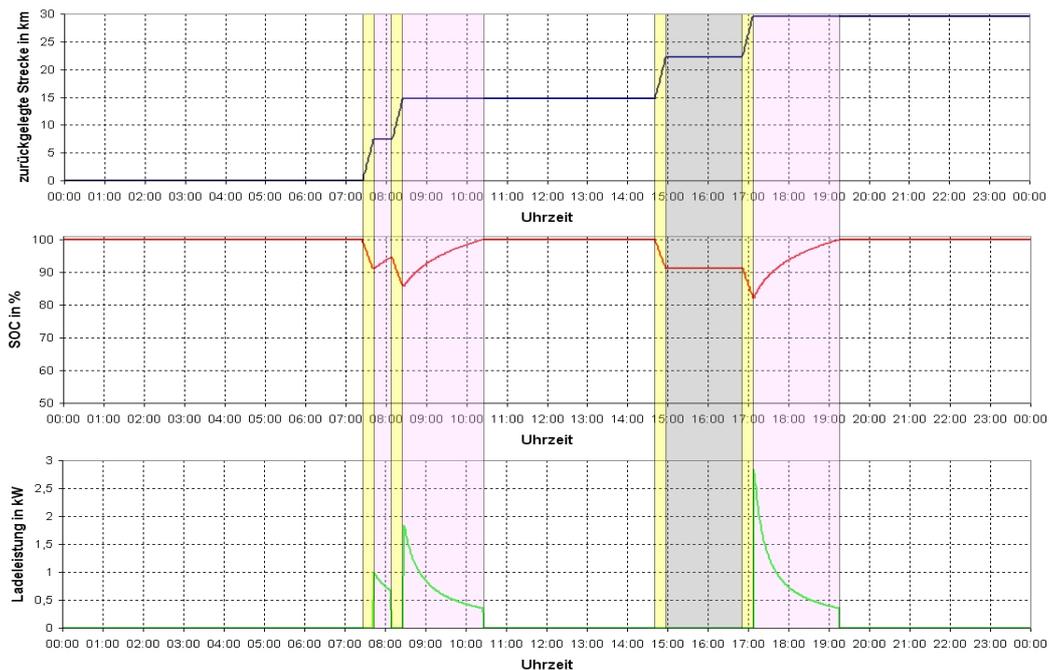


Abbildung 3.17: Mögliche Ladestartzeitpunkte und Ladefenster eines BEV

3.6.1 Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Berufspendler

Im Gegensatz zu den anderen Fahrprofilen bekommt der Berufspendler die Möglichkeit nach dem ersten Weg seine Li-Ionen-Batterie wieder aufzuladen (z.B. am Arbeitsplatz

oder in einer Park-and-Ride-Anlage). Dadurch startet er den zweiten Weg mit einer vollständig geladenen Batterie, siehe Abbildung 3.18. Der Minimalwert vom Verlauf des Ladezustand SOC der Batterie liegt bei 90 %, jeweils nach Beendigung der beiden Fahrten. Da der Ladeumschaltspunkt s von 80 % somit nie erreicht wird, wird ausschließlich in der U-Phase geladen (vergleiche dazu Abbildung 2.7 auf Seite 11). Das bedeutet, dass die Ladeleistung mit der Zeit exponentiell abnimmt und die maximale Höhe der Ladeleistung zu Beginn nur 1,6 kW/BEV beträgt. Abbildung 3.19 zeigt das werktägliche Ladeprofil eines BEV vom Fahrprofil Berufspendler. Die Dauer je Ladevorgang erstreckt sich über ca. eine Stunde.

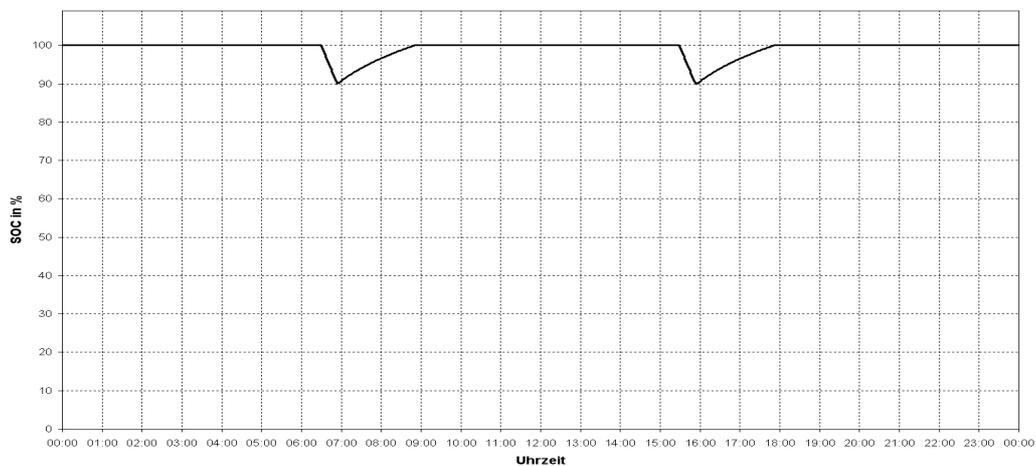


Abbildung 3.18: Der Ladezustandsverlauf SOC eines Berufspendlers

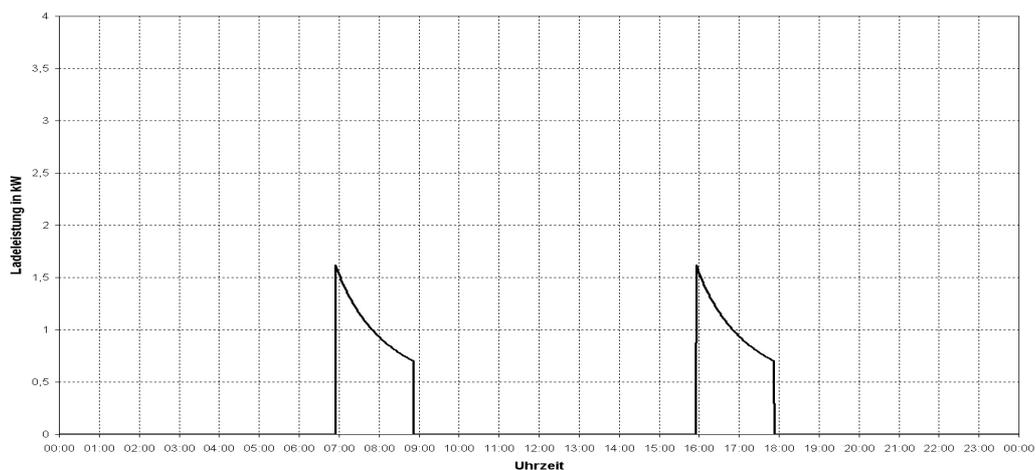


Abbildung 3.19: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines Berufspendlers

3.6.2 Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Dienstfahrer

Die BEV dieses Fahrprofils werden nur nach dem letzten Weg und zu Hause geladen. Der Ladezustand SOC ist vor dem Ladestartzeitpunkt auf 55 % gesunken, siehe Abbildung 3.20. Da dies unter dem Ladeumschaltpunkt s von 80 % liegt, wird zuerst mit konstanter Leistung von 3,68 kW in der I-Phase geladen. Nach Erreichen des Ladeumschaltpunktes s folgt die U-Phase mit exponentiell sinkender Leistung. In dieser wird verharret, bis die Batterie vollständig geladen ist. Das Ladeprofil eines BEV ist in Abbildung 3.21 dargestellt. Der darin ersichtliche Ladevorgang ist nach rund 3,5 Stunden abgeschlossen.

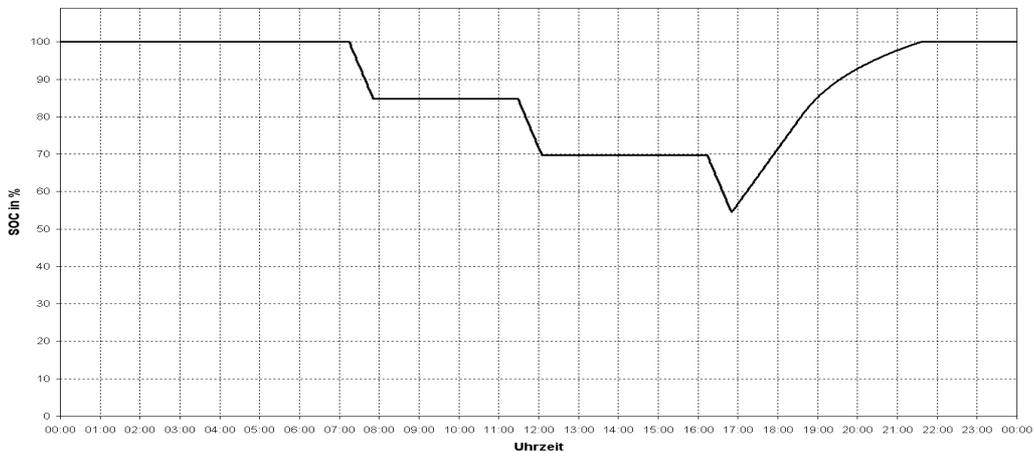


Abbildung 3.20: Der Ladezustandsverlauf SOC eines Dienstfahrers

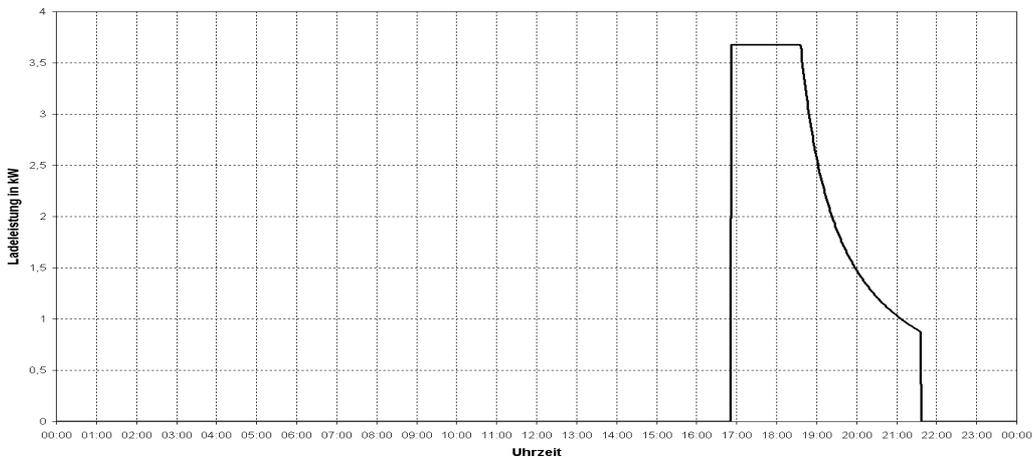


Abbildung 3.21: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines Dienstfahrers

3.6.3 Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe

Auch in diesem Fahrprofil wird erst nach dem letzten Weg und zu Hause geladen. Abbildung 3.22 zeigt den Tagesverlauf des Ladezustands SOC in %. Nach dem vierten Weg ist die Ladekapazität auf 65 % gesunken. Dies hat zur Folge, dass der Ladevorgang mit der I-Phase beginnt und anschließend mit der U-Phase endet. Die Batterie ist nach 2,5 Stunden wieder voll geladen. Der Verlauf der Ladeleistung ist in Abbildung 3.23 dargestellt.

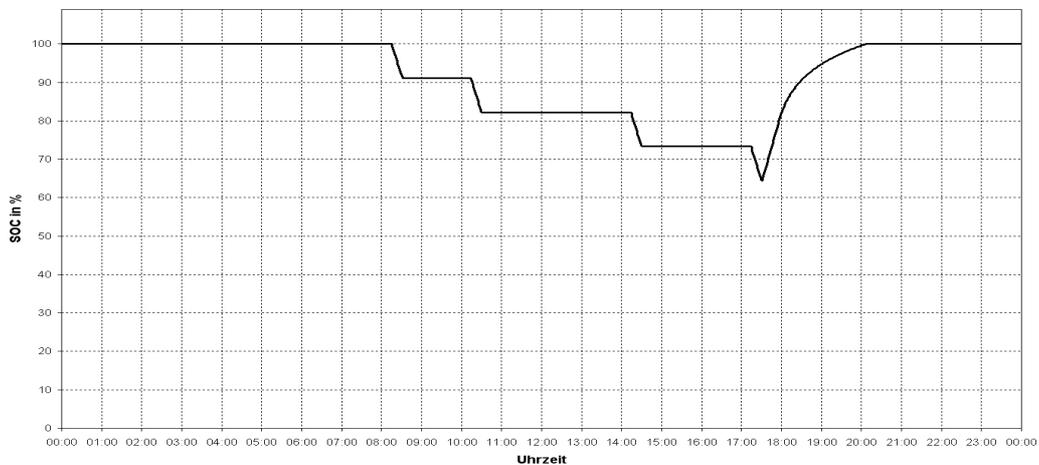


Abbildung 3.22: Der Ladezustandsverlauf SOC eines BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe

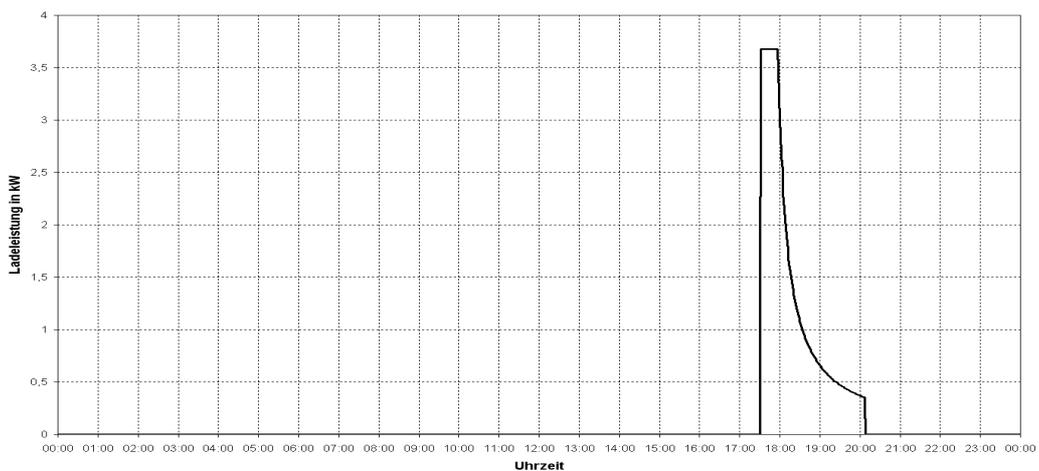


Abbildung 3.23: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines BEV vom Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe

3.6.4 Ladeprofil eines BEV des Fahrprofils Freizeit

Ein Fahrer des Profils Freizeit legt pro Tag zwei Strecken zurück. Von zu Hause zur Freizeitanlage und wieder retour. Dabei sinkt der Ladezustand SOC bis kurz vor dem Laden auf einen Wert von 67 %, was in Abbildung 3.24 ersichtlich ist. Der darauf folgende Ladevorgang dauert etwa eine Stunde und 20 Minuten. Dieser besteht aus einer kurzen I-Phase mit konstanter Leistung, gefolgt von einer U-Phase, die bis zu einem SOC von 100 % andauert. Den Tagesverlauf der Ladeleistung zeigt Abbildung 3.25.

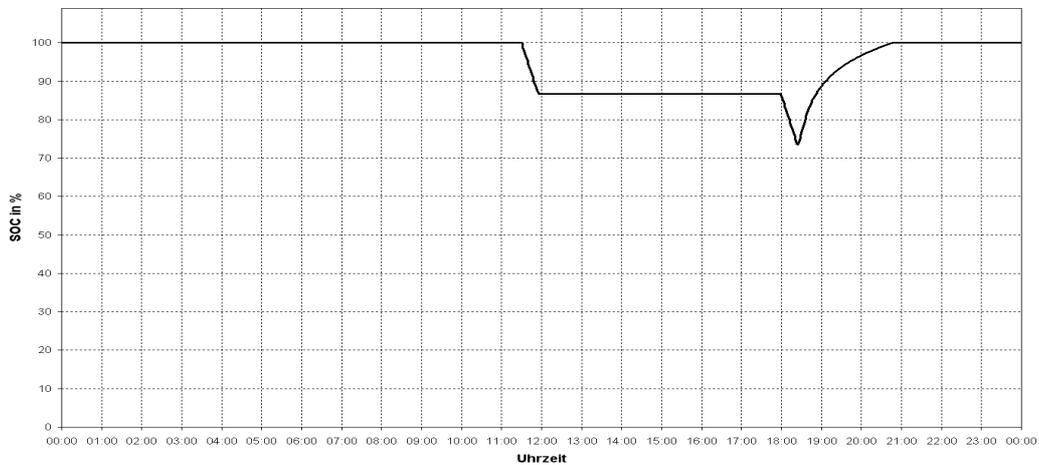


Abbildung 3.24: Der Ladezustandsverlauf SOC eines BEV des Fahrprofils Freizeit

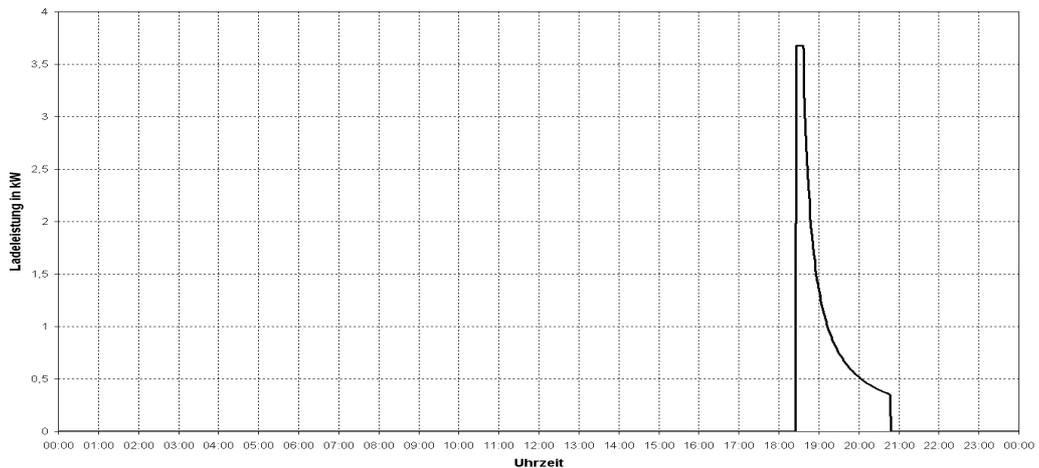


Abbildung 3.25: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines BEV vom Fahrprofil Freizeit

3.7 Ladestartzeitpunkte der vier Fahrprofile

Wie zuvor schon erwähnt, wird der Ladevorgang der Batterie gleich nach Beendigung eines Weges gestartet – vorausgesetzt eine Lademöglichkeit ist vorhanden. Das bedeutet, dass der Ladestartzeitpunkt eines BEV gleich der Beginnzeit des betrachteten Weges plus der dazugehörigen Wegdauer ist. Hier nochmals als Formel dargestellt:

$$\text{Ladestartzeitpunkt} = \text{Beginnzeit des Weges} + \text{Dauer des Weges} \quad (3.2)$$

Da der Verlauf der Ladestartzeitpunkte nur eine verschobene Version des Verlaufs der berechneten Wegbeginnzeiten ist, ähnelt dieser der Form der dazugehörigen Normalverteilungen.

Für die weitere Betrachtung wird ein Mix aus 100 Elektrofahrzeugen angenommen. Diese Anzahl ergibt sich wie folgt: Geht man davon aus, dass jeder Haushalt – wie in [14] beschrieben – auf Grund der Gleichzeitigkeit nur 2 kW Anschlussleistung am Ortsnetztransformator erfordert, reicht ein Netztrafo mit 400 kVA zur Speisung einer Siedlung von maximal 200 Haushalten aus. Laut [13] wohnen in Österreich durchschnittlich 2,3 Personen in einem Haushalt. Das sind zusammen 460 Menschen, die, bei einem Motorisierungsgrad von 40 % bis 50 %, somit rund 200 Pkw besitzen. Nimmt man nun an, dass 50 % dieser Pkw Elektroautos sind, kommt man genau auf die Anzahl von 100 BEV.

Der Fahrprofilmix besteht dabei aus 37 Berufspendlern, 16 Dienstfahrern, 30 BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe und 17 BEV des Fahrprofils Freizeit. Diese Verteilung ergibt sich aus der Aufteilung der Wegzwecke vom MIV, wenn man die beiden restlichen Wegzwecke – Ausbildungsverkehr und sonstige Zwecke – außer Acht lässt. Vergleiche dazu Abbildung 2.1 auf Seite 5.

Anders als bei den restlichen drei Fahrprofilen wird beim Fahrprofil Berufspendler zweimal pro Tag geladen. Der erste Ladevorgang erfolgt nach dem ersten Weg am Arbeitsplatz oder in einer Park-and-Ride-Anlage, der zweite zu Hause. Der erste Ladevorgang ist in der Abbildung 3.26 mit der Farbe rot gekennzeichnet. Durch die kleinere Standardabweichung der Normalverteilung des ersten Weges (vergleiche

Tabelle 3.2 auf Seite 29) beginnen die BEV auch in einem kleineren Zeitraum zu laden. Die Anzahl der Ladestarts ist natürlich nach beiden Wegen identisch und beträgt beim Fahrprofil Berufspendler 37 BEV.

Bei den Fahrprofilen Dienstfahrer, private Erledigungen/Einkäufe und Freizeit wird nur einmal am Tag geladen. Die Ladevorgänge starten jeweils nach dem letzten Weg und zu Hause. Die Verteilungen der Ladestartzeitpunkte der 16 BEV des Fahrprofils Dienstfahrer, der 30 BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe und der 17 BEV des Fahrprofils Freizeit sind in Abbildung 3.27 bis Abbildung 3.29 dargestellt.

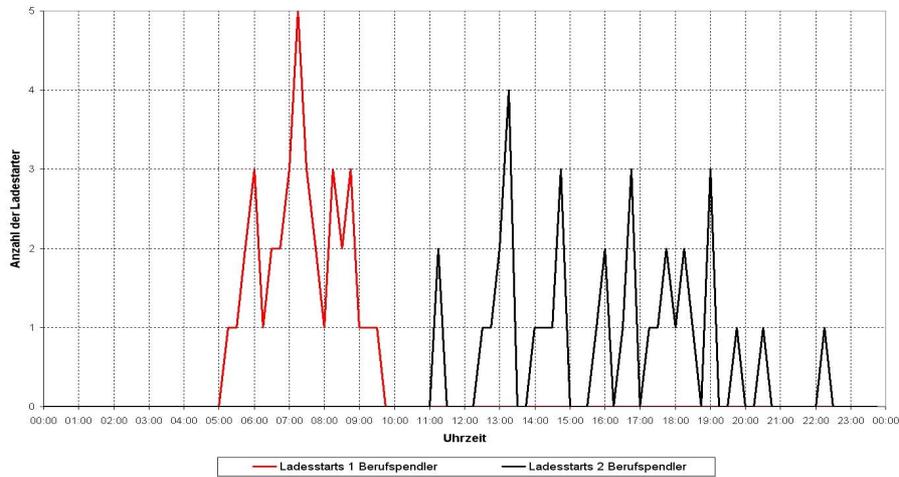


Abbildung 3.26: Verteilung der Ladestartzeitpunkte von Berufspendlern

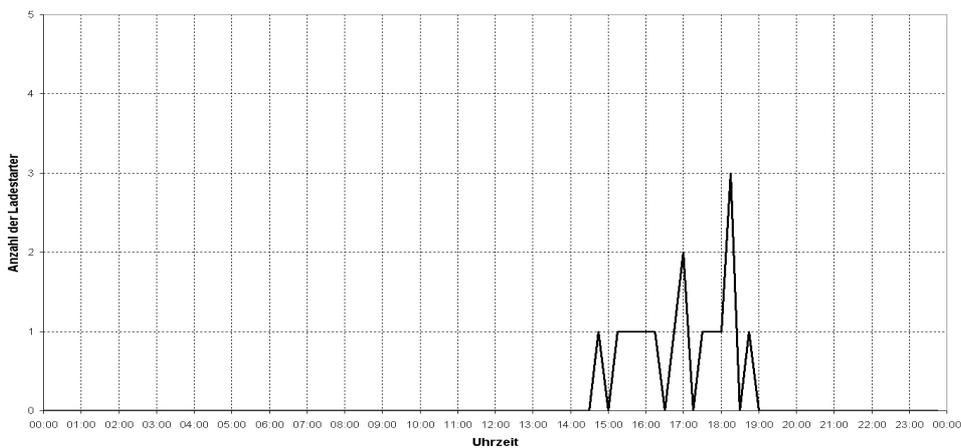


Abbildung 3.27: Verteilung der Ladestartzeitpunkte von Dienstfahrern

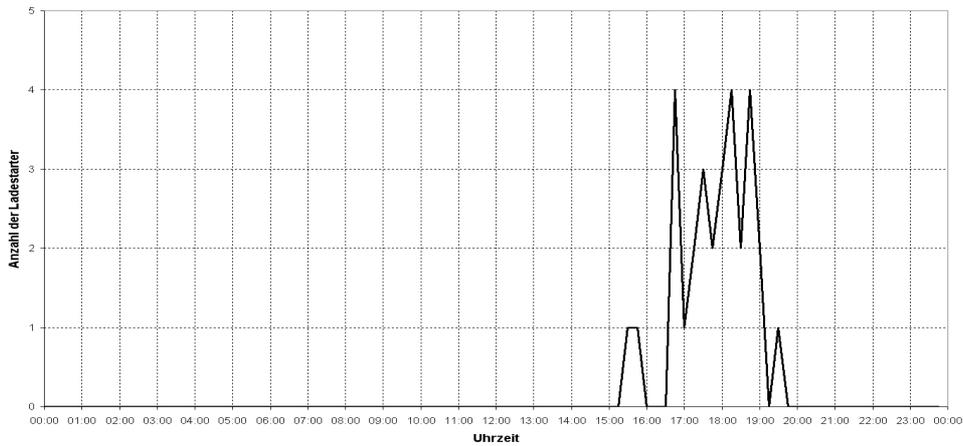


Abbildung 3.28: Verteilung der Ladestartzeitpunkte vom Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe

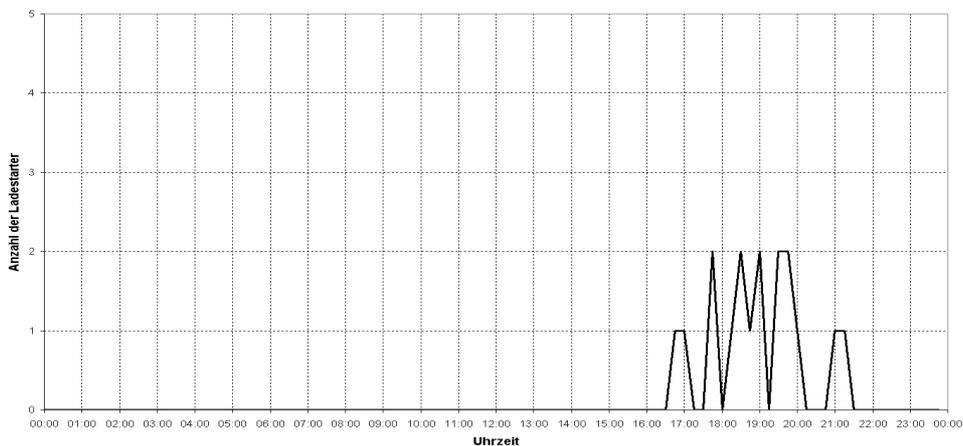


Abbildung 3.29: Verteilung der Ladestartzeitpunkte vom Fahrprofil Freizeit

3.8 Summenladeprofile der vier Fahrprofile

Die Ladeprofile der Fahrprofile ergeben sich nun aus Vereinigung von Ladecharakteristik der Li-Ionen-Batterie (siehe Unterabschnitt 2.2.2) und Verteilung der Ladestartzeitpunkte (siehe Unterkapitel 3.7).

Abbildung 3.30 zeigt die untertags vom Ladegerät aufgenommene Leistung von Berufspendlern. Dabei stellt die Leistungskuppe am Vormittag den Ladevorgang nach

dem ersten Weg dar. Durch die geringer gewählte Standardabweichung für die Beginnzeiten des ersten Weges hat der Leistungsverlauf um etwa 07:30 Uhr sein Maximum von 23,9 kW erreicht. Aufgeteilt auf die 37 BEV des Fahrprofils Berufspendler, ergibt sich eine Spitzenlast von 0,65 kW/BEV. Da für jeden der zwei Ladevorgänge dieselbe Energie von rund 79 kWh benötigt wird, besitzen beide Kuppen denselben Flächeninhalt.

Auf Grund der hohen Kilometerleistung des Fahrprofils Dienstfahrer von 71 km pro Tag ist das Leistungsmaximum mit 44,5 kW das höchste aller vier Fahrprofile und kommt um 18:30 Uhr zu liegen. Dieses Fahrprofil beinhaltet 16 BEV, was eine Spitzenlast von 2,78 kW/BEV ergibt. Der Verlauf der vom Ladegerät aufgenommenen Leistung ist in Abbildung 3.31 ersichtlich.

Die 30 BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe fahren eine Strecke von 29,6 km pro Tag. Dies entspricht weniger als die Hälfte der Kilometerleistung vom Fahrprofil Dienstfahrer. Das Maximum der vom Ladegerät aufgenommenen Leistung liegt trotzdem bei 19:00 Uhr und beträgt 43,1 kW (siehe Abbildung 3.32). Es ist nur etwas geringer als jenes des Fahrprofils Dienstfahrer. Dies ist durch die geringere Standardabweichung und vor allem durch die höhere Anzahl von BEV zu erklären. Die Leistungsspitze pro Fahrzeug ergibt sich zu 1,4 kW/BEV.

Das Fahrprofil Freizeit besitzt mit 22,1 km die geringste Gesamtstrecke pro Tag und beinhaltet 17 BEV. Dies hat einen geringen Leistungsbedarf zur Folge. Der Leistungsverlauf ist in Abbildung 3.33 dargestellt, und das Leistungsmaximum liegt bei 19:45 Uhr und beträgt 17,4 kW. Mit diesem Wert ergibt sich eine Spitzenlast von 1,02 kW/BEV.

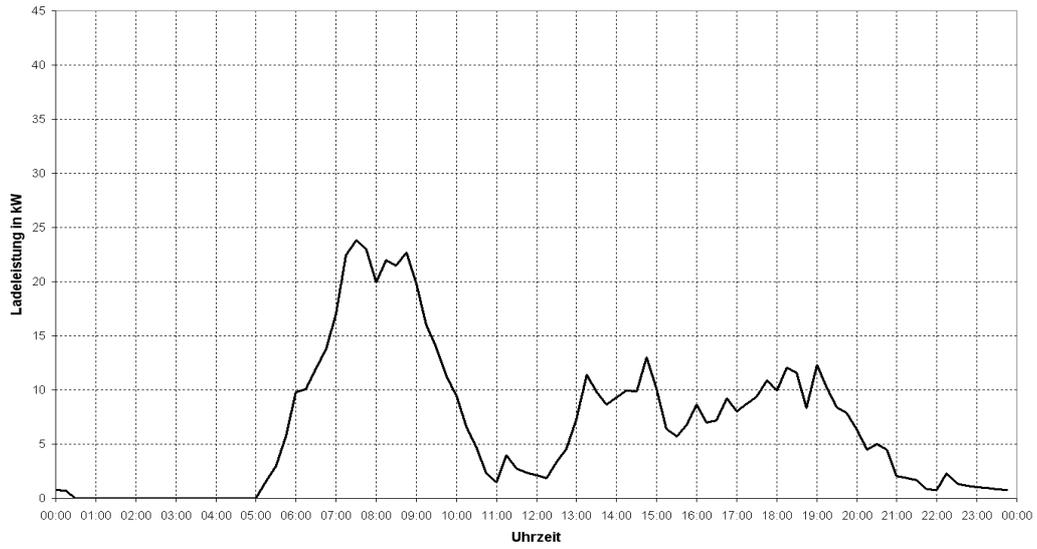


Abbildung 3.30: Ladeprofil des Fahrprofils Berufspendler mit 37 BEV

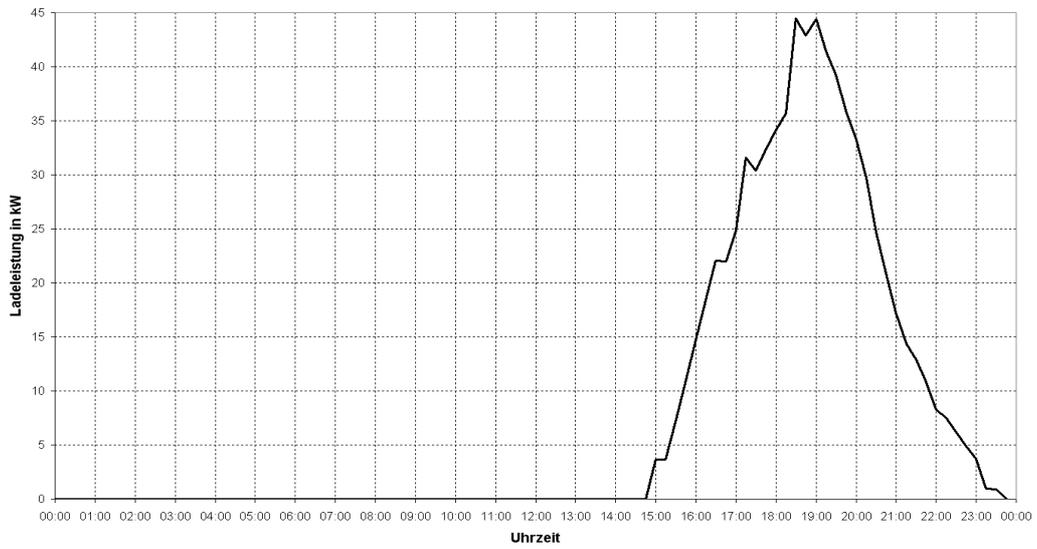


Abbildung 3.31: Ladeprofil des Fahrprofils Dienstfahrer mit 16 BEV

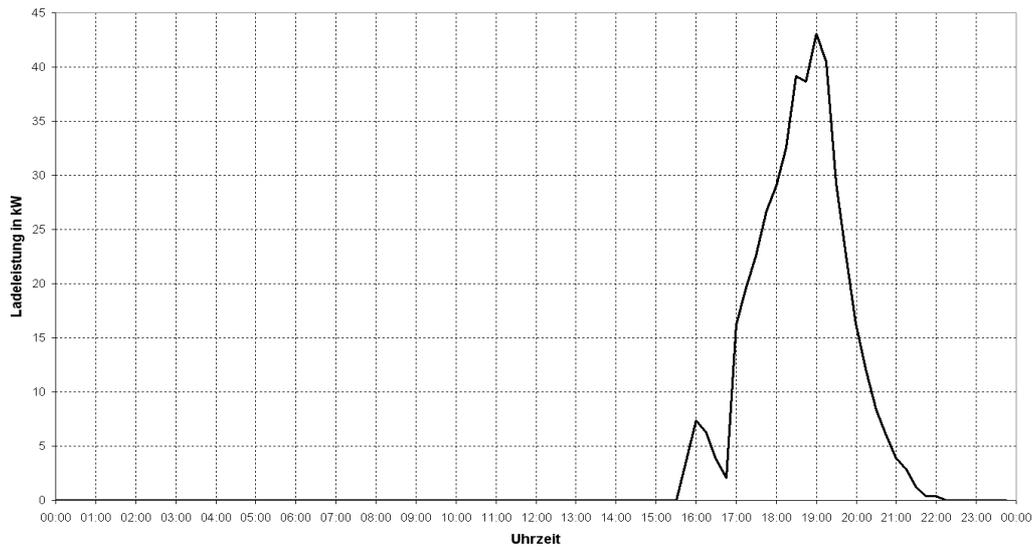


Abbildung 3.32: Ladeprofil des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe mit 30 BEV

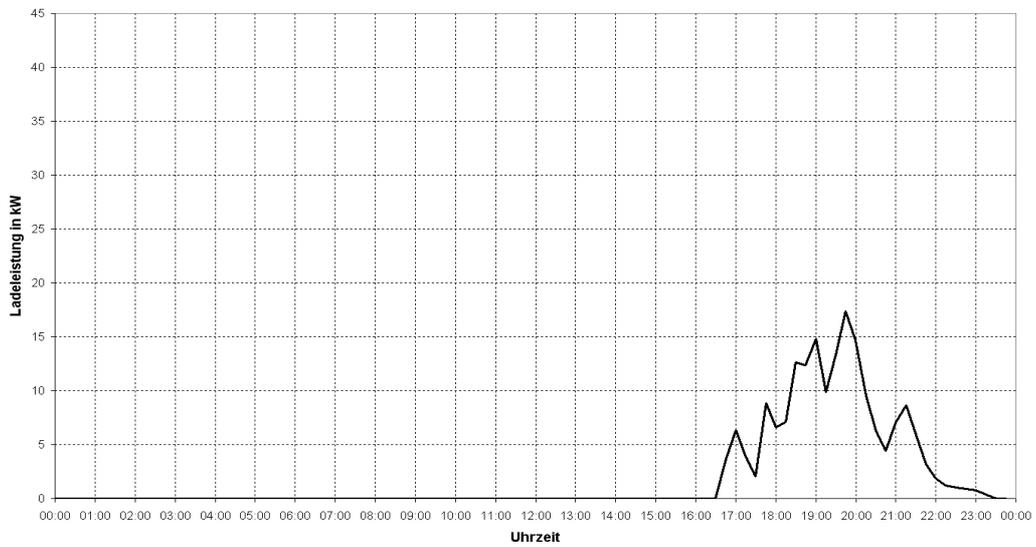


Abbildung 3.33: Ladeprofil des Fahrprofils Freizeit mit 17 BEV

4 Ergebnisse, Vergleiche und Variationen

Die Ladeprofile der vier Fahrprofile geben jetzt Auskunft darüber, zu welcher Uhrzeit welche Leistung benötigt wird, um die Energiespeicher der 100 BEV des Fahrprofilmixes wieder zu füllen. Im Unterkapitel 4.1 wird die Summe der Ladeprofile gebildet und das Ergebnis erläutert.

Die Ladevorgänge aller 100 BEV werden nach der letzten Fahrt zu Hause vorgenommen. Dadurch erhöht sich der Stromverbrauch erheblich. Im Unterkapitel 4.2 wird für eine Siedlung von 200 Haushalten die Relation zwischen bestehendem Stromverbrauch und Leistungsbedarf zur Ladung der Energiespeicher hergestellt.

Die Auswirkungen auf das Gesamtladeprofil, verursacht durch Variationen verschiedener Parameter, werden im Unterkapitel 4.3 untersucht.

4.1 Gesamtladeprofil des Fahrprofilmixes aus 100 BEV

Abbildung 4.1 zeigt die Summe der Ladeprofile der vier Fahrprofile und somit das Ladeprofil des gesamten Fahrprofilmixes (in weiterer Folge als Gesamtladeprofil bezeichnet). Zum besseren Vergleich sind hier die vier einzelnen Ladeprofile aus Abbildung 3.30 bis Abbildung 3.33 von Seite 42 ff. noch ergänzend eingetragen. Wie man sehr gut ersehen kann, bildet die Summe eine ausgeprägte Spitze um 19:00 Uhr mit einer Leistung von rund 115 kW. Diese Lastspitze hat pro Fahrzeug einen Wert von 1,15 kW/BEV. Würden theoretisch alle Batterien zur selben Zeit mit der maximalen Anschlussleistung von 3,68 kW an einer entsprechenden 230 V Steckdose mit 16 A Sicherung geladen werden, müsste man bei 100 BEV eine Leistung von 368 kW zur Verfügung stellen. Warum die mit dem Modell berechnete Leistungsspitze keine 368 kW beträgt, hat zwei Gründe. Erstens, durch die Normalverteilung laden nie alle Fahrzeuge zur selben Zeit und zweitens, wird nur dann eine Leistung von maximal 3,68 kW pro BEV benötigt, wenn der Ladeumschaltzeitpunkt s unterschritten und somit der Ladezustand SOC kleiner als 80 % wird. Wie man aber in Abbildung 3.20, Abbildung 3.22 und Abbildung 3.24 (Seite 35 ff) ersehen kann, kommt dies nur zu wenigen Zeitpunkten am Tag vor. Für die BEV des Fahrprofils Berufspendler tritt dieser Fall sogar zu keiner

Tageszeit ein (siehe Abbildung 3.18 auf Seite 34). Unabhängig vom Verlauf des Leistungsprofils beträgt die Summe der benötigten Ladeenergien aus allen Fahrprofilen 418 kWh/Tag bzw. 4,18 kWh/(Tag und BEV). Der durchschnittliche Leistungsbedarf eines gesamten Tages beträgt 20,7 kW bzw. 0,207 kW/BEV.

Abbildung 4.1 stellt jedoch nur das Ergebnis einer einzigen Berechnung dar. Jede weitere Berechnung durch das MATLAB-Programm würde auf Grund der Normalverteilung der Beginnzeiten der werktäglichen Wege ein anderes Ladeprofil des Fahrprofilmixes ergeben. Das bedeutet, dass sich die Form und somit auch der Zeitpunkt und die Höhe der Leistungsspitze des Ladeprofils verändern würden. Die Fläche unter der Kurve, also der Energiebedarf pro Tag, wäre davon aber nicht betroffen, da die Entladung der Batterien immer gleich ist. Der Energiebedarf hängt einzig und allein von den Parameter-einstellungen der Fahrprofile ab.

Um einem Überblick von der Bandbreite der möglichen Ladeprofilverläufe zu erhalten, wurde das gesamte Ladeprofil des Fahrprofilmixes 250-mal berechnet. Die Ergebnisse aller 250 Neuberechnungen sind in Form eines Punktdiagramms in Abbildung 4.2 dargestellt. Man sieht nun, dass die Leistungsspitze je nach Berechnung zwischen 65 kW und 125 kW zu liegen kommt. Das punktförmige Leistungsband beinhaltet die Werte von 25000 einzelnen Elektrofahrzeugen und stellt den Leistungsbereich, der in Wirklichkeit zum Laden der Energiespeicher benötigt würde, sehr gut dar.

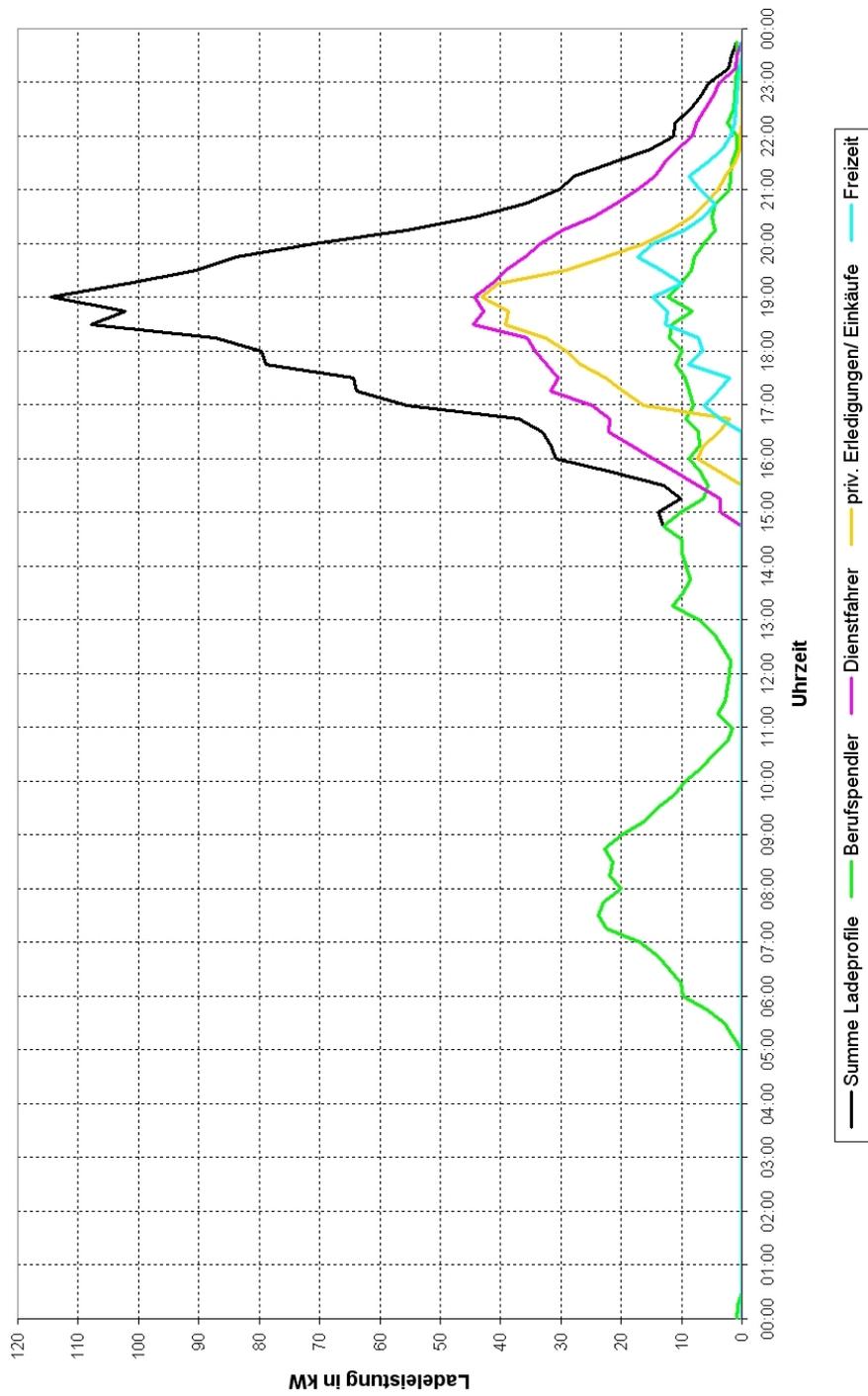


Abbildung 4.1: Ladeprofile der vier Fahrprofile und das Gesamtladeprofil von 100 BEV im Fahrprofilmix

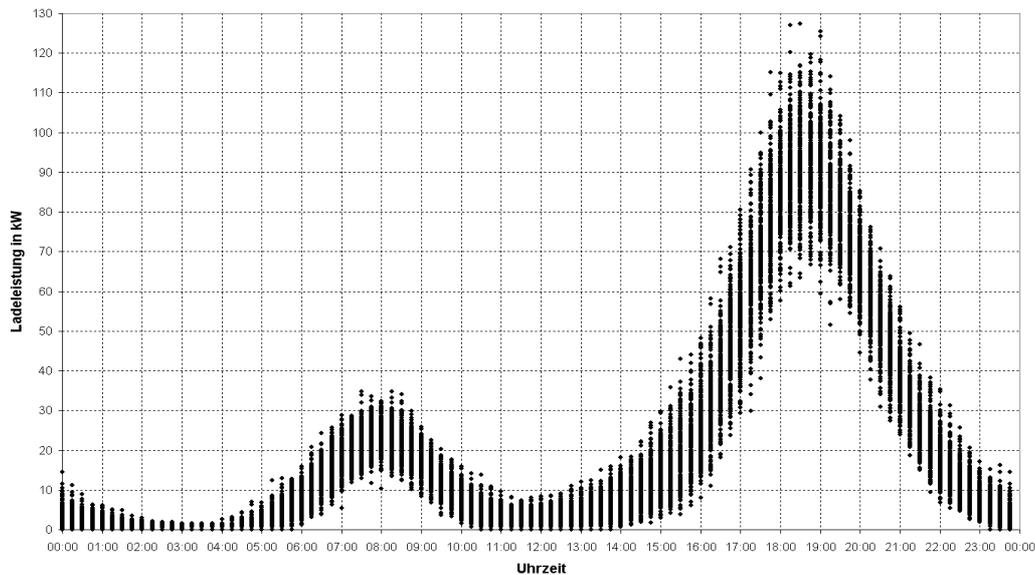


Abbildung 4.2: Die Bandbreite von 250 berechneten Gesamtladeprofilen bestehend aus je 100 BEV

4.2 Vergleich von Gesamtladeprofil mit Haushaltslastprofilen

Dafür wurden Standardlastprofile der VDEW herangezogen, wobei man drei Profilkategorien unterscheidet: Gewerbe, Landwirtschaft und Haushalt. Da das betrachtete Szenario aus einer Siedlung von 200 Haushalten besteht, wurde der Profiltyp H0 für Haushalte gewählt. Diese H0 Haushaltslastprofile gibt es für verschiedene Wochentage und Jahreszeiten. Abbildung 4.3 zeigt die werktäglichen Haushaltslastprofile H0 Sommer und H0 Winter für je 200 Haushalte. In der Fachliteratur werden die H0 Lastprofile mit einem Jahresenergiebedarf von 1000 kWh/a normiert. Der Mittelwert des Stromverbrauchs aller österreichischen Haushalte betrug für das Jahr 2008 laut [15] einen Wert von 4417 kWh. Deshalb wurden die H0 Haushaltslastprofile mit dem Faktor 4,417 multipliziert, um auf einen realistischen Energiebedarf eines Haushaltes zu gelangen. Auf Grund der Anzahl von 200 betrachteten Haushalten wurden die für einen Haushalt gültigen H0 Profile zusätzlich noch um den Faktor 200 vergrößert. Für die weiteren Vergleiche wird nur das H0 Winter Lastprofil herangezogen, da es das höhere Leistungsmaximum besitzt und somit den ungünstigeren Fall darstellt.

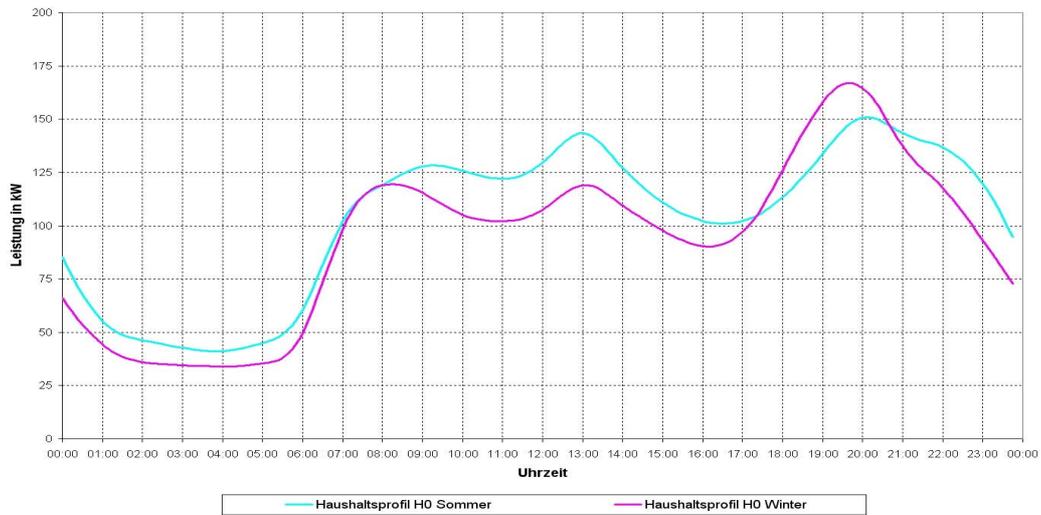


Abbildung 4.3: Vergleich werktägliches Haushaltslastprofil H0 Winter und H0 Sommer für je 200 Haushalte

In dieser Arbeit wird angenommen, dass jeder zweite Haushalt ein BEV besitzt und deshalb auf 200 Haushalte 100 BEV kommen. In Abbildung 4.4 ist das Ladeprofil des gesamten Fahrprofilmixes von 100 BEV aus Abbildung 4.1, das Haushaltslastprofil H0 für 200 Haushalte und deren Summe dargestellt. Die Spitze der Ladeleistung beträgt rund zwei Drittel jener des Stromverbrauches. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass das Ladeprofil das Ergebnis einer einzigen Berechnung ist und sich von jeder weiteren etwas unterscheidet (siehe dazu Abbildung 4.2). Man sieht deutlich, dass die Maxima von Lade- und Haushaltsprofil sich zeitlich überschneiden und somit die Summierung beider Profile die Abendspitze noch wesentlich auf 278 kW verstärkt. Dieser Leistungsbedarf müsste vom EVU für die Siedlung von 200 Haushalten mit 100 BEV bereitgestellt werden. Durch die Ladevorgänge der BEV steigt zusätzlich auch noch die pro Tag benötigte Energie je Haushalt, nämlich um rund 18 %.

Da der Berufspendler am Vormittag seinen Energiespeicher in der Park-and-Ride-Anlage bzw. am Arbeitsplatz füllt und somit in einem anderen als dem betrachteten Netz lädt (vergleiche Tabelle 3.1 auf Seite 21 in den Zeilen „Lademöglichkeit“), wurde der dafür notwendige Energiebedarf aus der Berechnung der Graphen in Abbildung 4.4 herausgenommen.

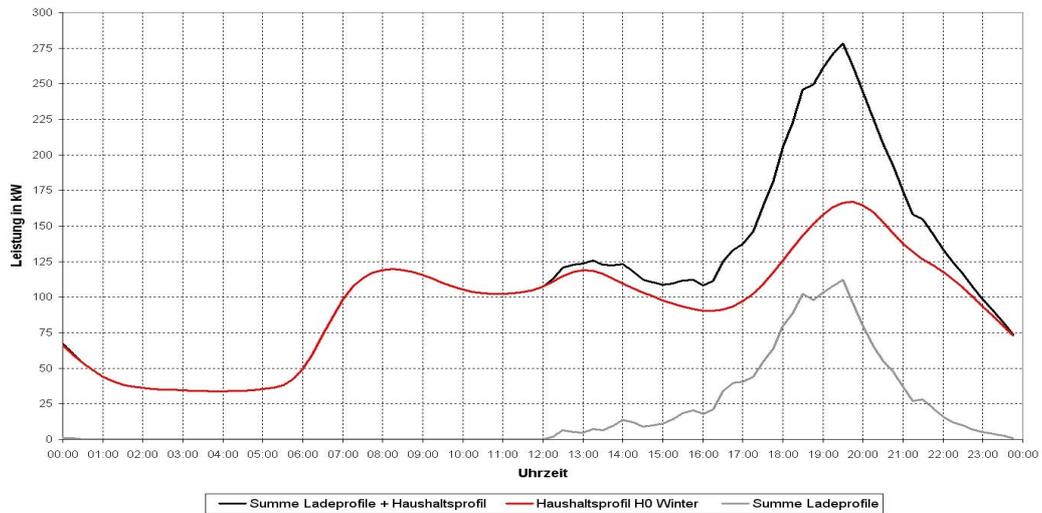


Abbildung 4.4: Gesamtladeprofil von 100 BEV aus Abbildung 4.1 und Haushaltslastprofil H0 Winter von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider

4.3 Parametervariationen

Parameter	Anzahl der BEV	Weglängen	Standardabweichungen	Ladeleistung
Variationsbereich	100 % bis 200 %	100 % bis 200 %	100 % bis 0 %	100 % bis 300 %
Beginnzeiten der Wege	für jede Variation unterschiedlich	für jede Variation gleich	für jede Variation unterschiedlich	für jede Variation gleich
Besonderheiten	Eine Verdopplung der Anzahl der BEV bewirkt keine Verdopplung des Leistungsmaximums	Für höhere Werte verschieben sich die Ladeprofilspitzen auf spätere Uhrzeiten	bei 0 % starten alle BEV zu den Erwartungswerten der zugehörigen Gaußschen Glockenkurven	Ladeprofil fluktuiert immer stärker mit der Leistungshöhe

Tabelle 4.1: Auflistung der verschiedenen Parametervariationen und deren Eigenschaften

Für diese Arbeit stellen die festgelegten Daten aus Tabelle 3.1 von Seite 21 die Standardwerte für die vier verwendeten Fahrprofile dar. Welche Auswirkungen Änderungen dieser Parameter auf das Gesamtladeprofil haben, wird in diesem Unterkapitel erläutert. Folgende vier Größen wurden zur Variation herangezogen: Die

Anzahl der BEV des Fahrprofilmixes, die Weglänge der täglichen Fahrten, die Standardabweichungen der Normalverteilungen und die vom Ladegerät aufgenommene maximale Leistung. Ihre Eigenschaften sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Nachfolgende Unterabschnitte zeigen für jeden gewählten Parameter vier Variationen mit konstanten Schrittweiten. Die Richtung der Veränderung und die Summe aller Schritte sind jedoch in den einzelnen Betrachtungen unterschiedlich.

Damit die Auswirkungen der veränderten Parameter besser zur Geltung kommen und nicht vom Einfluss der Normalverteilungen überschattet werden, wurde eine Veränderung des Modells vorgenommen. Bei der Variation der Größen Weglänge und Ladeleistung werden die Startzeitpunkte der täglichen Fahrten nur einmal für alle BEV berechnet und dann für jede Variation gleichgehalten.

4.3.1 Variation der Anzahl der BEV

Hier wurde von einer Gesamtzahl von 100 BEV für den Fahrprofilmix ausgegangen und diese in gleich weiten Schritten auf den doppelten Wert erhöht (siehe Tabelle 4.2). Dabei blieben aber die prozentuellen Anteile der Fahrprofile an der Gesamtzahl aller BEV mit 37 % für Berufspendler, 16 % für Dienstfahrer, 30 % für private Erledigungen/Einkäufe und 17 % für Freizeit konstant.

Abbildung 4.5 zeigt die resultierenden vier Ladeprofile. Eine größere Anzahl von Fahrzeugen geht Hand in Hand mit einem höheren Energiebedarf. Doppelt so viele BEV mit denselben Verkehrs- und Fahrzeugdaten benötigen auch doppelt so viel Energie zum Laden der Batterien. Dies spiegelt sich durch die Verdopplung der Fläche unter dem Leistungsprofil wider. Die Leistungsspitze steigt ebenfalls mit der Anzahl der BEV, weil mehrere Fahrzeuge gleichzeitig laden. Die Lage und Höhe des Ladeprofilmaximums verändert sich jedoch nicht proportional mit der Variation, sondern wird durch die Normalverteilung bestimmt. Dies führt dazu, dass bei einer Erhöhung der BEV-Anzahl um den Faktor 2, die Leistungsspitze nur um das 1,7-fache⁴ ansteigt.

⁴ Der Wert ist nur für diesen Durchlauf der Berechnung gültig.

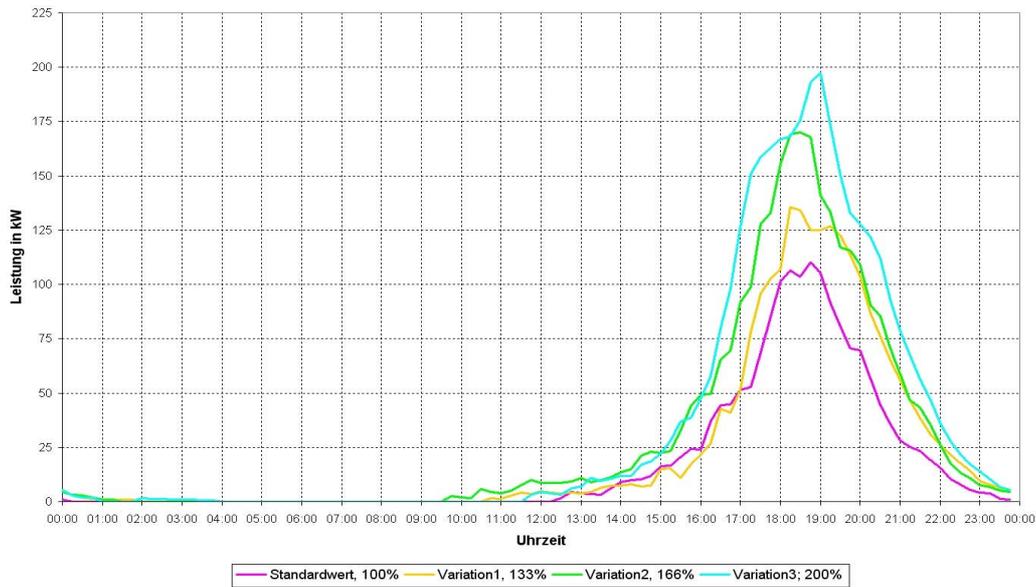


Abbildung 4.5: Variation der Anzahl der BEV von 100 BEV auf 200 BEV in drei gleich weiten Schritten

Parameter	Variationen	Absolutwerte	Relativwerte
Anzahl der BEV	1	100 BEV	100 %
	2	133 BEV	133 %
	3	166 BEV	166 %
	4	200 BEV	200 %

Tabelle 4.2: Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Anzahl der BEV. Die angeführten Werte stellen die Anzahl der BEV des gesamten Fahrprofilmixes dar

4.3.2 Variation der Weglängen

In dieser Betrachtung wurde von den Standardwerten der Gesamtstrecken pro Tag aus Tabelle 3.1 von Seite 21 ausgegangen und ebenfalls mit konstanten Änderungen auf das Doppelte erhöht. Damit die mittlere Fahrgeschwindigkeit gleich bleibt, wurde die Dauer pro Fahrt in gleicher Weise wie die Gesamtstrecke vergrößert. Zur Ausschaltung des Einflusses der Normalverteilung auf das Ergebnis sind die Beginnzeitpunkte der Wege nur einmal berechnet und für alle Variationen unverändert belassen worden.

In Abbildung 4.6 ist der Verlauf des Ladeleistungsprofils für die vier Variationen der Weglängen dargestellt und in Tabelle 4.3 sind die dazugehörigen Werte aufgelistet. Bei Verdoppelung der Weglängen wird, wie bei der Variation der Anzahl der BEV, die zweifache Ladeenergie zum Aufladen der Energiespeicher benötigt und dadurch die Fläche unter dem Ladeprofil verdoppelt. Dies führt aber auch hier nicht zu einer 2-mal so hohen Leistungsspitze, sondern nur zur Vergrößerung um den Faktor 1,6⁵. Je größer die Gesamtstrecke, desto länger dauert die Fahrt und umso später werden die Ladevorgänge gestartet.

Werden dieselben vier Variationen wie von den Weglängen auch beim Parameter Grid-to-Wheel-Verbrauch durchgeführt, ergeben sich die selben Kurvenverläufe wie in Abbildung 4.6. Mit dem einen Unterschied, dass die Gesamtstrecke konstant bleibt und somit die Ladevorgänge für jede Variation zur selben Zeit beginnen.

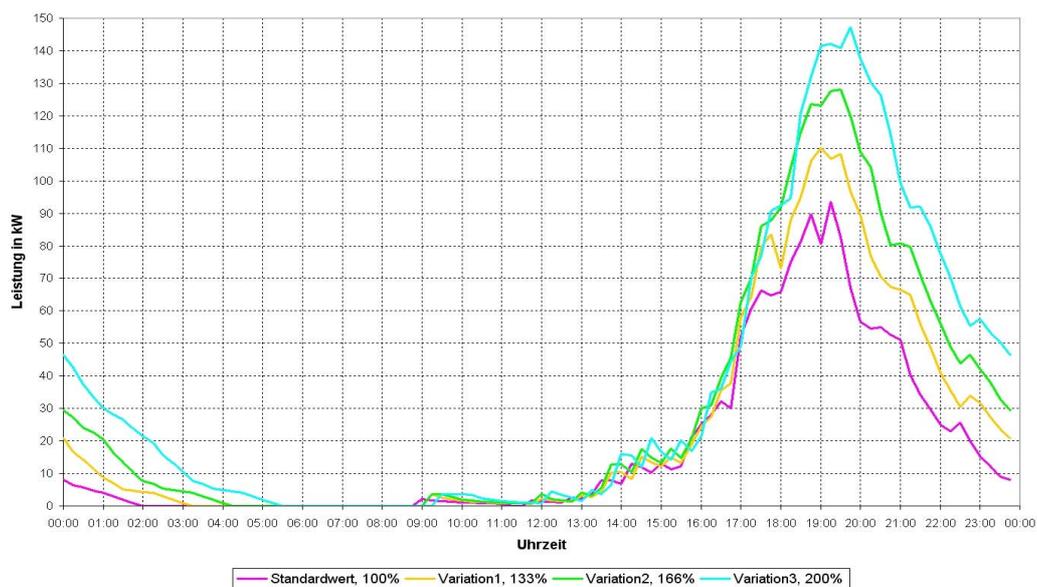


Abbildung 4.6: Variation der Weglängen von 100% (Standardwerte) auf 200% (doppelte Wege) in drei gleich weiten Schritten

⁵ Der Wert ist nur für diesen Durchlauf der Berechnung gültig.

Variationen der Weglängen	Relativwerte	Absolutwerte			
		Berufspendler	Dienstfahrer	private Erledigungen/ Einkäufe	Freizeit
1	100 %	28,8 km	71,0 km	29,6 km	21,1 km
2	133 %	38,3 km	94,4 km	39,4 km	28,1 km
3	166 %	47,8 km	117,9 km	49,1 km	35,0 km
4	200 %	57,6 km	142,0 km	59,2 km	42,2 km

Tabelle 4.3: Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Weglänge. Die angeführten Werte beziehen sich auf die Gesamtstrecken pro Tag

4.3.3 Variation der Standardabweichungen

Die Standardabweichungen σ sind für die Breite der Gaußschen Glockenkurven und somit für das Aussehen der Verteilung der Beginnzeiten der täglichen Wege und in weiterer Folge für den Verlauf der Ladestartzeitpunkte verantwortlich. Wie im vorhergehenden Unterabschnitt 4.3.2 wurde auch hier von den Standardwerten aus Tabelle 3.1 von Seite 21 ausgegangen. Jedoch wurde der Parameter nicht erhöht, sondern in vier gleich großen Schritten auf null reduziert. Eine Standardabweichung von null führt dazu, dass alle BEV eines Fahrprofils zur selben Zeit, nämlich im Zeitpunkt des definierten Erwartungswertes, wegfahren und deshalb ihre Ladeprofile deckungsgleich sind.

Die Standardabweichungen der verschiedenen Variationen sind in Tabelle 4.4 angeführt. Diese Werte gehören zu den Normalverteilungen der letzten Fahrten pro Tag und sind für das Gesamtladeprofil relevant, da ausschließlich nach der letzten Strecke im betrachteten Netz geladen wird. In Abbildung 4.7 sind die Gesamtladeprofile dargestellt. Man kann gut erkennen, dass die Verläufe mit kleiner werdenden Standardabweichungen immer enger und höher werden. Der Grund dafür ist, dass bei geringeren Standardabweichungen die BEV eines Fahrprofils ihre Wege in immer kleineren Zeiträumen antreten und infolgedessen in kürzeren Abständen zu laden beginnen. Dadurch wird in Summe auch mehr Momentanleistung benötigt. Die Fläche unter den Kurven ist gleich der Ladeenergie und bleibt in allen vier Fällen konstant.

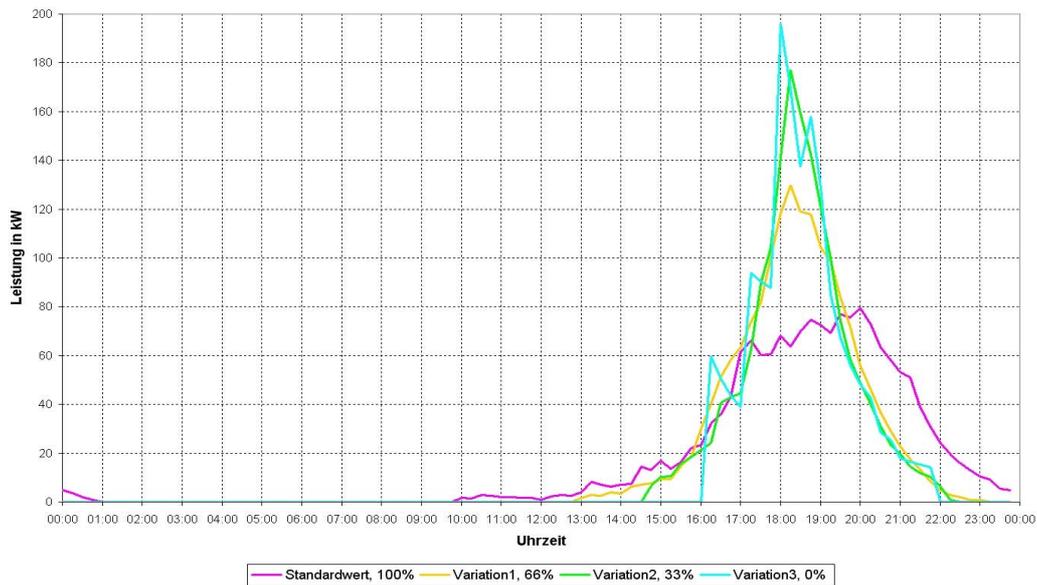


Abbildung 4.7: Variation der Standardabweichung von 100% (Standardwerte) auf 0% in drei gleich weiten Schritten

Variationen der Standardabweichung σ	Relativwerte	Absolutwerte			
		Berufspendler	Dienstfahrer	private Erledigungen/ Einkäufe	Freizeit
1	100 %	2,70 h	1,70 h	1,10 h	1,50 h
2	66 %	1,78 h	1,12 h	0,73 h	1,00 h
3	33 %	0,89 h	0,56 h	0,36 h	0,50 h
4	0 %	0,00 h	0,00 h	0,00 h	0,00 h

Tabelle 4.4: Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Standardabweichung σ . Die angeführten Standardabweichungen gehören zur Normalverteilung der letzten Tagesfahrt

4.3.4 Variation der Ladeleistung

Bis jetzt wurde eine maximale Anschlussleistung von 3,68 kW angenommen, was einer Spannung von 230 V und einem maximalen Strom von 16 A gleichkommt. Dieser maximale Leistungswert könnte zwar aus einer haushaltsüblichen Schukosteckdose

entnommen werden, dies allerdings nur kurzzeitig. Zum Laden der BEV-Batterien müssen spezielle Steckdosen montiert werden, die für einen Dauerbetrieb in einem derartigen Leistungsbereich ausgelegt sind und dabei nicht überhitzen. Wünscht man sich nun einen kürzeren Ladezyklus, muss die Ladeleistung erhöht werden. Bei dieser Variation wurde die Ladeleistung in vier gleich großen Schritten bis zum dreifachen Wert von rund 11 kW erhöht. Dies entspricht einer dreiphasigen verketteten Spannung von 400 V und einem Strom von 16 A. Wie bei der Variation der Weglängen wurden auch in diesem Unterabschnitt zur Unterdrückung des Einflusses der Normalverteilung die Beginnzeitpunkte der Wege nur einmal berechnet und dann für alle Variationen unverändert belassen.

In Abbildung 4.8 sind die vier entstandenen Gesamtladeprofile dargestellt und in Tabelle 4.5 die dazugehörigen Werte aufgelistet. Ist der Ladezustand der Batterie am Beginn des Ladevorganges unter 80 %, wird mit der maximalen Leistung geladen. Wird anschließend der Ladeumschaltpunkt s erreicht, beginnt die Spannungsphase, und die Ladeleistung P nimmt exponentiell ab (siehe Unterabschnitt 2.2.2). Deshalb fluktuieren die zeitlichen Verläufe mit steigender Leistung immer stärker.

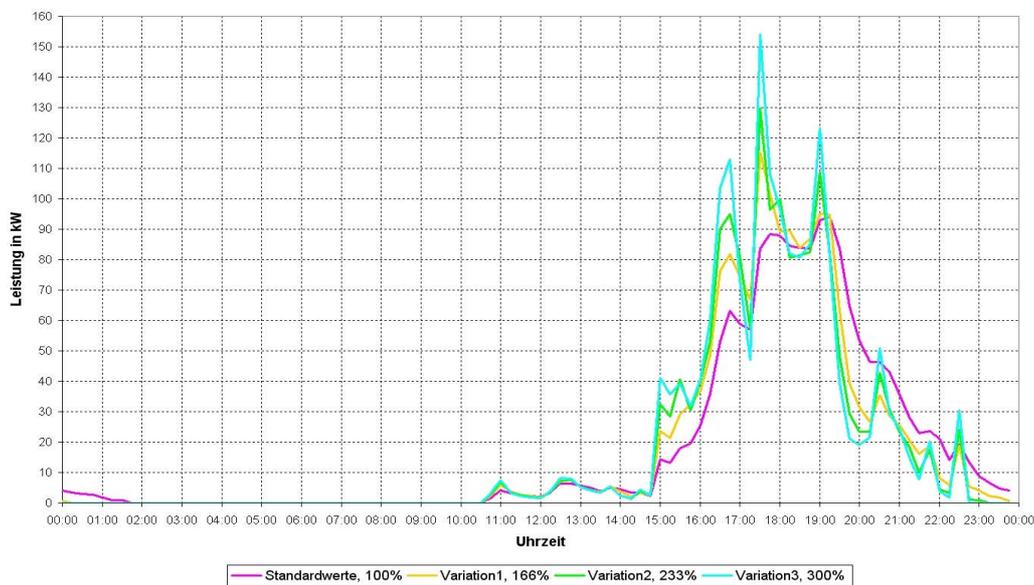


Abbildung 4.8: Variation der Ladeleistung von 3,7 kW auf 11 kW in drei gleich weiten Schritten

Parameter	Variationen	Absolutwerte	Relativwerte
Ladeleistung	1	3,7 kW	100 %
	2	6,1 kW	166 %
	3	8,5 kW	233 %
	4	11,0 kW	300 %

Tabelle 4.5: Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Ladeleistung. Die angeführten Leistungswerte stellen die Maximalleistung dar

Abbildung 4.9 zeigt den Leistungsbedarf bei unterschiedlichen Ladezeiten. Man sieht deutlich, dass bei höheren Leistungen die benötigte Ladezeit stark zurückgeht. Bei einer Leistung von 44 kW dauert eine Ladung von 7,2 kWh unter einer Viertelstunde. So ein Leistungsbedarf kann allerdings rasch zu Netzüberlastungen führen und die Batterie beschädigen, wenn sie nicht im entsprechenden Maß hochstromfähig ist. Weiters sind eingebaute Ladegeräte ab einer gewissen Leistungsgrenze nicht mehr zulässig und müssen durch externe ersetzt werden. Diese und noch weitere Probleme können bei der Verwendung von hohen Ladeleistungen entstehen. Eine nähere Erörterung ist aber nicht Teil dieser Arbeit.

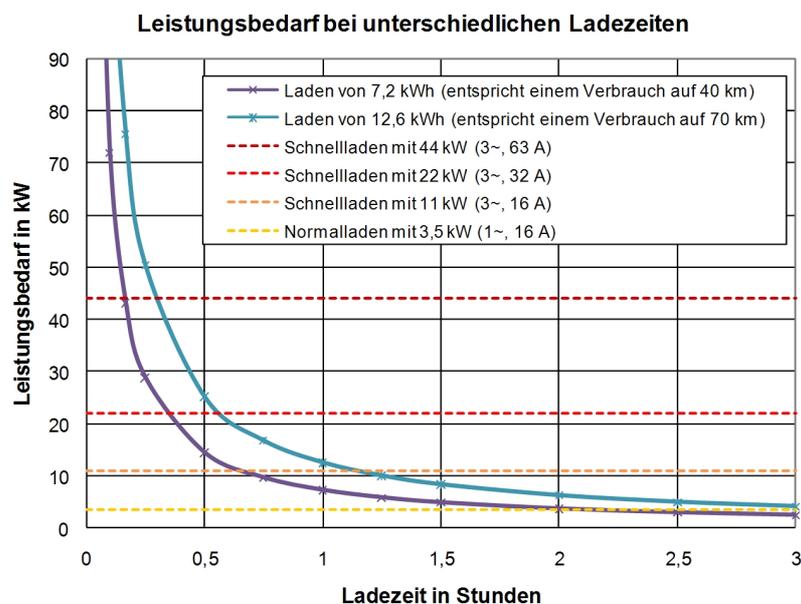


Abbildung 4.9: Leistungsbedarf bei unterschiedlichen Ladezeiten und Energiemengen [16]

5 Ladeszenarien und Umsetzungsstrategien

Das Aufladen der Energiespeicher von Elektrofahrzeugen erfolgt im Allgemeinen auf zwei verschiedene Arten. Entweder durch ungesteuertes Laden oder durch gesteuertes Laden. Die erste Variante ist die heutzutage übliche Form des Wiederaufladens von Batterien. Dabei beginnt der Ladevorgang sofort nach Anschluss des Ladegeräts. Dies führt jedoch, wie in Abbildung 4.4 auf Seite 49 ersichtlich, zu einer starken Erhöhung der Haushaltsspitzenlast.

Im Unterkapitel 5.1 werden für das ungesteuerte Laden verschiedene Szenarien, die sich durch den Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur unterscheiden, betrachtet und die entstandenen Ladeprofile mit dem H0 Haushaltslastprofil verglichen.

Möchte man nun die Lasterhöhungen auf Grund des ungesteuerten Ladens minimieren oder sogar verhindern, muss das Laden gesteuert vor sich gehen. Die Umsetzung des gesteuerten Ladens hat jedoch einen hohen Mehraufwand zur Folge. Unterkapitel 5.2 beschäftigt sich mit mehreren Szenarien zu diesem Thema und stellt mögliche Umsetzungsstrategien vor.

5.1 Das ungesteuerte Laden

Im Unterkapitel 3.3 wurde festgelegt, dass Berufspendler im Gegensatz zu den anderen Fahrprofilen die Möglichkeit erhalten zweimal pro Tag zu laden (vergleiche dazu Tabelle 3.1 auf Seite 21). Dabei haben alle Fahrprofile gemein, dass sie nach der letzten Fahrt zu Hause die Batterie wieder voll aufladen. Das sich aus diesen Annahmen ergebende Gesamtladeprofil wurde in Abbildung 4.1 auf Seite 46 präsentiert. Drei unterschiedliche Szenarien zeigen was geschieht, wenn die Anzahl der Ladevorgänge pro Tag und somit die Lademöglichkeiten verändert werden. Die Ergebnisse für eine Siedlung mit 200 Haushalten und einem Fahrprofilmix aus 100 BEV sind in den folgenden drei Unterkapiteln angeführt.

5.1.1 Ladevorgang einmal pro Tag im betrachteten Netz

In diesem Fall wird bei allen Fahrprofilen nur nach der letzten Fahrt und ausschließlich im betrachteten Netz geladen. Dies führt dazu, dass jetzt auch beim Berufspendler die gesamte Ladeenergie am Abend bereitgestellt werden muss und nicht, wie im Unterkapitel 3.3 angenommen, ein Aufladen am Arbeitsplatz oder in einer Park-and-Ride-Anlage möglich ist. Dadurch verdoppelt sich im betrachteten Netz die notwendige Ladeenergie der Berufspendler von rund 78,8 kWh auf 157,7 kWh. Die Summe aus Gesamtladeprofil und Haushaltslastkurve ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die Leistungsspitze beträgt ca. 252 kW und ist verglichen mit jener aus Abbildung 4.4 auf Seite 49 (diese hat rund 257 kW) etwas niedriger. Das erscheint im ersten Moment unrealistisch: bei genauerer Betrachtung sieht man allerdings, dass das Maximum des Ladeprofils sehr wohl höher ist (127 kW zu 112 kW). Schuld an dieser Eigenart ist die verwendete Normalverteilung, welche bei jeder Neuberechnung zum Tragen kommt und die Höhe und die Lage des Ladeprofilmaximums beeinflusst. Dadurch verändert sich das Bild bei jeder weiteren Berechnung.

Durch die Verdopplung der benötigten Ladeenergie der Berufspendler im betrachteten Netz am Abend, kommt es zu einer Verbreiterung des Gesamtladeprofils. Zusätzlich zum höheren Energiebedarf am Abend kommt es bei diesem Szenario zu einem weiteren Problem. Durch das Fehlen von Ladeinfrastruktur – deshalb wird hier auch nur zu Hause geladen – kann pro Tag nicht weiter gefahren werden als mit einer Batterieladung möglich ist – vorausgesetzt es wird zwischendurch zu Hause kein zweites Mal geladen.

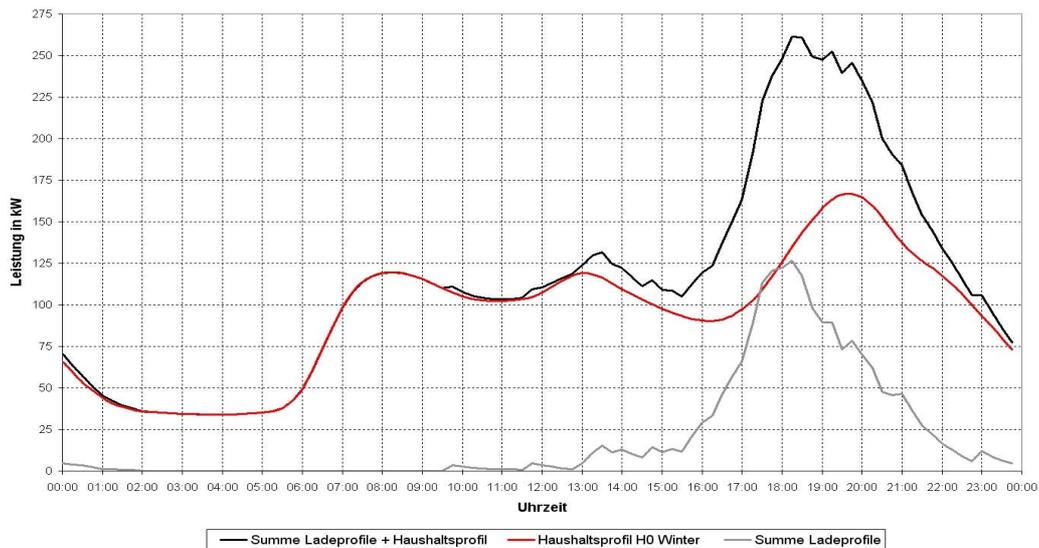


Abbildung 5.1: Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Geladen wird nur nach der letzten Fahrt im betrachteten Netz (Siedlung)

5.1.2 Ladevorgang nach jeder Fahrt an verschiedenen Orten

In diesem Szenario wird ausnahmslos nach jeder Fahrt geladen, aber nur nach der letzten im betrachteten Netz. Die weiteren Ladevorgänge werden an anderen Orten und somit in anderen Netzen vorgenommen. Das bedeutet, dass an jedem Stellplatz auch eine Lademöglichkeit zur Verfügung stehen muss. Dieses Szenario beschreibt somit eine Zukunft, in der die Ladeinfrastruktur voll ausgebaut ist. Da einige Standzeiten nur von geringer Dauer sind, kann es dazu kommen, dass die Batterie beim Antritt des nächsten Weges noch nicht vollständig geladen ist. In dieser Betrachtung wird der Ladevorgang unabhängig vom Ladezustand der Batterie unterbrochen und die nächste Fahrt begonnen.

Kurze Standzeiten werfen die Frage nach schnelleren Ladezyklen auf. Diese können durch so genanntes Schnellladen (= Verwendung von höheren Ladeleistungen) realisiert werden. Als Folge davon entstehen enorme Spitzenlasten bei mehreren gleichzeitigen Ladevorgängen. Weitere Punkte zu diesem Thema wurden im Abschnitt 4.3.4 diskutiert.

Abbildung 5.2 zeigt das Gesamtladeprofil, das Haushaltslastprofil, wie auch die Summe von beiden. Man kann erkennen, dass sich das Maximum der Ladeleistung am Abend auf relativ geringe 43 kW reduziert hat und die zur vollständigen Ladung der Batterien

notwendige Energie im betrachteten Netz ca. 204 kWh/Tag⁶ beträgt. Verglichen mit den Werten aus dem vorigen Abschnitt 5.1.1 sind Leistungsspitze und benötigte Ladeenergie mehr als halbiert.

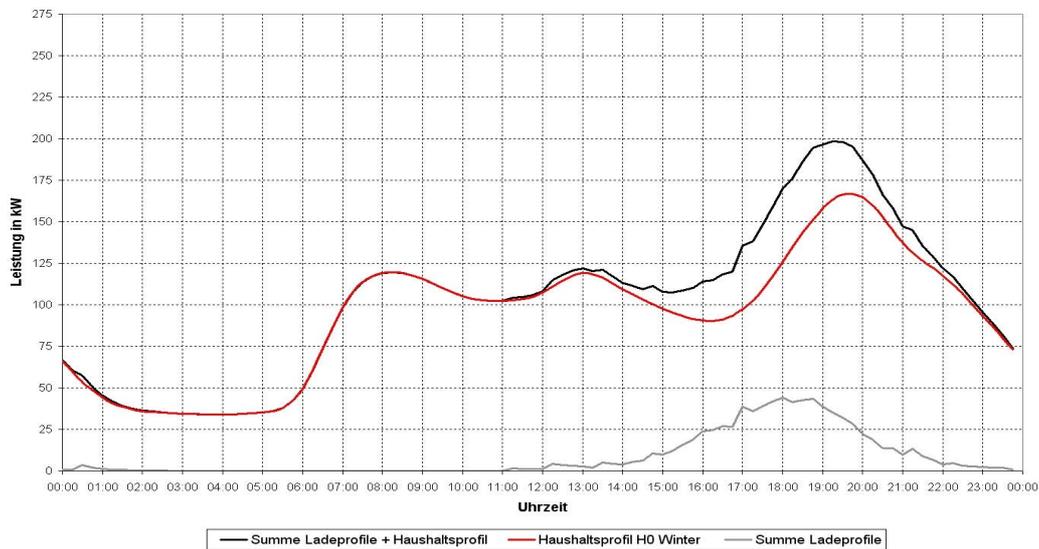


Abbildung 5.2: Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Geladen wird nach jeder Fahrt, aber nur nach der letzten im betrachteten Netz (Siedlung)

5.1.3 Ladevorgang nach jeder Fahrt im betrachteten Netz

Im dritten Szenario wird nach jeder Fahrt und immer im betrachteten Netz geladen. Auf Grund der Tatsache, dass in der Realität keine Fahrt (ohne Unterbrechung) zu Hause startet und dort wieder endet, bezieht sich das nun betrachtete Netz nicht mehr nur auf die Siedlung von 200 Haushalten, sondern auf das gesamte öffentliche Verteilnetz. Dieses Szenario beschreibt also den Verlauf der Summe der Ladeleistungen aller 100 Elektrofahrzeuge für einen ganzen Tag. In Abbildung 5.3 ist das Gesamtladeprofil und zum Vergleich auch das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten dargestellt. Eine Summierung beider Profile ist auf Grund der getroffenen Netzerweiterung nicht mehr aussagekräftig. Es zeigt aber deutlich, dass im Größenvergleich das Ladeprofil zu jeder Uhrzeit kleiner als das Haushaltslastprofil bleibt.

⁶ Die über einen Werktag benötigte Ladeenergie ist natürlich in jedem Szenario gleich.

Dieses Szenario verdeutlicht den Tagesverlauf jener Leistung, welche zum Laden der Energiespeicher aufgebracht werden muss, um ein Laden nach jeder Fahrt für 100 BEV zu gewährleisten. Die Ladeleistung ist zwischen 06:30 Uhr und 20:30 Uhr nahezu gleich bleibend, beträgt im Mittel ca. 35 kW und müsste in diesem Zeitraum ständig zur Verfügung stehen.

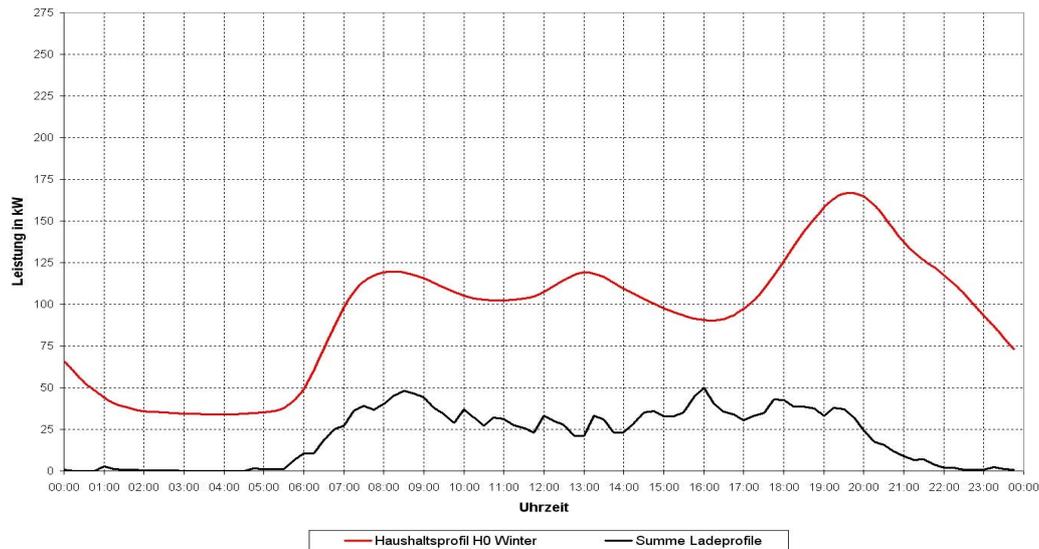


Abbildung 5.3: Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten. Geladen wird nach jeder Fahrt immer im betrachteten Netz (gesamtes Versorgungsnetz)

5.2 Das gesteuerte Laden

Beim gesteuerten Laden werden die Startzeiten der Ladevorgänge von außen manipuliert um das Ladeprofil zu verändern. Dabei unterscheidet man zwischen erzeugerseitig und verbraucherseitig gesteuertem Laden. Werden Energieüberschüsse im öffentlichen Verteilnetz beispielsweise aus Solar- oder Windkraftanlagen durch Ladevorgänge abgebaut, ist von erzeugerseitig gesteuertem Laden die Rede. Das verbraucherseitig gesteuerte Laden kommt zum Einsatz, wenn das Ziel verfolgt wird, durch das Laden der BEV-Batterien die Haushaltslastspitze nicht zu erhöhen. In dieser Arbeit werden einzig Szenarien des verbraucherseitig gesteuerten Ladens betrachtet, und deshalb wird in weiterer Folge nur mehr von gesteuertem Laden gesprochen.

Beginnen alle Ladevorgänge gleich nach dem Anschluss des Ladegeräts an die Steckdose, kann es zu enormen Erhöhungen der Haushaltslastspitze kommen, was beim ungesteuerten Laden der Fall ist (siehe Unterkapitel 5.1). Mit Hilfe des gesteuerten Ladens werden die Ladezeiten dermaßen verschoben, dass ein Überlappen der Maxima von Gesamtladeprofil und Haushaltslastprofil verhindert wird, um noch höhere Spitzen zu vermeiden. In den nachfolgenden drei Unterkapiteln werden verschiedene Szenarien präsentiert und Strategien zur Realisierung erläutert.

5.2.1 Laden ab Punkt 22:00 Uhr

Unabhängig welche normalverteilten Ladestartzeitpunkte sich im Unterkapitel 3.7 für die einzelnen Fahrprofile ergeben haben, in diesem Szenario wird ausschließlich ab 22:00 Uhr geladen – gültig für alle 100 BEV der betrachteten Siedlung von 200 Haushalten. Damit wird eine Verschiebung der Ladevorgänge auf einen Zeitraum nach der Haushaltslastspitze erreicht. Genau betrachtet beginnen die Ladevorgänge um Punkt 22:00 Uhr, vorausgesetzt der letzte Weg wurde schon beendet. Andernfalls wird sofort nach dem Ankommen das Laden gestartet. Da der Großteil der 100 BEV schon vor 22:00 Uhr zu Hause eintrifft, kommt es zu sehr vielen simultanen Ladestarts. Dies führt zu einem sprunghaften Anstieg und stark ausgeprägtem Maximum des Leistungsbedarfs.

In Abbildung 5.4 ist der Verlauf des resultierenden Gesamtladeprofiles, des Haushaltslastprofils, wie auch die Summe beider ersichtlich. Das Maximum des Summenprofils liegt bei 404 kW und ist sogar rund 1,6-mal höher als das Maximum beim ungesteuerten Laden (siehe Abbildung 4.4 auf Seite 49). Dies zeigt deutlich, dass eine alleinige Verschiebung der Ladestartfreigabe auf einen Zeitpunkt in der Nachtsenke keine Vorteile bringt, sondern eine zusätzliche Verteilung der Ladestartzeitpunkte von Nöten ist.

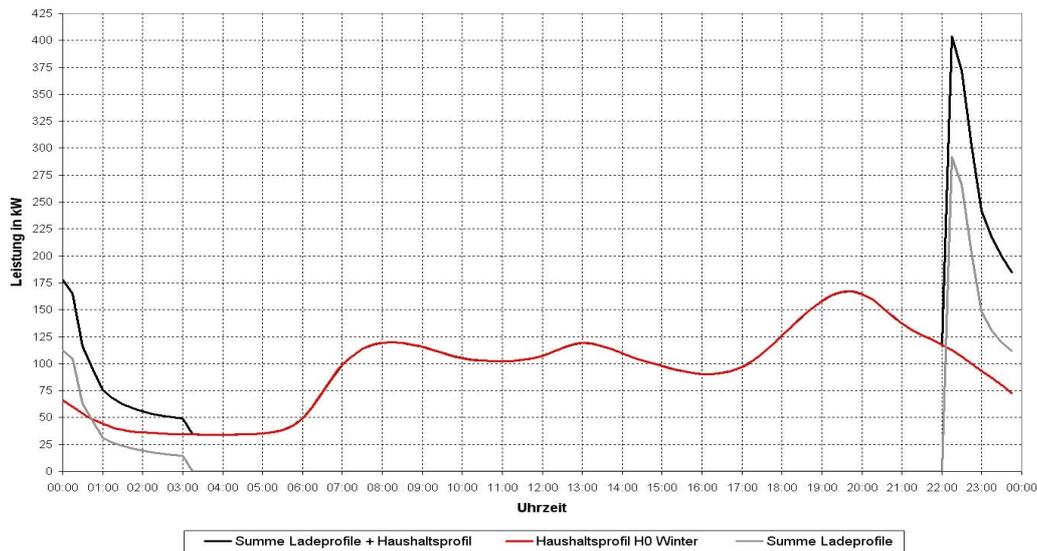


Abbildung 5.4: Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden ab Punkt 22 Uhr von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider

5.2.2 Verteiltes Laden in einem Zeitfenster

Damit zu einem Zeitpunkt nicht allzu viele Ladevorgänge zusammen auftreten, wird bei diesen Szenarien von einer Gleichverteilung der Ladestartzeitpunkte ausgegangen. Alle Ladevorgänge starten dabei in einem Zeitfenster von mehreren Stunden. Im ersten Szenario beträgt dieses vier Stunden und reicht von 22:00 Uhr bis 02:00 Uhr. Das Zeitfenster des zweiten Szenarios hat eine Spanne von sechs Stunden, welche sich von 21:00 Uhr bis 03:00 Uhr erstreckt.

Abbildung 5.5 zeigt das Ergebnis des ersten Szenarios. Durch das gesteuerte Laden in der Nachtsenke der Haushaltslast entsteht dort ein deutlich sichtbarer Anstieg des Leistungsbedarfs. Das Maximum beträgt ca. 172 kW und liegt nicht mehr wesentlich höher als die Spitze des Haushaltslastprofils mit etwa 167 kW. Die letzten Ladevorgänge werden um 07:00 Uhr in der Früh beendet. Beim zweiten Szenario ist das Ladefenster um zwei Stunden verlängert. Da es jedoch um eine Stunde früher beginnt, enden die Ladevorgänge auch nur eine Stunde später. Wie in Abbildung 5.6 ersichtlich, könnte dadurch eine weitere Verbesserung des Summenprofils erreicht werden. Während des gesteuerten Ladens liegt das Lastmaximum immer unter der Haushaltslastspitze. Dies

zeigt, dass ein Anheben der maximalen Haushaltslast durch Anwendung von gesteuertem Laden verhindert werden kann.

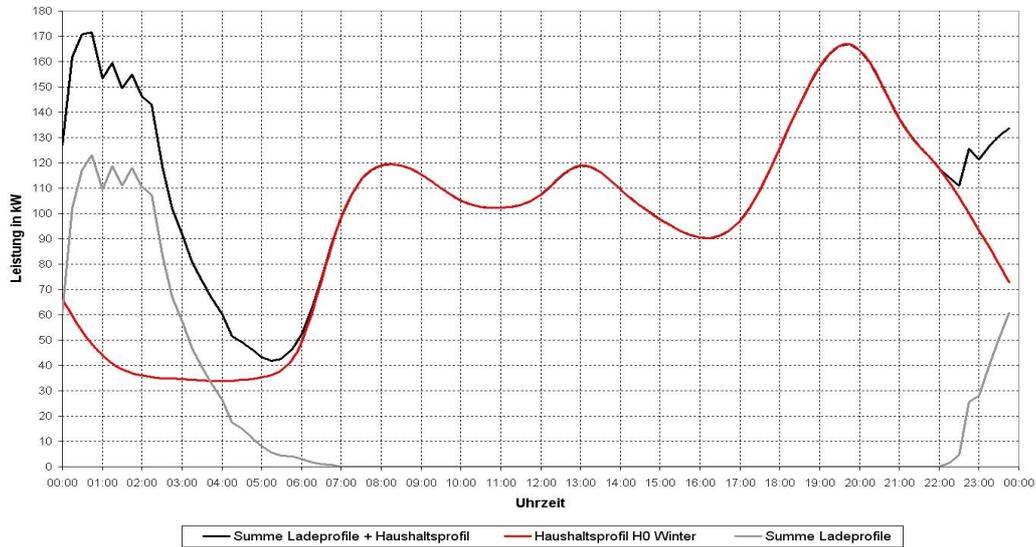


Abbildung 5.5: Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden mit Ladestartfenster von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Das Ladestartfenster beträgt vier Stunden und reicht von 22:00 Uhr bis 02:00 Uhr

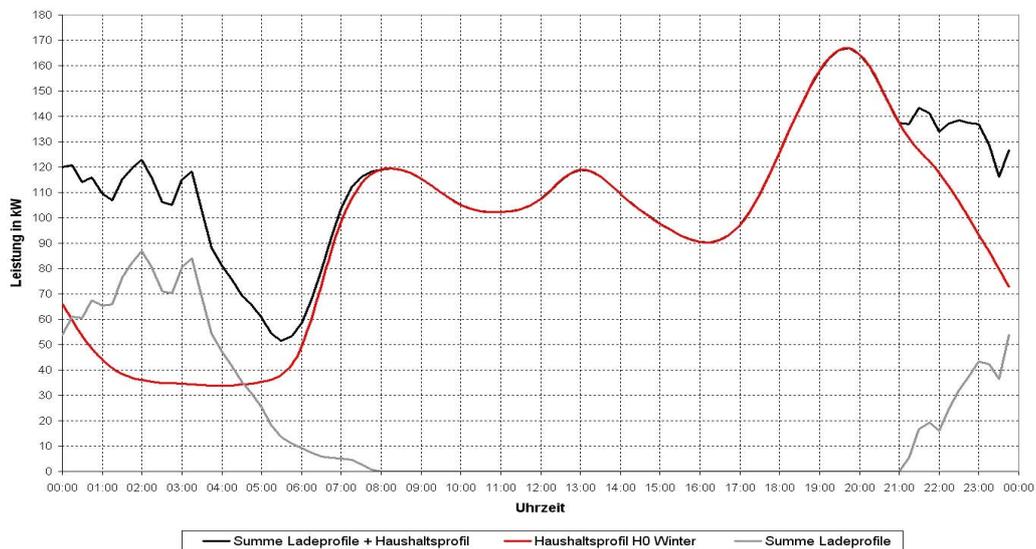


Abbildung 5.6: Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden mit Ladestartfenster von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Das Ladestartfenster beträgt sechs Stunden und reicht von 21:00 Uhr bis 03:00 Uhr

Eine Steuerungsart, welche das Laden in einem vorgegebenen Zeitfenster bewerkstelligen könnte, kommt in ähnlicher Form z.B. bei Nachtspeicherheizungen zum Einsatz. Diese werden von den EVU ferngesteuert aktiviert und ebenfalls in den Nachtstunden innerhalb eines definierten Zeitfensters betrieben. Die dazu verwendete Rundsteuertechnik könnte auch beim gesteuerten Laden der BEV angewandt werden und wird deshalb hier kurz beschrieben⁷. Wie beim Rundfunk wird ein großflächiger Bereich mit einem Signal bestrahlt, welches innerhalb dieser Fläche von einer unbegrenzten Anzahl von Rundfunkgeräten empfangen werden kann. Bei der Rundsteuertechnik stellt aber das öffentliche Verteilnetz das Übertragungsmedium dar. Die Signale werden vom EVU über einen Sender und einer entsprechenden Ankopplung ins Netz eingespeist. Die dabei verwendeten Steuerbefehle werden durch Impulsfolgen mit einer vom EVU abhängigen Frequenz von einigen hundert Hertz gebildet und der 50-Hz-Netzspannung mit einer Amplitude im einstelligen Prozentbereich überlagert. Die mittels Codierung entstandenen „Telegramme“ können nun beim Verbraucher über spezielle Empfänger aus dem Netz gefiltert werden und die gewünschten Steuersignale abgeleitet werden. Sollte diese Technik beim gesteuerten Laden eingesetzt werden, müssten die notwendigen Rundsteuerempfänger an den Ladeorten montiert werden.

5.2.3 Optimiertes Laden in den Lastsenken

In den zuletzt besprochenen Szenarien wurden zwar die Ladestartzeitpunkte in die Nachtsenke verschoben, aber die konkrete Form des Gesamtladeprofiles nicht vorgegeben. Stellt man sich nun das Haushaltslastprofil wie ein Gebirge mit einem davor liegenden tiefen Becken vor und füllt man dieses noch mit Wasser, würde ein See mit einer ebenen Oberfläche entstehen. Dies wird hier im übertragenen Sinne getan. Das Gesamtladeprofil wird so beeinflusst, dass es mit dem Haushaltslastprofil zusammen in den Nachtstunden konstant verläuft.

⁷ Für nähere Informationen siehe [17]

Abbildung 5.7 stellt das Ergebnis des optimierten Ladens in der Nachtsenke dar. Das resultierende Plateau erstreckt sich von 22:40 Uhr bis kurz nach 07:00 Uhr mit einer Gesamtleistung von rund 103 kW. Möchte man diesen Wert noch etwas verringern, könnte ein gesteuertes Laden auch in der Nachmittagssenke zugelassen werden. Dieses Szenario ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die neue Gesamtleistung ergibt 99,7 kW. In beiden Fällen beträgt die benötigte Ladeenergie, wie im Unterkapitel 4.1, 418 kWh/Tag.

Bei dieser Form des gesteuerten Ladens würde eine Rundsteuerung zur Realisierung nicht mehr ausreichen, da sie unidirektional arbeitet und keine Rückmeldung der Empfänger vorsieht. Man müsste eine bidirektionale Kommunikation zwischen zentraler Steuereinheit und den Verbrauchern aufbauen. Dann könnte das Endgerät beim Verbraucher auch als Sender agieren und die benötigten Angaben über den aktuellen Ladestand verschicken. Mit diesen Informationen wäre es der zentralen Steuereinheit möglich, das Ladeverhalten bzw. die Ladeleistungen der einzelnen BEV so zu koordinieren, dass die Haushaltlast plus Ladeleistung eine konstante Gesamtleistung ergäbe. Wird es dem Benutzer eines BEV ermöglicht, die Antrittszeit der ersten Fahrt am Ladegerät einzugeben, könnte die zentrale Steuereinheit außerdem darauf achten, dass die Batterie bis dorthin wieder voll geladen ist.

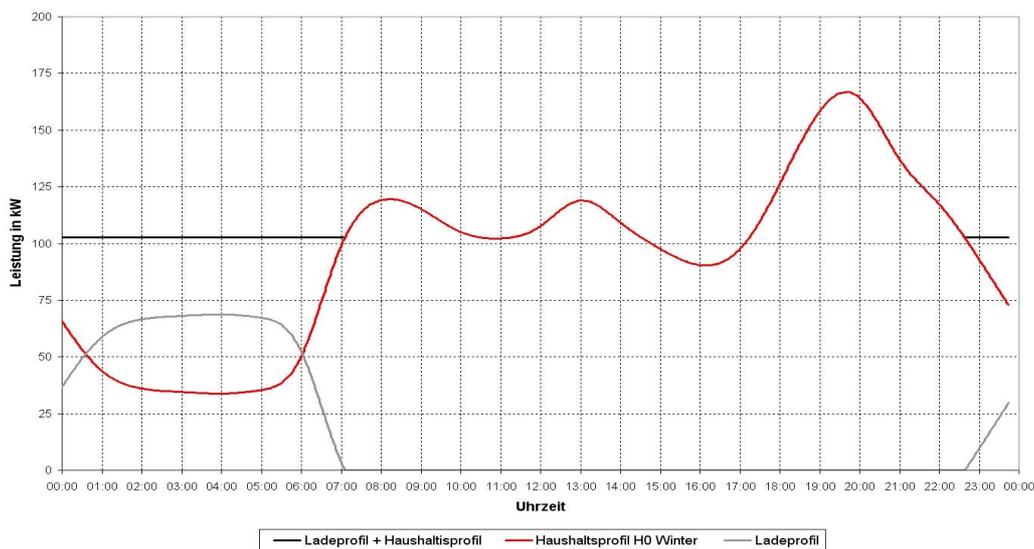


Abbildung 5.7: Gesamtladeprofil des gesteuerten Ladens mit Optimierung auf die Nachtsenke von 100 BEV und Haushaltlastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider

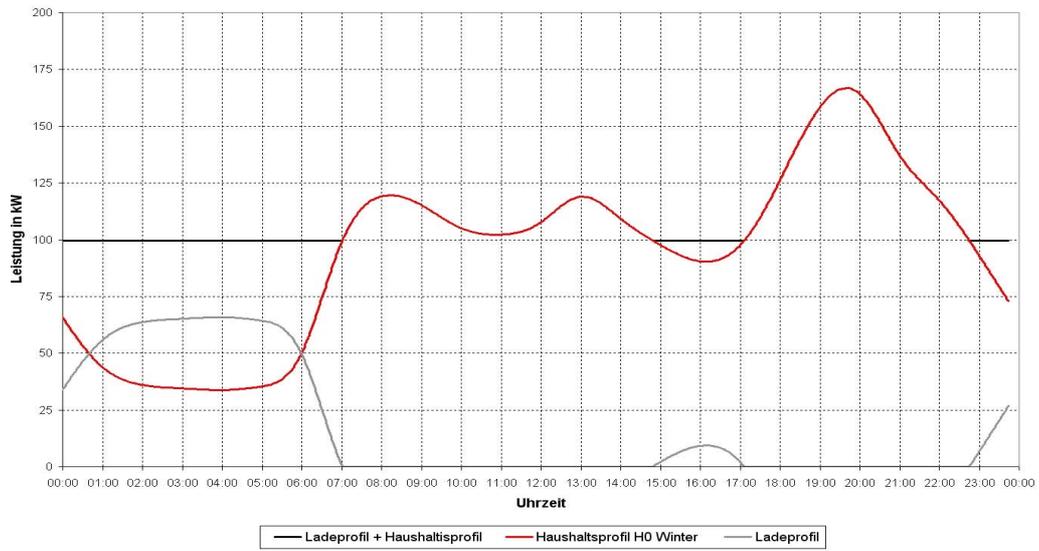


Abbildung 5.8: Gesamtladeprofil des gesteuerten Ladens mit Optimierung auf Nacht- und Nachmittagsenke von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider

6 Schlussfolgerungen

In Ermangelung an bereits vorhandenen Verkehrsstudien über Elektrofahrzeuge musste auf Statistiken des österreichischen motorisierten Individualverkehrs zurückgegriffen werden. Dessen vier häufigste Wegzwecke stellen die verwendeten Fahrprofile dar. Betrachtet man die Verläufe des Ladezustandes SOC, ist zu erkennen, dass zumindest die durchschnittlichen Weglängen pro Tag des MIV ohne weiteres mit heutzutage üblichen Batteriegrößen zurückgelegt werden können. Die BEV des Fahrprofils Dienstfahrer bewältigen mit 71 km die größte Tagesweite aller Fahrprofile. Dabei beträgt der Ladezustand nach der letzten Fahrt ohne zwischenzeitlichen Ladevorgang immer noch 55 % der gesamten Batteriekapazität. Die Ladeprofile der einzelnen BEV wurden unter Verwendung einer maximalen Anschlussleistung von 3,68 kW berechnet. Diese kann aus einer speziellen 230 V Steckdose, die für Dauerbelastungen in diesem Leistungsbereich ausgelegt ist, mit einer 16 A Sicherung entnommen werden. Damit steht einer individuellen Nutzung von Elektrofahrzeugen nichts im Wege, selbst wenn eine flächendeckende Ladeinfrastruktur nicht gegeben ist.

Addiert man das Gesamtladeprofil von einem Mix aus 100 BEV der vier Fahrprofile mit dem Haushaltslastprofil H0 Winter von 200 Haushalten, dann verstärkt sich die abendliche Leistungsspitze beim ungesteuerten Laden von 167 kW auf das ca. 1,7-fache. Die dabei benötigte Ladeenergie beträgt rund 418 kWh/Tag und entspricht etwa 18 % des Energiebedarfs von 200 Haushalten. Wird in Zukunft eine ähnlich hohe Anzahl von Elektrofahrzeugen in weiten Gebieten von Österreich in Gebrauch sein, dürfen notwendige Änderungen des Versorgungsnetzes auf der Niederspannungsebene und der Energiebereitstellung nicht außer Acht gelassen werden, um mögliche Überlastungen bzw. Engpässe zu vermeiden.

Wird – wie beim Fahrprofil Berufspendler – pro Tag nicht nur ein Ladeereignis ermöglicht, kann die benötigte Ladeleistung am Abend im Netz des Wohngebietes verringert werden. Eine weitere Verbesserung stellt jenes betrachtete Szenario dar, bei dem nach jeder Fahrt die Batterien geladen werden. Dann erhöht das letzte Laden des jeweiligen Tages zu Hause die Haushaltslastspitze nur mehr um ca. 32 kW. Dies zeigt deutlich, dass durch intensiven Ausbau der Ladeinfrastruktur auf öffentlichen Plätzen die

Ladevorgänge auf mehrere Zeiträume und Orte pro Tag aufgeteilt werden könnten und somit das Netz am Wohnort entlastet wäre.

Ein Laden an Orten, an denen nur kurzzeitig verweilt wird, kann dazu führen, dass nicht die gesamte Batteriekapazität erreicht wird. Ist allerdings eine Vollladung in kurzen Zeiträumen erwünscht, müssen höhere Anschlussleistungen verwendet werden. Ein Vorgang zum Laden einer Batterieenergiemenge von 5 kWh⁸ an einer geeigneten Kraftsteckdose mit einer Maximalleistung von 22 kW⁹ dauert beispielsweise rund 15 Minuten. Dafür müsste geprüft werden, ob die vorhandenen Netzgegebenheiten bzw. der speisende Netztrafo überhaupt für solch eine zusätzliche Last ausgelegt ist – vor allem, wenn mehrere BEV gleichzeitig am selben Ort laden.

Wie gezeigt wurde, verstärkt ungesteuertes Laden das Haushaltslastmaximum. Dies kann durch das verbraucherseitig gesteuerte Laden verhindert werden. Dabei wird die notwendige Ladeenergie von etwa 418 kWh/Tag in die Nachtsenken verschoben. Jene Art des gesteuerten Ladens, die zur geringsten Ladeleistungsspitze führt, hat für 100 BEV in den Nachtstunden eine konstante Gesamtleistung von 103 kW. Dieser Wert beträgt rund 62 % der Tageslastspitze von 200 Haushalten. Zur Realisierung müsste eine Kommunikation zwischen Ladegeräten und zentraler Steuereinheit aufgebaut werden, was zu enormen Aufwänden führen kann.

⁸ Mit dieser Energiemenge kann eine Strecke von etwa 28 km zurückgelegt werden.

⁹ Dieser Leistungswert ergibt sich aus einer dreiphasigen Spannung von 230 V mit einer Sicherung von 32 A.

7 Zusammenfassung

Welche zusätzlichen Netzbelastungen werden durch den Umstieg von Verbrennungskraftmotoren auf elektrische Antriebe verursacht? Um dieser Frage nachzugehen wurde unter Zuhilfenahme der Software MATLAB ein Modell entwickelt, mit dem stochastische Ladeprofile von Elektrofahrzeugen erstellt werden können. Das MATLAB-Modell ermöglicht weiters die Adaption einer Vielzahl von Parametern. Als Grundlage dafür dienen Verkehrsstudien des österreichischen motorisierten Individualverkehrs, aus denen sich die Modellparameter ergeben. Diese Parameter beschreiben das werktägliche Fahrverhalten und geben Auskunft darüber, welche Anzahl an Wegen pro Tag zurückgelegt, wie viele Kilometer pro Strecke und Tag gefahren werden, zu welchen Uhrzeiten die Fahrten beginnen und wann sie wieder enden. Im erarbeiteten Modell werden die Beginnzeiten der werktäglichen Wege mit Gaußschen Glockenkurven nachgebildet. Zusammen mit den weiteren Verkehrsdaten und zusätzlichen Fahrzeugparametern, wie Verbrauch, Batteriekapazität und passender Ladecharakteristik, werden die stochastischen Ladeprofile berechnet.

In einer ersten Betrachtung wird für 100 BEV aus einem Fahrprofilmix das zugehörige Gesamtladeprofil für ungesteuertes Laden erarbeitet. Dabei stellen die verwendeten Fahrprofile die vier häufigsten Wegzecke des österreichischen motorisierten Individualverkehrs dar. Für diese Betrachtung wird angenommen, dass die Ladevorgänge nur nach der letzten Fahrt und sofort nach dem Ankommen stattfinden. Ausgenommen ist das Fahrprofil Berufspendler, bei diesem wird ein zweites Mal pro Tag, und zwar am Arbeitsplatz oder in einer Park-and-Ride-Anlage, geladen. Das erhaltene Gesamtladeprofil weist in den Abendstunden eine ausgeprägte Leistungsspitze von etwa 100 kW auf und beinhaltet eine Ladeenergie von rund 400 kWh/Tag. Auf Grund der Normalverteilung der Beginnzeiten der Wege schwankt das Leistungsmaximum für jede neu durchgeführte Berechnung in einem Bereich von rund $\pm 30\%$.

Die Ergebnisse aus der Variation einiger Eingangsparameter stellen die Auswirkungen auf das Gesamtladeprofil dar. Bei Verdopplung der Gesamtstrecke oder der Anzahl der BEV verdoppelt sich erwartungsgemäß auch der Energiebedarf. Die Erhöhung der Leistungsspitze bleibt allerdings etwa 30 % unter dem Faktor zwei. Wird bei der

Variation der Ladeleistung der Wert der Anschlussleistung mehrfach erhöht, führt dies zu immer stärker fluktuierenden Gesamtladeprofilen.

Um weiters das Gesamtladeprofil mit Haushaltslastprofilen vergleichen zu können, wird festgelegt, dass die Lenker der 100 BEV im selben Wohngebiet leben und somit die Ladevorgänge nach der letzten Fahrt im gleichen Netz stattfinden. Für diesen Vergleich werden normierte Haushaltslastprofile herangezogen und für ein Szenario von 200 Haushalten ausgelegt. Bei der Summenbildung von Haushaltslastprofil und Gesamtladeprofil kommt es zur Überlappung der beiden Maxima und somit zu einer Erhöhung der abendlichen Haushaltslastspitze von rund zwei Drittel. Zusätzlich werden noch weitere Szenarien bezüglich des ungesteuerten Ladens gebildet. Die Analysen zeigen deutlich, dass ein mehrmaliges Laden pro Tag – ermöglicht durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur – die Anhebung der Abendlastspitze mindert.

Im Gegensatz zum ungesteuerten Laden werden beim gesteuerten Laden die Ladevorgänge bewusst in einen anderen Zeitbereich verschoben. Dabei unterscheidet man zwischen erzeugerseitig und verbraucherseitig gesteuertem Laden. Beim erzeugerseitig gesteuerten Laden werden Energieüberschüsse im öffentlichen Verteilnetz, beispielsweise aus Solar- oder Windkraftanlagen, durch Ladevorgänge abgebaut. Soll der Spitzenwert der Haushaltslastkurve nicht weiter erhöht werden, kommt das verbraucherseitig gesteuerte Laden zum Einsatz. Für das verbraucherseitig gesteuerte Laden werden hier einige Szenarien erarbeitet. Diese zeigen, dass ein gleichverteiltes Laden während der Nachtstunden eine Erhöhung der abendlichen Haushaltslastspitze verhindern kann. Dabei wird allerdings der Lastverlauf in den Nachtstunden deutlich angehoben und hat je nach Szenario die Höhe von der abendlichen oder der mittäglichen Haushaltslastspitze. Die Realisierung der dafür notwendigen Steuerung könnte durch eine ähnliche Form der so genannten Rundsteuertechnik bewerkstelligt werden. Diese wird beispielsweise zur Fernsteuerung von Nachtspeicherheizungen verwendet. Bei einer weiteren Form des verbraucherseitig gesteuerten Ladens wird die benötigte Ladeenergie der betrachteten 100 BEV optimiert in die Lastsenken verschoben. Das bedeutet, dass dort eine konstante Gesamtleistung aus Ladevorgängen und Haushalten entsteht. Die Haushaltslast in der Nachtsenke wird dadurch zwar etwa verdreifacht, dieser Wert liegt jedoch immer noch rund 40 % unter der Abendlastspitze der 200 Haushalte. Der große Nachteil dieser Steuerung ist allerdings der hohe Realisierungsaufwand.

Literaturverzeichnis

- [1] STATISTIK AUSTRIA. *Bestand an Kraftfahrzeugen 2008*, 10. Juni 2009. http://www.statistik.at/web_de/static/kfz-bestand_2008_035580.pdf.
- [2] HERRY, M., SEDLACEK, N., STEINACHER, I. *Verkehr in Zahlen – Österreich, Ausgabe 2007*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, November 2007.
- [3] VERKEHRSClub ÖSTERREICH. *10 Prozent Elektro-Autos verringern CO₂-Emissionen Österreichs um 810.000 Tonnen*. 24. Juni 2009. <http://www.vcoe.at/start.asp?b=1&ID=4404>
- [4] STATISTIK AUSTRIA. *Bilanz der Elektrischen Energie*, 22. Juni 2009. http://www.statistik.at/web_de/static/bilanz_der_elektrischen_energie_022711.pdf
- [5] HERRY, M., RUSS, M., SCHUSTER, M. TOMSCHY, R. *Mobilität in NÖ – Ergebnisse der landesweiten Mobilitätsbefragung 2003*. Amt der NÖ Landesregierung, Abteilung für Gesamtverkehrsangelegenheiten, Wien, 2003.
- [6] HERRY, M., SAMMER, G. *Allgemeine Mobilitätsbefragung der österreichischen Haushalte - Bundesverkehrswegeplan, Arbeitspaket A3-H/2, Bereich: Gewichtung und Hochrechnung samt Zusatzerhebungen*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 1996
- [7] SCHUSTER, A. *Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen*. Diplomarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Wien, September 2008.
- [8] WIKIPEDIA. *Normalverteilung*. 04. Juni 2009. <http://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>.
- [9] KLOESS, M. *Die Wirtschaftlichkeit teil- und voll elektrifizierter Antriebe in Österreich bis 2030*. In: IEW-Tagung „Energie Wirtschaft und technologischer Fortschritt in Zeiten hoher Energiepreise“, TU Wien, 11.-13. Februar 2009.

- [10] LINSSEN, J., BIRNBAUM, U., MARKEWITSCH P., MARTINSEN, D., VÖGELE, S. *Potenzialabschätzung zum Einsatz von Elektrofahrzeugen in Deutschland*. In: IEW-Tagung „Energie Wirtschaft und technologischer Fortschritt in Zeiten hoher Energiepreise“, TU Wien, 11.-13. Februar 2009.
- [11] THE MATHWORKS. *Support*. 03. April 2009. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/instrument/index.html>.
- [12] DIRSCHMID, H. J. *Skriptum aus Mathematik 2 für Elektrotechnik*. Skriptum, Fakultät für Mathematik und Geoinformation, TU Wien, 2001.
- [13] STATISTIK AUSTRIA. *Privathaushalte 1998 - 2008*, 22. Juni 2009. http://www.statistik.at/web_de/static/ergebnisse_im_ueberblick_privathaushalte_023298.pdf
- [14] BRAUNER, G. *Infrastruktur der Elektromobilität*, e&i Heft 11.2008, Seiten 382-386. Springer Verlag, Wien, November 2008.
- [15] STATISTIK AUSTRIA. *Energiestatistik: Strom- und Gasverbrauch 2008*, 08. Juni 2009. http://www.statistik.at/web_de/static/jahresstromverbrauch_2008_035456.pdf.
- [16] LEITINGER, C. *Leistungsbedarf und Ladestrategien elektrischer Mobilität für zukünftige Energiesysteme*. In: Smart Grids Fachtagung „Dezentrale Erzeugung und Intelligente Stromnetze - eine Roadmap für Österreich“, Salzburg, 13.-15. Mai 2009.
- [17] FRITZ, J. *Rundsteuertechnik*. 16. Juni 2009. <http://www.rundsteuerung.de>.

Abkürzungsverzeichnis

BEV	<u>B</u> attery- <u>P</u> owered <u>E</u> lectric <u>V</u> ehicle
BMVIT	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>V</u> erkehr, <u>I</u> nnovation und <u>T</u> echnologie
C-Rate	<u>C</u> apacity <u>R</u> ate
CSV	<u>C</u> omma <u>S</u> eparated <u>V</u> olume
EE	<u>E</u> nergetischer <u>E</u> ndverbrauch
EVU	<u>E</u> nergie <u>v</u> ersorgungs <u>u</u> nternehmen
ICE	<u>I</u> nternal <u>C</u> ombustion <u>E</u> ngine
LE	<u>L</u> eistungselektronik
LiM-Polymer	<u>L</u> ithium- <u>M</u> etal-Polymer
MH	<u>M</u> etal <u>H</u> ydrid
MIV	<u>M</u> otorisierter <u>I</u> ndividual <u>v</u> erkehr
ÖV	<u>Ö</u> ffentliche <u>V</u> erkehrsmittel
QMW	<u>Q</u> uadratischer <u>M</u> ittel <u>w</u> ert
SCHUKO	<u>S</u> chutz <u>k</u> ontakt
SOC	<u>S</u> tate <u>O</u> f <u>C</u> harge
VDEW	<u>V</u> ereinigung <u>d</u> eutscher <u>E</u> lektrizität <u>s</u> werke
VKM	<u>V</u> erbrennung <u>s</u> kraft <u>m</u> otor
ZEBRA	<u>Z</u> ero <u>E</u> mission <u>B</u> attery <u>R</u> esearch <u>A</u> ctivity

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Aufteilung des Modal-Splits in Niederösterreich 2003 [2]	5
Abbildung 2.2:	Werktägliches zeitliches Verhalten der Beginnzeiten der Wege pro Tag nach Wegzweck in Niederösterreich 2003	6
Abbildung 2.3:	Durchschnittliche Längen der werktäglichen Wege des österreichischen MIV nach Wegzweck 1995	6
Abbildung 2.4:	Durchschnittliche werktägliche Wegdauer in Minuten nach Wegzweck und Geschlecht Österreich 1995 [2]	7
Abbildung 2.5:	Vergleich Parallel-Hybrid, serieller Plug-In-Hybrid und reines Elektrofahrzeug (in Anlehnung an [9])	8
Abbildung 2.6:	Vergleich verschiedener Batteriesysteme [10]	9
Abbildung 2.7:	Ladeleistungsverhalten in Abhängigkeit des Ladestandes SOC von Li-Ionen-Batterien (in Anlehnung an [7])	11
Abbildung 3.1:	Modellüberblick	12
Abbildung 3.2:	Auflistung aller für das Modell verwendeten Eingangsparameter und Ausgangsgrößen	13
Abbildung 3.3:	Flussdiagramm für das Unterprogramm „Berechnung – ungesteuertes Laden“	16
Abbildung 3.4:	Hauptmenü und Unterprogramme des MATLAB-Programms	17
Abbildung 3.5:	Anteil der werktäglichen Wege nach Wegzweck und Modal-Split Österreich 1995 [2]	18
Abbildung 3.6:	Verkehrsaufkommen der NÖ Wohnbevölkerung nach Wegzweck 2003; Werktag (links) und Sonntag (rechts) im Vergleich [2]	19
Abbildung 3.7:	Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Berufspendler	24
Abbildung 3.8:	Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Dienstfahrer	25
Abbildung 3.9:	Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe	26
Abbildung 3.10:	Nachbildung des werktäglichen zeitlichen Verlaufes für das Fahrprofil Freizeit	27
Abbildung 3.11:	Verteilung der Ladestartzeitpunkte für unterschiedliche Anzahlen von BEV des Fahrprofils Berufspendler und Verlauf der um die durchschnittliche Wegdauer verschobenen Summe der Normalverteilungen	28

Abbildung 3.12: Veränderung der Ladestartzeitpunkte auf Grund der stochastischen Verteilung der Beginnzeiten der werktäglichen Wege; hier beispielhaft für drei gleiche Berechnungen dargestellt.....	29
Abbildung 3.13: Streckenprofil von Berufspendlern mit den dazugehörigen Normalverteilungen.....	31
Abbildung 3.14: Streckenprofil von Dienstfahrern mit den dazugehörigen Normalverteilungen.....	31
Abbildung 3.15: Streckenprofil von privaten Erledigungen/Einkäufen mit den dazugehörigen Normalverteilungen	32
Abbildung 3.16: Streckenprofil vom Fahrprofil Freizeit mit den dazugehörigen Normalverteilungen.....	32
Abbildung 3.17: Mögliche Ladestartzeitpunkte und Ladefenster eines BEV	33
Abbildung 3.18: Der Ladezustandsverlauf SOC eines Berufspendlers.....	34
Abbildung 3.19: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines Berufspendlers	34
Abbildung 3.20: Der Ladezustandsverlauf SOC eines Dienstfahrers	35
Abbildung 3.21: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines Dienstfahrers.....	35
Abbildung 3.22: Der Ladezustandsverlauf SOC eines BEV des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe.....	36
Abbildung 3.23: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines BEV vom Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe.....	36
Abbildung 3.24: Der Ladezustandsverlauf SOC eines BEV des Fahrprofils Freizeit.....	37
Abbildung 3.25: Die über einen ganzen Tag aufgenommene Ladeleistung des Ladegeräts eines BEV vom Fahrprofil Freizeit.....	37
Abbildung 3.26: Verteilung der Ladestartzeitpunkte von Berufspendlern.....	39
Abbildung 3.27: Verteilung der Ladestartzeitpunkte von Dienstfahrern	39
Abbildung 3.28: Verteilung der Ladestartzeitpunkte vom Fahrprofil private Erledigungen/Einkäufe.....	40
Abbildung 3.29: Verteilung der Ladestartzeitpunkte vom Fahrprofil Freizeit.....	40
Abbildung 3.30: Ladeprofil des Fahrprofils Berufspendler mit 37 BEV	42
Abbildung 3.31: Ladeprofil des Fahrprofils Dienstfahrer mit 16 BEV.....	42
Abbildung 3.32: Ladeprofil des Fahrprofils private Erledigungen/Einkäufe mit 30 BEV	43
Abbildung 3.33: Ladeprofil des Fahrprofils Freizeit mit 17 BEV.....	43

Abbildung 4.1:	Ladeprofile der vier Fahrprofile und das Gesamtladeprofil von 100 BEV im Fahrprofilmix	46
Abbildung 4.2:	Die Bandbreite von 250 berechneten Gesamtladeprofilen bestehend aus je 100 BEV	47
Abbildung 4.3:	Vergleich werktägliches Haushaltslastprofil H0 Winter und H0 Sommer für je 200 Haushalte	48
Abbildung 4.4:	Gesamtladeprofil von 100 BEV aus Abbildung 4.1 und Haushaltslastprofil H0 Winter von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider	49
Abbildung 4.5:	Variation der Anzahl der BEV von 100 BEV auf 200 BEV in drei gleich weiten Schritten	51
Abbildung 4.6:	Variation der Weglängen von 100% (Standardwerte) auf 200% (doppelte Wege) in drei gleich weiten Schritten	52
Abbildung 4.7:	Variation der Standardabweichung von 100% (Standardwerte) auf 0% in drei gleich weiten Schritten	54
Abbildung 4.8:	Variation der Ladeleistung von 3,7 kW auf 11 kW in drei gleich weiten Schritten	55
Abbildung 4.9:	Leistungsbedarf bei unterschiedlichen Ladezeiten und Energiemengen [16]	56
Abbildung 5.1:	Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Geladen wird nur nach der letzten Fahrt im betrachteten Netz (Siedlung)	59
Abbildung 5.2:	Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Geladen wird nach jeder Fahrt, aber nur nach der letzten im betrachteten Netz (Siedlung)	60
Abbildung 5.3:	Das Gesamtladeprofil für ein ungesteuertes Laden von 100 BEV und das Haushaltslastprofil von 200 Haushalten. Geladen wird nach jeder Fahrt immer im betrachteten Netz (gesamtes Versorgungsnetz)	61
Abbildung 5.4:	Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden ab Punkt 22 Uhr von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider	63
Abbildung 5.5:	Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden mit Ladestartfenster von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Das Ladestartfenster beträgt vier Stunden und reicht von 22:00 Uhr bis 02:00 Uhr	64

Abbildung 5.6: Gesamtladeprofil für ein gesteuertes Laden mit Ladestartfenster von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider. Das Ladestartfenster beträgt sechs Stunden und reicht von 21:00 Uhr bis 03:00 Uhr.....	64
Abbildung 5.7: Gesamtladeprofil des gesteuerten Ladens mit Optimierung auf die Nachtsenke von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider	66
Abbildung 5.8: Gesamtladeprofil des gesteuerten Ladens mit Optimierung auf Nacht- und Nachmittagssenke von 100 BEV und Haushaltslastprofil von 200 Haushalten, sowie das Summenprofil beider	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Konstantladeleistung, Ladeumschaltzeitpunkt, Ladeschlussspannung, Nennspannung und Ladeabschlussstrom der verwendeten Ladecharakteristik der Li-Ionen-Batterien	10
Tabelle 3.1:	Auflistung der gewählten Werte aller relevanten Parameter für die vier betrachteten Fahrprofile	21
Tabelle 3.2:	Erwartungswerte und Standardabweichungen der verwendeten Normalverteilungen aller vier Fahrprofile.....	29
Tabelle 4.1:	Auflistung der verschiedenen Parametervariationen und deren Eigenschaften	49
Tabelle 4.2:	Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Anzahl der BEV. Die angeführten Werte stellen die Anzahl der BEV des gesamten Fahrprofilmixes dar	51
Tabelle 4.3:	Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Weglänge. Die angeführten Werte beziehen sich auf die Gesamtstrecken pro Tag	53
Tabelle 4.4:	Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Standardabweichung σ . Die angeführten Standardabweichungen gehören zur Normalverteilung der letzten Tagesfahrt.....	54
Tabelle 4.5:	Absolut- und Relativwerte der Variationen des Parameters Ladeleistung. Die angeführten Leistungswerte stellen die Maximalleistung dar	56