

Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik

Herausgegeben von U. Bankhofer, V. Nissen
D. Stelzer und S. Straßburger

Stefan Gold, Maik Günther, Volker Nissen

**Netzverträgliche Integration von E-Fahrzeugen in
die bestehenden elektrischen Verteilnetze durch
intelligente Ladesteuerung**

Arbeitsbericht Nr. 2013-02, April 2013



Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Institut für Wirtschaftsinformatik

Autor: Stefan Gold, Maik Günther, Volker Nissen

Titel: Netzverträgliche Integration von E-Fahrzeugen in die bestehenden elektrischen Verteilnetze durch intelligente Ladesteuerung

Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik Nr. 2013-02, Technische Universität Ilmenau, April 2013

ISSN 1861-9223

ISBN 978-3-938940-44-0

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013200040

© 2013 Institut für Wirtschaftsinformatik, TU Ilmenau

Anschrift: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften,
Institut für Wirtschaftsinformatik, PF 100565, D-98684 Ilmenau.
<http://www.tu-ilmenau.de/wid/forschung/ilmenauer-beitraege-zur-wirtschaftsinformatik/>

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielstellung	2
1.3	Methodik	2
2	Thematisch verwandte Arbeiten	5
3	Umsetzung der Arbeitspakete	6
3.1	Erstellung Simulationsmodell	6
3.1.1	Modellierung der Umwelt	7
3.1.2	Modellierung der Fahrzeuge	8
3.2	Durchführung der Lastsimulation	10
3.3	Entwicklung eines Ladesteuerungsalgorithmus	11
3.4	Evaluation	13
4	Zusammenfassung und Ausblick	17
	Literaturverzeichnis	19

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit beschreibt den Stand des eConnect-Forschungsprojekts von Seiten des Fachgebiets „Wirtschaftsinformatik für Dienstleistungen“ der TU-Ilmenau. Es werden die geplanten Arbeitspakete vorgestellt und dargestellt, wie diese umgesetzt worden sind. Inhaltlich wird die Entwicklung eines Multi-Agentensystems zur Simulation einer lokal begrenzten Ladeinfrastruktur näher beschrieben. Darauf aufbauen sind Scheduling-Verfahren zur Steuerung der elektrischen Leistungsnachfrage entwickelt und an Hand des Simulationsmodells auf deren Leistungsfähigkeit hin untersucht worden.

Schlüsselworte: Elektromobilität, Nachfragesteuerung, Multi-Agenten-Simulation, Optimierungsverfahren, Scheduling

1 Einleitung

Im Rahmen des „eConnect Germany“-Projekts¹ entwickelt das Fachgebiet „Wirtschaftsinformatik für Dienstleistungen“ (WI2) der TU-Ilmenau gemeinsam mit den Partnern der RWTH Aachen, den Stadtwerken München (SWM), den Stadtwerke Aachen AG (STAWAG) sowie der *smartlab* Innovationsgesellschaft Konzepte für eine netzverträgliche Integration von Elektrofahrzeugen (eKFZ) in das bestehende elektrische Verteilnetz mit Hilfe einer intelligenten Ladesteuerung.

1.1 Problemstellung

Da das bestehende elektrische Verteilnetz nicht für die zu erwartende hohe Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge ausgelegt worden ist, stellt der Aufbau einer umfassenden Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Fahrzeuge² eine erhebliche Belastung für dieses dar. Der Fokus des vom FG WI2 bearbeiteten Teilprojekts liegt hierbei bei einer so genannten lokalen Ladeinfrastruktur, bei der mehrere zusammengehörende Ladepunkte bis zum elektrischen Anschlusspunkt betrachtet werden.

Der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit kann durch die Metapher des „Parkhauszenarios“ verdeutlicht werden: Ein Parkhausbetreiber möchte seinen Kunden Ladepunkte zum Aufladen von eKFZ anbieten. Um eine möglichst hohe Servicequalität zu gewährleisten, möchte der Betreiber möglichst viele Ladepunkte bereitstellen und gleichzeitig schnelle Ladevorgänge ermöglichen. Andererseits ist das Verteilnetz nicht für diese hohe elektrische Stromnachfrage ausgelegt worden. Der elektrische Hausanschluss³ des Parkhauses limitiert die maximale, aggregierte Ladeleistung. Bereits wenige *ungesteuerte*, parallele Ladevorgänge übersteigen die durch den Hausanschluss abgebbare elektrische Leistung. Daher ist es bereits bei einer relativ geringen Anzahl installierter Ladepunkte notwendig,

¹ Das „eConnect Germany“-Projekt wird vom Bundeswirtschaftsministerium im Programm „IKT für Elektromobilität II“ gefördert.

² In dieser Arbeit werden ausschließlich elektrische betriebene Fahrzeuge betrachtet. Die Begriffe „Elektrofahrzeug“, „eKFZ“, „KFZ“ sowie einfach nur „Fahrzeug“ werden synonym verwendet.

³ Ein regulärer dreiphasiger Hausanschluss ist mit 63 bis 100 Ampere abgesichert (WINFRID HAUKE u. a., 1998). Bei einer Spannung von 400V ergibt sich eine max. elektrische Leistung von 43,5 kW bis 69,3 kW.

alle Ladevorgänge ganzheitlich zu steuern, um zu vermeiden, dass die max. Anschlussleistung überschritten wird.⁴

1.2 Zielstellung

Das Ziel des Teilprojekts, unter Federführung des FG WI2, ist die Konzeption eines Ladesteuerungsalgorithmus, welcher die zur Verfügung stehende elektrische Leistung in der Art auf die an die Ladeinfrastruktur angeschlossenen eKFZ verteilt. Dabei sollen einerseits die Kundenerwartungen einer problemlosen Weiterfahrt⁵ erfüllt und andererseits das zu Grunde liegende elektrische Verteilnetz⁶ nicht überlastet werden. Das zu entwickelnde Verfahren soll daher das bestehende Verteilnetz möglichst effizient nutzen und somit zu einer hohen Kundenzufriedenheit führen.

Abstrahiert formuliert, soll ein Demand Side Management-Verfahren⁷ (DMS) entwickelt werden, welches die Nachfrage der elektrischen Verbraucher derart steuert, so dass der nächst gelegene Verteilknoten des elektrischen Verteilnetz nicht überlastet wird. Das vorgelagerte elektrische Verteilnetz ab diesem Knotenpunkt wird hierbei nicht weiter betrachtet.

1.3 Methodik

Im Zuge der Einführung der Elektromobilität sind Investitionen in das Verteilnetz absolut notwendig und wünschenswert. Dennoch sollten die notwendigen Investitionen so gering wie möglich gehalten werden, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer hohen Kundenzufriedenheit, welche für den Erfolg der Elektromobilität unabdingbar ist.

Diese Arbeit soll dazu beitragen, durch eine intelligente Ladesteuerung das bestehende Verteilnetz möglichst effizient zu nutzen und darauf aufbauend eine Ladeinfrastruktur zu konzipieren, welche in der Lage ist, den Kunden eine definierte Dienstleistungsqualität zu garantieren, ohne die Netzstabilität zu gefährden.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollen zunächst relevante Einflussfaktoren, welche sich maßgeblich auf die Stabilität des Verteilnetzes auswirken, identifiziert werden. Denkbare Pa-

⁴ Aktuelle eKFZ können mit einer Stromstärke von bis zu 32A (22kW) geladen werden. Falls keine weiteren elektrischen Verbraucher im Parkhaus (z.B. Lüftung, Beleuchtung) zu berücksichtigen sind, können daher, je nach Anschlussleistung, max. drei ungesteuerte Ladevorgänge durchgeführt werden.

⁵ z.B. durch eine möglichst schnellen Ladung

⁶ Im Rahmen dieser Arbeit gilt insbesondere der Hausanschluss als limitierender Faktor.

⁷ Demand Side Management (DMS) bezeichnet die zielgerichtete Steuerung der Stromnachfrage (GELLINGS & CHAMBERLIN, 1987).

parameter, welche sich auf die durch E-Fahrzeuge geforderte elektrische Leistung auswirken dürften, sind zum Beispiel:

- der aktuelle Ladezustand der angeschlossenen Fahrzeug,
- Kundenpräferenzen wie der Wunsch nach einer möglichst schnellen Weiterfahrt,
- bevorzugtes Laden für Premiumkunden,
- unterschiedliche Nutzungsintensitäten, je nach Wochentag, Uhrzeit, Außentemperatur usw.,
- verschiedene maximale Leistungsaufnahme je Fahrzeugtyp,
- Ankunftsrate bzw. Wechselfrequenz von Fahrzeugen.

In Summe ergeben sich viele verschiedene Faktoren, welche den Ladevorgang, und damit die Belastung für das Verteilnetz, beeinflussen. Zunächst sollen durch Simulation (z.B. durch Verfahren der Schwarmintelligenz) einer virtuellen Ladeinfrastruktur diejenigen Parameter identifiziert werden, welche in besonderem Maße Einfluss auf die Ladesteuerung ausüben.

Mit Kenntnis dieser Einflussfaktoren soll eine selbstadaptive Ladesteuerung entwickelt werden, welche auf Grundlage moderner Optimierungsverfahren (z.B. Naturanaloge Metaheuristiken oder Multiagentensysteme) sowohl die Kundenbedürfnisse als auch die Interessen des Betreibers der Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Dabei ist das zu Grunde liegende Verteilnetz möglichst effizient zu nutzen, ohne dieses zu überlasten. Die folgenden Arbeitsschritte sind dabei zur Erreichung der Zielstellung vorgesehen:

Erstellung des Simulationsmodells

In diesem Schritt soll ein multi-agentenbasiertes Simulationsmodell (MACAL & NORTH, 2010) erstellt werden. Die Umsetzung erfolgt mit dem Werkzeug „Repast Symphony“ (M.J. NORTH u. a., 2007). Mit dem Simulationsmodell sollen vorrangig die dynamischen, gegenseitigen Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen der Ladeinfrastruktur und den Elektrofahrzeugen abgebildet werden. Zudem sollen sich praxisrelevante Aussagen bezüglich des Verhaltens des Gesamtsystems bei bestimmten Nutzungsszenarien ableiten lassen.

Durchführung von Lastsimulationen

Dieser Arbeitsschritt umfasst die Simulation verschiedener angenommener Nutzungsszenarien anhand des zuvor erstellten Modells. Hierbei steht die aggregierte Leistungsnach-

frage aller zu ladender Elektrofahrzeuge im Mittelpunkt der Betrachtung. Darüber hinaus soll untersucht werden, welche externen Einflussparameter (z.B. Akkukapazität, Ankunftsrate der Fahrzeuge, Ladezustand usw.) sich besonders auf die Leistungsnachfrage auswirken. Das angestrebte Ziel dieser Untersuchungen ist die Identifizierung der Menge an Ladesteuerungsparametern, welche sich effektiv durch eine Ladesteuerung beeinflussen lassen.

Entwicklung eines Zielsystems

Für die Entwicklung einer effektiven Ladesteuerung ist es zunächst essentiell zu klären, welche Ziele durch diese verfolgt werden sollen. Grundsätzlich darf die maximale elektrische Ladeleistung nie überschritten werden, was eine harte Restriktion an die Ladesteuerung darstellt. Diese Anforderung allein genommen, lässt sich konzeptionell jedoch bereits durch eine triviale Ladesteuerung einhalten. Komplexere Anforderungen ergeben sich dadurch, dass darüber hinaus einerseits unterschiedlichste Kundenwünsche bestmöglich befriedigt werden sollen und andererseits die Anforderungen der Betreiber ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Die Steuerung der Ladeinfrastruktur lässt sich auf die Frage herunterbrechen, wann welches Fahrzeug welchen Anteil der zur Verfügung stehenden Ladeleistung zugeteilt bekommt. Wie jedoch eine sinnvolle Verteilung des zur Verfügung stehenden elektrischen Leistungsangebots aussieht, kann objektiv nicht beantwortet werden, da mehrere Zieldimensionen, wie z.B. kurze Wartezeiten bis Ladebeginn, schnelles vollständiges Aufladen, geringe Strompreise, hohe Auslastung der Ladeinfrastruktur, existieren. Diese Zieldimensionen stehen sich teilweise konkurrierend gegenüber. Daher kann die Verfolgung eines Einzelziels zu einer Beeinträchtigung eines anderen Ziels führen. Aus diesem Grund stellt die Gestaltung des Zielsystems eine politische Entscheidung dar, da die Interessen der betroffenen Parteien abzuwägen sind. Auf Basis des Zielsystems ist es die Aufgabe des zu entwickelnden Ladesteuerungsalgorithmus, für eine konkrete Situation, das heißt eine Menge an Elektrofahrzeugen mit einem bestimmten Ladebedarf und, dem gegenübergestellt zur Deckung der Nachfrage, ein begrenztes elektrisches Leistungsangebot, geeignete Kompromisslösungen zu identifizieren.

Entwicklung eines Ladesteuerungsalgorithmus

Es sollen zwei verschiedene Ansätze zur Umsetzung der eigentlichen Ladesteuerung implementiert werden: Eine Alternative ist der Einsatz von Metaheuristiken, wie zum Bei-

spiel Evolutionäre Algorithmen oder Partikelschwarmoptimierung, um nach einer guten Kombination bzw. Einstellung der zuvor identifizierten Ladesteuerungsparameter, entsprechend der vorherrschenden Situation zu suchen. Die zweite Variante besteht in einem agentenbasierten Ansatz, wobei mittels marktorientierter Koordinationsmechanismen, z.B. multilaterale Auktionen, über die Aufteilung des zur Verfügung stehenden elektrischen Leistungsangebot unter den Nachfragern verhandelt wird. Die zu ladenden Fahrzeuge werden hierbei als Agenten repräsentiert, welche jeweils einen spezifischen Bedarf an elektrischer Leistungsaufnahme haben. Je höher der individuelle Bedarf ausfällt, umso eher wird man eine höhere „Zahlungsbereitschaft“ für das knappe Gut „elektrisches Leistungsangebot“ unterstellen können. Im Rahmen der auktionemäßig durchgeführten Koordination verhandeln die Agenten über ihren Anteil des zu konsumierenden elektrischen Leistungsangebots und darüber, welchen „Preis“ sie bereit sind, dafür zu zahlen.

Evaluation des Ladesteuerungsalgorithmus

Der entwickelte Ladesteuerungsalgorithmus soll im Rahmen dieses Arbeitsschrittes auf dessen Leistungsfähigkeit hin überprüft werden. Diese Evaluation soll zunächst anhand des zuvor entwickelten Simulationsmodells durchgeführt werden. Die zentralen Fragestellungen sind, in wie weit das entwickelte Verfahren in der Lage ist, eine elektrische Überlastung der Ladeinfrastruktur zu vermeiden und gleichzeitig das zur Verfügung stehende elektrische Leistungsangebot sinnvoll auf die angeschlossenen Fahrzeuge zu verteilen. Die generierten Lösungen sollen anhand des Zielsystems gemeinsam mit den Praxispartnern bewertet werden.

2 Thematisch verwandte Arbeiten

In (BÜDENBENDER u. a., 2010) werden drei verschiedenen Ladestrategien für Elektrofahrzeuge vorgestellt und mittels Simulation eines beispielhaften Verteilnetzabschnittes miteinander verglichen. Die Autoren betrachten im Gegensatz zu dieser Arbeit jedoch einen Teilbereich des Niederspannungsnetzes mit der Belastung des nächst gelegenen Verteilnetztransformators.

Ein Ansatz zur Modellierung und anschließender Optimierung der prognostizierten elektrischen Leistungsnachfrage, welche durch Elektrofahrzeuge hervorgerufen wird, wird in (WESTERMANN u. a., 2010) vorgeschlagen.

In (HUTSON u. a., 2008) werden mittels *Particle Swarm Optimization* (PSO) die monetären Gewinne von Fahrzeugbesitzern bei variablen Strompreisen optimiert, wobei Restriktionen der Netzbetreiber und der Fahrzeugbesitzer zu berücksichtigen sind. In dieser Arbeit werden explizit gezielte Entladevorgänge berücksichtigt.

Die Dissertation (LINK, 2012) beschäftigt sich umfassend mit den Möglichkeiten zur Beeinflussung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen. So wird insbesondere der Ansatz der dezentralen tarifynreizgesteuerten Ladeentscheidung zur zeitlichen Verteilung der Stromnachfrage untersucht. Der Autor entwickelte ein gemischt/ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur lokalen Laststeuerung.

3 Umsetzung der Arbeitspakete

3.1 Erstellung des Simulationsmodells

Alle im Abschnitt 1.3 beschriebenen Arbeitsschritte basieren auf dem Vorhandensein eines lauffähigen Simulationsmodells. Daher wurde in einem ersten Schritt ein Modell einer abstrakten Ladeinfrastruktur mittels eines multi-agentenbasierten Simulationswerkzeug umgesetzt.

Die Implementierung fand mit dem verbreiteten, quelloffenen Tool „Repast Symphony“⁸ statt. Dabei stellt Repast Symphony eine Plattform zur Entwicklung, Ausführung und Auswertung zeitdiskreter Multi-Agentensimulation dar. Die eigentlichen Agenten müssen hierbei von Grund auf selbst entwickelt werden. Die gängige Methode zur Implementierung der Agenten ist die Programmierung in Java bzw. C++. Repast Symphony stellt jedoch auch graphische Unterstützung bei der Entwicklung bereit. Auf Grund der Komplexität des Modells „Ladeinfrastruktur“ konnte dieser graphische Entwicklungsansatz jedoch nicht sinnvoll eingesetzt werden.

Im Rahmen der Erstellung des Simulationsmodells wurde grob zwischen der Umwelt sowie den Fahrzeug- und Ladepunktagenten unterschieden, welche objektorientiert als einfache Stimulus-Response Agenten (GÖRZ, 2003) implementiert worden sind. Die Verbindung zwischen einem Fahrzeug und einem Ladepunkt wird im Folgenden als *Ladevorgang* bezeichnet. Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Agentenklassen.

⁸ <http://repast.sourceforge.net>

Die repräsentierten physikalischen Einheiten sind in eckigen Klammern angegeben worden.

Fahrzeug	Ladepunkt	Umwelt
Kapazität [kWh]	Max. Ladeleistung [kW]	Anzahl und Art der eintreffenden Fahrzeuge [eKFZ/min]
Ladezustand [%]	Physisch belegt [boolean]	Anschlussleistung [kW]
Max. Ladeleistung [kW]	Aktiver Ladevorgang [boolean]	
Parkdauer [min]		
Zurückgelegte Strecke [km]		
Verbrauch [kWh/100km]		

Tabelle 1: Eigenschaften der Agentenklassen

Zu Zeitangaben, wie z.B. der oben aufgeführten Parkdauer, sei angemerkt, dass bei Repast Symphony der Simulationsverlauf in diskreten Zeitschritten, so genannten *Ticks* verläuft. Für die Simulation wurde eine Minute als ein Tick festgelegt. 60 Ticks entsprechen einer Stunde und 1440 Ticks sind 24 simulierte Stunden. Die Zeitangaben Tick und Minute werden im Folgenden in Bezug auf die Simulation äquivalent verwendet.

Die elektrische Leistung *Kilowatt* (kW) ergibt sich an Hand der physikalischen Größen Stromstärke (A), Spannung (V) sowie der Anzahl der Phasen (ph). Der mathematische Zusammenhang wird durch die Gleichung $kW = V * A * \sqrt{ph} / 1000$ wiedergegeben. Bei einem dreiphasigen Hausanschluss mit einer Nennspannung von 400V, welcher mit 100A abgesichert ist, lässt sich eine max. elektrische Leistung von $400V * 100A * \sqrt{3} = 69.282W$ abrufen.

3.1.1 Modellierung der Umwelt

Die *Umwelt* gibt die unveränderlichen Rahmenbedingungen der Simulation vor. So definiert sie die Anschlussleistung (siehe Tabelle 1), im Bild des Parkhausszenarios die Auslegung des elektrischen Hausanschlusses. Durch diese Vorgabe ergibt sich unmittelbar die

maximal mögliche aggregierte Ladeleistung, daher die über diesen Anschlusspunkt abrufbare elektrische Leistung nach Abzug der Nebenverbraucher wie z.B. Beleuchtung, Lüftung etc.

Über die Umwelt wird weiterhin festgelegt, *wann* und *wie viele* Fahrzeuge bei der Ladeinfrastruktur eintreffen. Darüber hinaus bestimmt die Umwelt, welche Art von Fahrzeugen eintrifft, welchen Ladezustand diese ausweisen sowie welche Entfernungen diese bis zum Parkhaus zurückgelegt haben bzw. nach Weiterfahrt beabsichtigen zurückzulegen. Die getroffenen Annahmen bezüglich Art und Anzahl der eintreffenden Fahrzeuge sowie die verfolgten Wegezwecke und die damit verbundenen zurückzulegenden Entfernungen orientieren sich an der Verkehrsstudie „Mobilität in Deutschland 2008“ (ROBERT FOLLMER u. a., 2010).

3.1.2 Modellierung der Fahrzeuge

Um verschiedene Nutzungsszenarien darstellen zu können, werden die eintreffenden Fahrzeuge anhand von drei Kriterien grob klassifiziert: Parkdauer, Wegezweck und Fahrzeugklasse.

Parkdauer der Fahrzeuge

Im dem erstellten Simulationsmodell wird nach dem Schema aus (ROBERT FOLLMER u. a., 2010, S. 121ff) zwischen Fahrzeugklassen *Langzeit-*, *Normal-* und *Kurzzeitparkern* unterschieden. Tabelle 2 führt dabei die getroffenen Annahmen der jeweiligen Klassen auf.

Langzeitparker	Normalparker	Kurzzeitparker
Ca. 10 Stunden	Ca. 2 Stunden	Ca. 30 Minuten

Tabelle 2: Annahmen bzgl. der Parkdauer

Die exakte Parkdauer eines konkreten Fahrzeugs ergibt sich aus der Zuordnung zu einer der drei o.g. Klassen und somit aus der anschließenden Realisierung einer normalverteilten Zufallsvariable mit dem Mittelwert der ungefähren Parkdauer der jeweils zugeordneten Klasse.

Wegezweck der Fahrt

Nach (ROBERT FOLLMER u. a., 2010, S. 166ff) stellt der *Wegezweck* (z.B. Arbeit, Einkauf, Freizeit) ein wesentliches Merkmal einer Fahrt dar. Aus dem *Wegezweck* resultiert die bei Ankunft im Parkhaus zurückgelegte Strecke sowie die bei der Weiterfahrt geplante Strecke, unter der Annahme das Hin- und Rückweg ähnliche Entfernungen aufweisen. Somit wirkt sich der *Wegezweck* einerseits auf den Ladezustand des Fahrzeugs bei der Ankunft aus, andererseits bestimmt dieser den Ladebedarf, damit das Fahrzeug ohne weitere Zwischenladungen das angestrebte Ziel erreichen kann.

Langstrecke	Normalstrecke	Kurzstrecke
Ca. 60km	Ca. 15km	Ca. 5km

Tabelle 3: Annahmen bzgl. der Fahrdistanz

Tabelle 3 zeigt die angenommenen zurückgelegten (einfachen) Strecken. Jedes Fahrzeug wird hierbei im Rahmen der Simulation einer dieser drei Distanzklassen zugeordnet. Die exakte gefahrene bzw. noch zurückzulegende eines konkreten Fahrzeugs wird wiederum zufallsbasiert mittels einer normalverteilten Zufallsvariable ermittelt, deren Mittelwert der angenommenen Streckendistanz der jeweils zugeordneten Distanzklasse entspricht.

Die konkret zurückgelegte Strecke der Hinfahrt zum Parkhaus wirkt sich dabei unmittelbar auf den Ladezustand des Fahrzeugs aus. Denn längere Fahrten führen naturgemäß zu einem höheren absoluten Verbrauch. Da unterstellt wird, dass die Distanz der Rückfahrt vom Parkhaus ungefähr der Länge der Hinfahrt entspricht, wirkt sich eine längere Fahrstrecke auch gleichzeitig in einem höheren Ladebedarf aus, welcher durch die zu steuernde Ladefrastruktur bereitzustellen ist.

Fahrzeugklasse

Wie bei konventionellen Fahrzeugen, gibt es auch bei elektrisch betriebenen KFZ unterschiedliche Fahrzeugklassen – vom Kleinwagen bis zur Luxusklasse. Diese Unterteilung wirkt sich nicht nur auf bestimmte Komfortmerkmale aus, sondern, für die Betrachtung dieser Arbeit relevant, insbesondere auf die zur Verfügung stehende Akkukapazität sowie den relativen Verbrauch aus. Für das erstellte Simulationsmodell wurde zwischen vier Fahrzeugklassen unterschieden: Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse sowie gehobene

Klasse. Die getroffenen Annahmen bezüglich Akkukapazität und relativen Verbrauch können Tabelle 4 entnommen werden.

	Kleinwagen⁹	Kompakt¹⁰	Mittelklasse	Gehoben¹¹
Akkukapazität	Ca. 10 kWh	Ca. 24 kWh	Ca. 40 kWh	Ca. 85 kWh
Rel. Verbrauch	15kWh/100km	20kWh/100km	25kWh/100km	30kWh/100km

Tabelle 4: Annahmen bzgl. der Fahrzeugklassen

Die genannten Akkukapazitäten sind den Herstellerangaben entnommen und aus Gründen der Vereinfachung auf einen repräsentativen Wert je Fahrzeugklasse reduziert worden. Die Angaben zum relativen Verbrauch entstammen einerseits ebenfalls den Herstellerangaben, sind jedoch um verschiedene verbrauchserhöhende Faktoren ergänzt (MARIO SEDLAK, 2012; O.V., 2012) und wiederum auf ein repräsentativen Wert je Klasse aggregiert worden.

Jedes Fahrzeug wird im Rahmen der Simulation einer bestimmten Fahrzeugklasse zugeordnet. Die exakte Akkukapazität wird hierbei wiederum aus der Realisierung einer normalverteilten Zufallsvariable mit dem entsprechenden Mittelwert der jeweiligen Klasse abgeleitet. Die relativen Verbrauchswerte sind innerhalb der Fahrzeugklassen konstant.

An Hand der Verbrauchswerte je 100 km sowie der auf der Hinfahrt zurückgelegten Entfernung, wird die verbleibende Akkukapazität bzw. der Ladezustand des Fahrzeugs angepasst. Gleichzeitig kann nun der Ladebedarf errechnet werden. Dieser Zielladezustand ermöglicht es, damit das Fahrzeug die Rückfahrt, ohne der Notwendigkeit weiterer Zwischenladungen, an.

3.2 Durchführung der Lastsimulation

Auf Basis des erstellten und im vorherigen Abschnitt beschriebenen Modells, wurden entsprechend der geplanten Arbeitspakete (siehe Abschnitt 1.3) Lastsimulationen durchgeführt. Das Ziel dieser Lastsimulationen ist es, diejenigen Einflussfaktoren (z.B. Akkukapazität, Ankunftsrate der Fahrzeuge, Ladezustand usw.) zu identifizieren, welche sich besonders auf die aggregierte elektrische Leistungsnachfrage auswirken.

⁹ Z.B. Renault Twizy oder Mia L

¹⁰ Z.B. Ford Electric oder Nissan Leaf

¹¹ Z.B. Tesla Modell S

Mit Hilfe der Untersuchungen soll die Frage geklärt werden, ob sich an Hand konkreter Werte Prognosen bezüglich der zu erwartenden Leistungsnachfrage ableiten lassen. Hierzu wurden mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells verschiedene Nutzungsszenarien ohne Steuerung, daher ohne Begrenzung der maximalen aggregierten Leistungsnachfrage, simuliert. Bei den Testläufen wurden die Parameter *Ankunftsrate*, *Kapazität*, *Ladezustand* sowie *die max. Ladeleistung* der Fahrzeuge variiert.

Ergebnis der Lastsimulation

Falls keine physischen Einschränkungen existieren und somit beliebig viele Ladesäulen sowie Stellplätze zur Verfügung stehen und alle Fahrzeuge solange geladen werden, bis diese voll sind, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der aggregierten Leistungsnachfrage und dem Produkt aus Ladezustand und Ankunftsrate. Denn durch die Ankunft teilweise entladener Fahrzeuge wird je Periode ein bestimmtes Ladepotential (in kWh aufladbare Akkukapazität) aufgebaut, welches durch die zur Verfügung stehende elektrische Anschlussleistung beladen wird.

Falls P^* die aggregierte Leistungsnachfrage in kW, $\sum\Delta C$ die Differenz zwischen maximalem und aktuellem Ladezustand (als Summe über alle Fahrzeuge) in kWh sowie R_{ank} die Ankunftsrate in eKFZ / h darstellt, so beschreibt die folgende Gleichung die Beziehung zwischen den identifizierten Einflussfaktoren und der maximalen aggregierten Ladeleistung:

$$P^* \sim \sum\Delta C * R_{ank}$$

Daher stellt ohne beschränkende Annahmen und ohne Ladesteuerung die Größe $P^* = \sum\Delta C * R_{ank}$ die obere Schranke der aggregierten Leistungsnachfrage dar. Einschränkende Annahmen wie die begrenzte Verfügbarkeit von Ladesäulen bzw. dass die Fahrzeuge die Weiterfahrt ohne vollständiges Aufladen antreten, reduziert die maximale Leistungsnachfrage P^* .

3.3 Entwicklung eines Ladesteuerungsalgorithmus

Unter Berücksichtigung eines Zielsystems¹², ist es die Aufgabe des zu entwickelnden Ladesteuerungsalgorithmus, für eine gegebene Situation aus Ladebedarf und Leistungsange-

¹² Das Zielsystem ist zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht abschließend definiert worden. Daher werden vorerst die einfach zu operationalisierende Ziele „Möglichst schnelle Ladung“, „Möglichst kurze Wartezeit bis zum Ladebeginn“ sowie „Ladung einer gewünschten Energiemenge während der Parkdauer“ bezüglich der Fahrzeuge verwenden.

bot geeignete Kompromisslösungen zu identifizieren. Dies bedeutet, dass die durch den Anschlusspunkt vorgegebene maximale Ladeleistung zu keinem Zeitpunkt durch die laufenden Ladevorgänge überschritten werden darf. Im Wesentlichen geht es bei der Ladesteuerung um die kontinuierlich zur aktualisierende Entscheidung¹³, wann bzw. in welcher Reihenfolge die Fahrzeuge mit welcher Stromstärke geladen werden sollen.

Es sind drei grundsätzliche Herangehensweisen zur Implementierung eines Ladesteuerungsalgorithmus geplant:

- einfache Heuristiken zur Einhaltung der maximalen Anschlussleistung,
- Verwendung von Metaheuristiken wie z.B. Evolutionäre Algorithmen,
- Konstruktives, dezentrales Verfahren auf Basis einer markmäßigen Verhandlung um das „knappe Gut“ elektrisches Leistungsangebot.

Als einfache Heuristiken wurden die folgenden Strategien entwickelt und an Hand des Simulationsmodells getestet und bewertet:

- First Come – First Serve.
- Gleichmäßige Aufteilung der zur Verfügung stehenden Ladeleistung auf alle angeschlossenen Fahrzeuge.
- Rangbasiert nach Ladezustand und Parkdauer.

Die letztgenannte, rangbasierte Heuristik ordnet die ladebereiten Fahrzeuge entsprechende deren Ladebedarf in verschiedene Ränge ein. Der Ladebedarf ergibt sich einerseits aus dem aktuellen Ladezustand des Fahrzeugs und andererseits aus derjenigen Energiemenge die notwendig ist, um bei dem individuellen relativen Verbrauch (siehe Abschnitt 2.1.2 / Fahrzeugklasse) des Fahrzeugs die angestrebte Rückfahrt (siehe Abschnitt 2.1.2 / Wegezweck) zurückzulegen zu können. Unter Ladebedarf ist daher unter Bezug auf ein konkretes Fahrzeug eine bestimmte Ladeenergiemenge zu verstehen, die notwendig ist, um einen angestrebten Ladezustand zu erreichen.

Es werden vier Stufen des Ladebedarfs unterschieden:

- Essentieller Ladebedarf

det. Aus Sicht des Betreibers der Ladeinfrastruktur wird vorerst als einziges Ziel und gleichzeitig als Restriktion verfolgt, dass die durch den Anschlusspunkt vorgegebene maximale Ladeleistung zu keinem Zeitpunkt überschritten wird.

¹³ Die Entscheidungssituation ändert sich jeweils, wenn ein weiteres Fahrzeug an einem Ladepunkt angeschlossen wird bzw. ein Fahrzeug das Parkhaus verlässt oder vollständig geladen wurde.

- Ausreichender Ladebedarf
- Optimaler Ladebedarf
- Voller Ladebedarf

Der essentielle Ladebedarf beschreibt diejenige Energiemenge, welche ein konkretes Fahrzeug noch aufladen muss, damit es gerade so die Rückfahrt antreten kann:

$$eL[kWh] = \text{Strecke}[km] * \text{rel. Verbrauch} \left[\frac{kWh}{100km} \right]$$

Der ausreichende Ladebedarf verlangt gegenüber dem essentiellen Ladebedarf noch einen Sicherheitspuffer von 15% der Batteriekapazität.

$$aL[kWh] = eL[kWh] + 0,15C$$

Der optimale Ladebedarf ist diejenige Energiemenge, die ein konkretes Fahrzeug laden muss, damit es einen Ladezustand von 85% der Batteriekapazität erreicht. Der volle Ladebedarf ist hingegen diejenige Energiemenge, die notwendig ist, um die Batterie vollständig aufzuladen.

Die hier beschriebenen Stufen des Ladebedarfs sind Grundlage der rangbasierten Heuristik. Den ersten Rang bilden diejenigen Fahrzeuge, welche den essentiellen Ladebedarf noch nicht erreicht haben, der zweite Rang besteht entsprechend aus den Fahrzeugen, welche den ausreichenden Ladebedarf noch nicht erreicht haben usw.

3.4 Evaluation

Um die Leistungsfähigkeit der Heuristiken und später die der komplexeren Lösungsverfahren bewerten zu können, wurde ein einfaches Szenario entwickelt:

- Jeweils drei Langzeitparker (10h) / Normalparker (2h) / Kurzzeitparker (30min)
- 25% Langstrecke (60km)
- 25% Normalstrecke (15km)
- 50% Kurzstrecke (5 km)
- 40% Kleinwagen (10kWh Akku - 15kWh / 100km)
- 40% Kompaktklasse (24kWh Akku - 20kWh / 100km)
- 15% Mittelklasse (40kWh Akku - 25kWh / 100km)
- 5% Oberklasse (85kWh / 30kWh / 100km)
- Jedes Fahrzeug kann mit max. 22kW geladen werden

Die zur Verfügung stehende maximale Ladeleistung (Anschlussleistung abzüglich Grundlast) wurde auf 30 bzw. 40kW festgelegt.¹⁴ Der maximalen Ladeleistung steht der Ladebedarf gegenüber, welcher sich für das oben beschriebene Szenario wie folgt darstellt:

Essentiell	Ausreichend	Optimal	Voll
31	43	114	147

Tabelle 5: Mittlerer Ladebedarf des Szenarios [kWh je Stunde]

Um alle Fahrzeuge zumindest mit dem essentiellen Ladebedarf zu versorgen sind folglich 31kW Ladeleistung notwendig, entsprechend 43kW um den ausreichenden Ladebedarf sicherzustellen sowie 114kW bzw. 147kW für den optimalen bzw. vollständigen Ladebedarf. Schon bei einer relativ geringen Anzahl eintreffender Fahrzeuge, wie in diesem Beispiel bei 9 eKFZ pro Stunde, sind reguläre Hausanschlüsse mit einer maximalen Anschlussleistung von 69 bis 100kW schnell ausgereizt. Dabei ist zu beachten, dass von dieser maximalen Anschlussleistung nicht ausschließlich für die Ladung der Fahrzeuge verwendet werden kann, sondern eine Grundlast für Beleuchtung, Lüftung, Aufzüge etc. abgezogen werden muss. Wie bereits beschrieben worden ist, geht dieses Szenario von der Annahme aus, dass 30 bzw. 40kW elektrische Leistung ausschließlich zum Laden der Fahrzeuge zur Verfügung steht.

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Heuristiken bei 30 bzw. 40kW maximale Ladeleistung. Hierbei steht „FCFS“ für die First Come – First Serve Heuristik, „Gleich“ für die gleichmäßige Aufteilung der zur Verfügung stehenden Ladeleistung unter allen angeschlossenen und ladebereiten Fahrzeugen sowie „Rang“ für die oben beschriebene rangbasierte Heuristik.

Als Bewertungsmaßstab dienen die in Abschnitt 2.3 definierten Stufen des Ladebedarfs. „Unzureichend“ bedeutet in diesem Fall, dass die entsprechende Anzahl an Fahrzeugen nach Ablauf der Parkdauer (siehe Abschnitt 2.1.2), daher beim Verlassen des Parkhauses, einen Ladezustand aufweisen, welcher nicht genügt, um die Distanz der Rückfahrt überwinden zu können.

¹⁴ Es wurde zwei verschiedene Szenarien angenommen, daher 30 und 40 kW verfügbare Ladeleistung. Diese Größen orientieren sich an dem Ladebedarf (siehe Tabelle 5) sowie der Leistungsfähigkeit realer Hausanschlüsse abzüglich einer angenommenen Grundlast.

Entsprechend ist in der Spalte „Essentiell“ die Anzahl der Fahrzeuge aufgeführt, welche pro Stunde das Parkhaus mit einem Ladezustand verlassen, mit welchem die Distanz der Rückfahrt gerade so zurückgelegt werden kann. Dies gilt analog für die Spalten „Ausreichend“, „Optimal“ und „Voll“.

	Unzureichend	Essentiell	Ausreichend	Optimal	Voll
FCFS (30kW)	2,68 (87,7%)	0,74 (97,3%)	3,70 (90,5%)	0,17 (47,0%)	1,53 (0,7%)
FCFS (40kW)	2,36 (98,3%)	0,75 (97,3%)	3,23 (96,0%)	0,12 (50,0%)	2,37 (0,4%)
Gleich (30kW)	2,66 (0,0%)	0,64 (0,0%)	4,17 (0,0%)	0,43 (0,0%)	0,88 (1,1%)
Gleich (40kW)	2,19 (0,0%)	0,65 (0,0%)	4,00 (0,0%)	0,58 (0,0%)	1,46 (0,6%)
Rang (30kW)	1,19 (19,3%)	1,09 (85,3%)	5,13 (93,4%)	0,21 (42,9%)	1,16 (2,6%)
Rang (40kW)	1,03 (14,6%)	1,03 (87,4%)	4,94 (93,1%)	0,24 (29,2%)	1,59 (1,3%)

Tabelle 6: Ergebnisse der verschiedenen Heuristiken – Angabe in Anzahl der abgefahren Fahrzeuge pro Stunde (in Klammern der Anteil Fahrzeuge, welcher je Kategorie nicht geladen worden ist und dennoch bei Abfahrt den entsprechenden Ladezustand aufweist)

In Klammern angegeben ist in jeder Kategorie der prozentuale Anteil der abfahrenden Fahrzeuge je Stunde, welche zwar ladebreit an den Ladepunkt angeschlossen worden sind, jedoch auf Grund der elektrischen Restriktion nicht geladen werden konnten und dennoch bei Abfahrt den entsprechenden Ladezustand aufweisen.

Beispiel Kategorie „FCFS (30kW) – Unzureichend“: 2,68 Fahrzeuge je Stunde haben mit einem unzureichendem Ladezustand das Parkhaus verlassen. Davon sind 87,7% dieser unzureichend geladenen Fahrzeuge gar nicht geladen worden.

Umgekehrt ist es durchaus möglich ist, dass ein Fahrzeug zwar an einem Ladepunkt angeschlossen wurde, allerdings während der gesamten Parkzeit nicht geladen worden ist und dennoch das Parkhaus mit einem ausreichenden oder optimalen Ladezustand verlässt. In

diesen Fällen ist das entsprechende Fahrzeug bereits mit einem relativ hohen Ladezustand in dem Parkhaus eingetroffen, eine weitere Ladung war daher nicht unbedingt notwendig.

Ein weitere Konstellation kann ebenfalls auftreten: Ein Fahrzeug kommt initial mit einem sehr leeren Akku und hat eine lange Rückreise vor sich, allerdings steht nur sehr kurze Zeit für das Laden zur Verfügung, bevor es weiterfahren muss. Bei diesem „Worst-Case-Szenario“ würde selbst ein sofortiger Ladebeginn bei maximaler Stromstärke nicht ausreichen, um den essentiellen Ladebedarf bis zur Weiterfahrt zu decken.

Mit Blick auf die Ergebnisse der Tabelle 6 wird deutlich, dass FCFS eher ungeeignet ist, für eine faire Verteilung des knappen elektrischen Leistungsangebots zu sorgen. FCFS erreicht die höchsten Werte an bei Abfahrt unzureichend geladenen Fahrzeugen. Gleichzeitig wird mit dieser Heuristik eine verhältnismäßig die größte Anzahl an Fahrzeugen vollständig aufgeladen, was in den meisten Fällen unnötig und daher kontraproduktiv sein dürfte.

Die gegenteilige Strategie, daher die gleichmäßige Verteilung des elektrischen Leistungsangebots, schneidet in Bezug auf die dargestellten Bewertungsmaßstäbe allerdings auch nicht besser ab. Es werden zwar alle angeschlossenen Fahrzeuge geladen, der resultierende Ladestrom ist allerdings überaus gering. So verlassen auch bei Verwendung der „Gleich“-Heuristik, ähnlich wie bei FCFS 2,5 eKFZ je Stunde das Parkhaus mit einem unzureichenden Ladezustand, was bei einer Ankunftsrate von 9 eKFZ je Stunde als hoher Wert angesehen muss.

Die rangbasierte Heuristik schneidet erwartungsgemäß besser ab, insbesondere konnte die Anzahl der unzureichend geladenen Fahrzeuge gegenüber den anderen Heuristiken reduziert werden. Dies spiegelt sich in dem höheren Wert „essentiell“ geladener Fahrzeuge wieder. Ebenso wurden unter Verwendung dieser Heuristik nicht so viele Fahrzeuge unnötiger Weise vollständig aufgeladen.¹⁵ Diese Heuristik erreicht den höchsten Wert an *ausreichend* geladenen Fahrzeugen.

¹⁵ Aus Sicht der Akkutechnologie ist es nicht sinnvoll, diese immer auf 100% zu laden, da die Akkus sonst schneller altern. Außerdem ist es unter Berücksichtigung der Restriktion der aggregierten Ladeleistung (Hausanschluss) ein realistischeres Ziel, möglichst viele Fahrzeuge entsprechend der angenommen Entfernung der Weiterfahrt + Reserve zu laden. Vollständiges Laden wäre unter diesem Aspekt ein unnötiger „Luxus“.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt den aktuellen Stand des eConnect-Forschungsprojekts des Fachgebiets WI2 der TU-Ilmenau. Im Rahmen der Projektstätigkeit wurde entsprechend der Aufgabenstellung ein ausführbares Modell einer lokalen Ladeinfrastruktur erstellt. Mittels dieses Simulationsmodells wurden Lastsimulationen durchgeführt, welche die obere Schranke der aggregierten elektrischen Leistungsnachfrage aufzeigte sowie deren wesentlichen Einflussparameter identifizierte. Mit Hilfe der Lastsimulation konnte gezeigt werden, dass sich insbesondere die Ankunftsrate der Fahrzeuge zum Parkhaus sowie der Ladezustand der ankommenden Fahrzeuge sich maßgeblich auf die aggregierte Leistungsnachfrage auswirken.

Des Weiteren wurden einfache Heuristiken implementiert, welche geeignet sind, die Restriktion der maximalen aggregierten Leistungsnachfrage einzuhalten. Mit Ausnahme der rangbasierten Heuristik sind diese einfachen Verfahren jedoch nicht in der Lage, für eine gerechte und vor allem für den Kunden für eine zufriedenstellende Verteilung des zur Verfügung stehenden elektrischen Leistungsangebots zu sorgen. Die rangbasierte Heuristik ist entsprechend der durchgeführten Untersuchungen am ehesten dazu geeignet, dass die Fahrzeuge das Parkhaus mit zumindest ausreichendem Ladezustand verlassen und so ihr nächstes Ziel ohne Zwischenladung erreichen. Allerdings weist auch die rangbasierte Heuristik eine recht hohe Quote an Fahrzeugen auf, welche während der Parkdauer gar nicht geladen worden sind und das Parkhaus mit einem unzureichenden Ladezustand verlassen. Dies muss man jedoch vor dem Hintergrund betrachten, dass im Rahmen der Testläufe das zur Verfügung stehende elektrische Leistungsangebot geradeso ausreichend ist, um den stündlich hinzukommenden essentiellen Ladebedarf zu decken.

Mit Hilfe komplexerer Verfahren, wie z.B. Metaheuristiken sowie konstruierenden markt-orientierten Koordinationsmechanismen, soll versucht werden, die Lösungsgüte weiter zu verbessern. Wie viel Raum für weitere Verbesserungen vorhanden ist, wird sich jedoch erst noch zeigen müssen, denn auch das theoretisch beste Verfahren ist an die harte Restriktion des zur Verfügung stehenden elektrischen Leistungsangebots gebunden. Und dieses elektrische Leistungsangebot ist sowohl in der Simulation, als auch in der Realität eher knapp bemessen. Beim derzeitigen Ausbau des elektrischen Verteilnetzes muss man sich klar die Möglichkeiten und Grenzen einer Ladesteuerung vor Augen führen: Wunder können durch diese Verfahren nicht erbracht werden, bestenfalls können die negativen Auswirkungen des sehr knappen elektrischen Leistungsangebots abgemildert werden. In der mittel- bis

langfristen Perspektive besteht daher zu Netzverstärkung / Netzausbau keine Alternative. Allerdings können die in dieser Arbeit entwickelten Ladesteuerungsalgorithmen einen Beitrag dazu leisten, die heutigen und zukünftigen elektrischen Verteilnetze möglichst effizient zu nutzen.

Literaturverzeichnis

- BÜDENBENDER, K. ; STETZ, T. ; EMMERICH, R. ; BÄZ-OBERHÄUSER, F. ; EINFELD, H. ; BRAUN, M.: Ladestrategien für Elektrofahrzeuge. In: *VDE-Kongress 2010*, 2010
- FOLLMER, R.; GRUSCHWITZ, G. ; JESKE, B. ; QUANDT, S. ; LENZ, B. ; NOBIS, C.; KÖHLER, K. ; MEHLIN, M.: *Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends*. Berlin : Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010
- GELLINGS, C. W. ; CHAMBERLIN, J. H.: *Demand-side management: Concepts and methods* : The Fairmont Press Inc.,Lilburn, GA, 1987
- GÖRZ, G.: Handbuch der Künstlichen Intelligenz. In: *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* : Oldenbourg Verlag, 2003 — ISBN 9783486272123, S. 980
- HAUKE, W.; THAELE, R. ; RECK, G.: *RWE Energie Bau-Handbuch*. 12. Aufl. Heidelberg : Energie-Verlag GmbH, 1998
- HUTSON, C. ; VENAYAGAMOORTHY, G. K. ; CORZINE, K. A.: Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions. In: *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, 2008, S. 1–8
- LINK, J.: *Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen*, 2012
- MACAL, C.M. ; NORTH, M.J.: Tutorial on agent-based modelling and simulation. In: *Journal of Simulation* Bd. 4 (2010), Nr. 3, S. 151–162
- NORTH, M.J.; HOWE, T.R. ; COLLIER, N.T.; VOS, J.R.: A Declarative Model Assembly Infrastructure for Verification and Validation. In: S. TAKAHASHI ; D.L. SALLACH ; J. ROUCHIER (Hrsg.): . Heidelberg : Springer, 2007

O.V.: *ADAC EcoTest*. URL <http://www.adac.de/infotestrat/tests/ecotest/default.aspx>

SEDLAK, M.: *Verbrauch und Reichweite von Elektroautos - sedl.at*. URL <http://sedl.at/Elektroauto/Verbrauch>. - abgerufen 2013-01-13

WESTERMANN, D. ; SCHLEGEL, S. ; AGSTEN, M.: Verfahren zur optimierten Beladung von Elektrofahrzeugen in elektrischen Verteilnetzen. In: *VDE-Kongress 2010*, 2010