

Effizienz im elektromobilen Massenmarkt

Malte Zuch, Hochschule Hannover, Fakultät IV – Wirtschaft und Informatik
Ricklinger Stadtweg 120, 30459 Hannover, Raum 301, Online: www.just-charge.com

Abstract: Elektromobilität kennzeichnet sich durch begrenzte Fahrreichweiten und lange Ladezeiten. Selbst das Laden an öffentlichen Schnellladesäulen übersteigt die reguläre Tankzeit gängiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren um ein vielfaches. Das begrenzte Angebot dieser öffentlichen Ladesäulen und die Zielsetzung der Bundesregierung, in den nächsten fünf Jahren eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen zu etablieren, wird die Problematik im Auffinden von freien Ladesäulen zunehmend strapazieren. Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist ein echtzeitnahes Ladesäulen-Management-System, welches die Fahrzeuge im Auffinden von unbelegten oder demnächst frei werdenden Ladesäulen unterstützt, so dass unter anderem Fahrten zu bereits belegten Ladesäulen minimiert werden können.

Keywords: Elektromobilität, Fahrassistenzsysteme, Ladesäulenmanagement, Fahrzeugmanagement

1 Einleitung

Gängige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren können in wenigen Minuten Fahrreichweiten bis zu 1000 Km in einem gut ausgebauten Tankstellennetz erwerben. Elektrofahrzeuge benötigen dem gegenüber bis zu acht Stunden Ladezeit an privaten Hausanschlüssen und erwerben dabei nur Fahrreichweiten von etwa 145 Km. Selbst das deutlich leistungsfähigere Laden an öffentlichen Ladesäulen übersteigt mit 20-60 min Ladezeit die reguläre Tankzeit gängiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren noch um ein vielfaches. Auch die Verfügbarkeit dieser öffentlichen Ladesäulen ist der Verfügbarkeit von regulären Zapfsäulen weit unterlegen. Das eingeschränkte Parkplatzangebot begrenzt besonders in verkehrslastigen Innenstädten die maximale Anzahl an installierbaren Ladesäulen. Weiterhin ist es für die Ladesäulenbetreiber oftmals finanziell vorteilhaft, ein Ladesäulenunterangebot aufrecht zu halten, um die bestehende und kostenintensiv ausgebaute Ladeinfrastruktur optimal auslasten zu können. Öffentliche Ladesäulen stellen daher tendenziell ein begrenztes Gut mit einer geringen Verfügbarkeit dar. Die Bundesregierung hat in Konkretisierung des "Nationalen Entwicklungsplanes Elektromobilität" das offizielle Regierungsprogramm bezüglich Elektromobilität bereits vorgestellt. Dabei sieht die Bundesregierung vor, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge im deutschen Markt zu etablieren [Bdr11]. Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) bestätigt als Beratungsgremium der Bundesregierung dieses Ziel auch aktuell im Fortschrittsbericht 2014 und bezeichnet die Jahre 2015-2017 als Phase des Markthochlaufes [NPE14]. Demnach wird die Fahrzeugdichte an Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren beständig zunehmen und damit auch die Problematik im Auffinden von unbelegten öffentlichen Ladesäulen. Fahrer von Elektrofahrzeugen unterliegen dem Informationsdefizit das sie nicht wissen, welche anderen Fahrzeuge mit ihnen aktuell im Wettbewerb um mögliche freie Ladesäulen stehen. Wenn mehrere Fahrzeuge an derselben

Ladesäule laden wollen, bekommt immer das Fahrzeug welches die Ladesäule als erstes erreicht den Ladeplatz. Sämtliche anderen Fahrzeuge müssen sich eine alternative Ladesäule suchen oder Wartezeiten in Kauf nehmen. Somit entstehen durch das Informationsdefizit der Fahrer Effizienzverluste in Form von Wartezeiten und vermeidbaren Fahrten zu bereits oder demnächst belegten Ladesäulen. Zur Minderung dieser Effizienzverluste wird aktuell an einem echtzeitnahen Ladesäulen-Management-System geforscht. Von der Hochschule Hannover unterstützen Prof. Dr.-Ing. Arne Koschel seitens der Informatik und Prof. Dr. rer. nat. Andreas Hausotter seitens der Wirtschaftsinformatik im Rahmen des kooperativen Promotionsprogramms Elektromobilität (KPE)¹ das Promotionsvorhaben vom Promovenden Malte Zuch und dessen Erforschung eines Ladesäulen-Management-Systems zur Minderung von Effizienzverluste im elektromobilen Massenmarkt.

1.1 Definition der Begrifflichkeit „Elektrofahrzeug“

Der Begriff „Elektrofahrzeug“ muss bei der Formulierung der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge zu etablieren, relativiert werden. Dieser Begriff darf nicht mit rein batteriegetriebenen Fahrzeugen gleichgesetzt werden, wie es fachfremde Medien oft öffentlich pauschalisieren. Denn der Allgemeinbegriff „Elektrofahrzeug“ umschließt gemäß dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität sowohl rein batteriegetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) als auch Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-Fahrzeuge (REEV) [Bdr9]. Der Anteil rein batteriegetriebener Elektrofahrzeuge beträgt 45 % gemäß dem zweiten Bericht der Nationalen Plattform für Elektromobilität [NPE11]. Bezogen auf die Zielsetzung der Bundesregierung, eine Million Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2020 zu etablieren, beträgt der rein batteriegetriebene Anteil demnach bis zu 450.000 Fahrzeuge.

1.2 Erwartete Anzahl an Ladesäulen

Basierend auf der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe gilt die allgemeine Zielsetzung, pro zehn Elektrofahrzeuge eine Ladesäule zur Verfügung zu stellen [Eur14]. Die Begrifflichkeit „Elektrofahrzeug“ bezieht sich hierbei auf die von der Bundesregierung geplanten „eine Million Elektrofahrzeuge bis 2020“, welche sowohl die rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge als auch die Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge und Range-Extender-Fahrzeuge beinhaltet. Diesbezüglich ergibt sich eine Ladesäulenanzahl von 100.000 Ladesäulen im Jahr 2020.

¹ KPE: „kooperatives Promotionsprogramm Elektromobilität“

Das KPE ist ein kooperatives Promotionsprogramm mit dem Themenschwerpunkt Elektromobilität. Dabei wird das Themenspektrum Elektromobilität standortübergreifend und interdisziplinär von mehreren Promovenden untersucht.

1.3 Der „elektromobile Boom“

Gemäß dem Kraftfahrzeug-Bundesamt sind zum 01. Januar 2015 in Deutschland 18.948 rein batteriegetriebene Elektrofahrzeuge zugelassen [Kba15]. Ausgehend von diesem Bestand und dem offiziellen Ziel der Bundesregierung im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge im deutschen Markt zu etablieren, wobei 450.000 Fahrzeuge rein batteriegetriebene Fahrzeuge darstellen, ergibt sich damit ein Ausbaufaktor von 23,74. Bezogen auf die verbleibenden fünf Jahre definiert dies ein jährliches Wachstum von 88,4 %. Dieses Wachstum rechtfertigt den Begriff *e-mobiler Boom* und ist Motivation für die Erforschung und Entwicklung von hochelastischen und skalierbaren Informationsverarbeitungssystemen für ein echtzeitnahes Ladesäulen-Management-System. Dieses Informationsverarbeitungssystem soll den volatilen Anforderungen des bevorstehenden e-mobilen Booms standhalten und Elektrofahrzeug-Fahrern in ihrer Entscheidungsfindung beim Auffinden von unbelegten oder demnächst frei werdenden Ladesäulen effektiv unterstützen und die kollektive Nachfragesituation damit optimieren.

1.4 Abschätzung der bevorstehenden Ladeaktivität

Die durchschnittliche deutsche Jahresfahrleistung betrug im Jahr 2013 pro Fahrzeug und Jahr 13.840 Km [Sta15]. Laut dem Kraftfahrzeug-Bundesamt ist der BMW i3 das im Jahr 2014 marktdominierende Elektrofahrzeug in Deutschland. Mit einer praxisnahen Reichweite von etwa 145 km je Akkuladung ergibt sich bei der durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 13.840 Km / Jahr, dass ein Elektrofahrzeug alle 3,8 Tage neu aufgeladen werden muss. Fahrzeuge werden jedoch nicht restlos leer gefahren bis sie wieder geladen werden, sondern es wird noch mit geringfügiger Sicherheitsreichweite neu geladen. Bei 15 km verbleibender Sicherheitsreichweite ergibt sich ein Laderhythmus von spätestens 3,5 Tagen, wenn die Fahrzeuge keine Zwischenladungen vornehmen würden. Dieses Szenario aggregiert sich im Jahr 2020 auf mindestens 123.288 täglich zu ladende rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, welchen 100.000 Ladesäulen zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 1.2).

2 Abgrenzung zu anderen Arbeiten

In der Arbeit von Mariyasagayam und Kobayashi wird ein System zur Routen-Optimierung von Elektrofahrzeugen beschrieben [MK13]. Bei dieser Betrachtung werden definierte Startpunkte und Endpunkte berücksichtigt. Ausgehend von diesen Start und Endpunkten der Primär-Route werden den Elektrofahrzeugen Alternativrouten vorgeschlagen, welche in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslast eine potentiell bessere Ladewahrscheinlichkeit entlang der neuen Route versprechen. Spontanladen im aktuellen Verkehrshotspot (Innenstadtbereich in Großstädten) und unterschiedliche Preisstrukturen der Ladesäulenbetreiber werden nicht betrachtet, sondern die konkrete Routenplanung zum vorher bestimmten Zielort steht hierbei im Vordergrund. In einer weiteren angrenzenden Arbeit wird ein Lademanagement hinsichtlich kooperierender und egoistischen Elektrofahrzeugen bezüglich einer Preisstruktur untersucht [Ha12]. Dabei wird einigen Fahrzeugen ein kooperatives Verhalten unterstellt, welche zu fixen

Preisen Energie an einer Ladesäule nachfragen. Dem gegenüber stehen weitere Fahrzeuge mit einem egoistischen Verhalten, welche dynamisch immer den jeweils günstigsten Preis an einer Ladesäule (aus-)nutzen. Die kooperativen Fahrzeuge können weiterhin auch dem Energienetz über die Ladesäulen ihre im Fahrzeug gespeicherte Energie für eine Netzstabilisierung bereitstellen. Gegenstand dieser Betrachtung sind Simulationen, welche dabei die Profitabilität einer Ladesäule in dem Nachfrageumfeld „egoistische vs. kooperative Fahrzeuge“ optimieren. Die allgemeine Planung einer Ladeinfrastruktur und die optimale Standortwahl für eine Ladesäule wurde in einer angrenzenden Dissertation beschrieben [Ks12]. Die optimale Standortauswahl bei einer Ladesäulenplanung stellt demnach ein NP-schweres mathematisches Problem dar, welches mit geeigneten Heuristiken mittels einer Simulation beschrieben wurde. Aufgrund des Ansatzes der Standortplanung für Ladesäulen findet eine allgemeine Betrachtung der Energienachfrage statt und keine echtzeitnahe Betrachtung.

Gegenüber den oben genannten angrenzenden Arbeiten besteht das Ziel der Arbeit welche hinter diesem Paper steht in einem echtzeitnahen Ladesäulen-Management-System für stark frequentierter Verkehrshotspots (Innenstadtbereiche), welches die Fahrer in der spontanen Ladesäulenentscheidung unterstützt. Der Fokus hierbei steht im dynamischen Vermitteln von Ladesäulen noch während der Fahrt im aktuellen Verkehrsfluss unter Berücksichtigung sämtlicher im Wettbewerb stehenden anderen Fahrzeuge.

3 Darstellung des Ladesäulen-Management-Systems

Schon heute verfügen viele Fahrzeuge über eine mobile Datenverbindung. Entweder direkt über das Bordsystem des Fahrzeugs oder indirekt über das Smartphone des Fahrers. Zukünftig kann davon ausgegangen werden, dass deutlich mehr Fahrzeuge über eine mobile Datenverbindung verfügen werden. Somit können die Fahrzeuge ihren aktuellen Standort und ihren Ladestand dem Ladesäulen-Management-System mitteilen. Das System wertet diese Daten echtzeitnah aus, um jedem Fahrzeug rechtzeitig die bestmögliche Handlungsempfehlung zum Auffinden einer aktuell freien bzw. einer demnächst frei werdenden Ladesäule mitteilen zu können. Ausgehend vom individuellen Ladestand und der Fahrzeugposition wird die höchste Ladesäulen-Erreichbarkeits-Wahrscheinlichkeit bei minimalen Fahraufwand berechnet und dem Fahrzeug mitgeteilt. Die Berechnung der Daten berücksichtigt dabei stets die Standortdaten und Ladestände sämtlicher im Wettbewerb stehenden anderen Fahrzeuge. Diese kollaborative Betrachtung ermöglicht, dass bevorstehende gegenseitige Blockierungen an Ladesäulen den Fahrzeugen rechtzeitig mitgeteilt werden können und eine effiziente Empfehlung von alternativen Ladesäulen stattfinden kann. Die Ladesäulenempfehlung wird dabei den Fahrzeugen noch dynamisch während der Fahrt im aktuellen Verkehrsfluss mitgeteilt. Hierbei ist besonders ein reaktives Antwortzeitverhalten des Systems erforderlich, damit noch rechtzeitig akzeptable Ladeempfehlungen zu den Fahrzeugen kommuniziert werden können. Wenn die Zeitspanne zwischen der Übermittlung vom aktuellen Standort und Ladestand des Fahrzeugs und der anschließenden Auswertung im Ladesäulen-Management-System zu langsam erfolgt (länger als zehn Sekunden), dann würde sich das Fahrzeug bereits an einer anderen Position befinden, an welcher es die empfohlene freie Ladesäule nicht mehr

effizient erreichen könnte. Beispielsweise könnte nach einer verzögerten Antwort von länger als zehn Sekunden das Fahrzeug bereits eine abbiegerelevante Kreuzung zu einer geeigneten Ladesäule überfahren haben, so dass sich keine effizient Wendemöglichkeit mehr für das Fahrzeug ergibt, um die Ladesäule noch rechtzeitig und mit minimalen Fahraufwand ohne Umweg zu erreichen.

3.1 Partitionierung der Problemstellung

Für das Jahr 2020 werden 123.288 täglich zu ladende rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge erwartet, welchen 100.000 Ladesäulen zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 1.4). Dabei sind nicht sämtliche Fahrzeuge ausschließlich auf das Laden an öffentlichen Ladesäulen angewiesen, sondern können alternativ auch am deutlich langsameren Hausanschluss laden, sofern dieser verfügbar ist. Doch besonders in Innenstädten ist ein erreichbarer Hausanschluss aufgrund der Parksituationen oftmals nicht realisierbar. Darüber hinaus werden diese Fahrzeuge zum Teil auch zusätzlich an öffentlichen Ladesäulen laden. Somit stehen diese Fahrzeuge potentiell auch mit allen anderen Fahrzeugen im Wettbewerb um die Ladesäulen und beeinflussen die Berechnung der Ladesäulen-Erreichungs-Wahrscheinlichkeit der anderen Fahrzeuge. Daher müssen auch die Fahrzeuge mit der Lademöglichkeit am privaten Hausanschluss in die Berechnung mit einbezogen werden, sobald diese sich im Verkehrsfluss befinden. Damit die Berechnung der Ladesäulenempfehlungen unterhalb von zehn Sekunden erfolgen kann, sollte die Problemstellung partitioniert werden. Ein aufwendiges Berechnen sämtlicher möglichen Fahrzeug-Ladesäulen-Kombinationen ist aber nicht notwendig, da nur die Kombinationen berechnet werden müssen, welche innerhalb der Fahrreichweite der Fahrzeuge liegen. Praktisch reduziert sich die Problemstellung damit auf die Berechnung auf Großstadtebene. Großstädte bieten dabei das Potential, voneinander abgrenzbare Teilproblemstellungen einzeln zu berechnen, statt sämtliche Daten simultan zu berechnen. Die Verkehrssituationen können für Großstädte separat berechnet werden, da die Fahrzeuge zeitgleich nur um die lokal verfügbaren Ladesäulen innerhalb der jeweiligen Großstadt im Wettbewerb stehen, nicht aber mit den von anderen Großstädten, welche außerhalb der Fahrreichweite liegen. Somit werden nur ein Bruchteil der 123.288 Fahrzeuge und 100.000 Ladesäulen zeitgleich in Abhängigkeit zueinander berechnet. Bei aktuell 76 Großstädten müssen demnach durchschnittlich pro Großstadt nur etwa 1.600 Fahrzeuge und 1.300 Ladesäulen in Abhängigkeit zueinander berechnet werden, was die Komplexität der Berechnungen reduziert. Die empfangenen Fahrzeugdaten können dabei zunächst auf einem zentralen Server gespeichert und dann für jede Großstadt auf separaten Servern berechnet werden, wie es die nebenstehende Abbildung veranschaulicht.

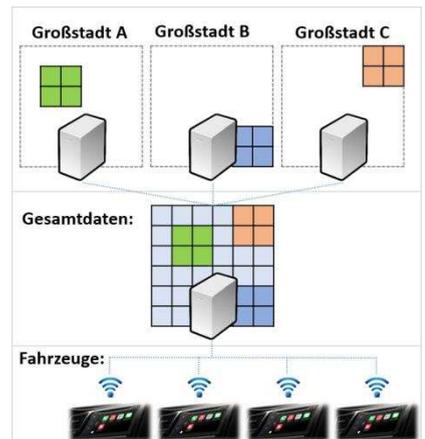


Abbildung 1: Konzept zur Partitionierung der Problemstellung

3.2 Erste Simulationen und Teilergebnisse

Erste Ergebnisse des sich noch in der Entwicklung befindenden Systems können an dieser Stelle bereits genannt werden. Simuliert wurden Großstadtbereiche mit einer Größe von 10 km x 10 km, mit 1.600 Fahrzeugen, welche im Wettbewerb um 1.300 Ladesäulen mit einer Standardladeleistung von 20 kW stehen. Simuliert wurde der „Rush-Hour“-Betrieb in dem alle Fahrzeuge in ständiger Bewegung sind und sich bei niedrigem Ladestand auf die Ladestellensuche begeben. Zunächst wurde das egoistische Standardfahrverhalten ohne aktiviertem Ladesäulen-Management-System simuliert, bei dem die Fahrzeuge immer zu der Ladesäule fahren, welche sich am nächsten zur aktuellen Fahrzeugposition befindet. Dem gegenüber wurden Simulationen mit aktiviertem Ladesäulen-Management-System getätigt. Dabei wurden unterschiedliche Adaptionsquoten der Fahrer berücksichtigt, wenn 10 %, 50 % und 100 % der Fahrer den Empfehlungen des Ladesäulen-Management-Systems adaptieren. Es wurde der durchschnittliche Ladeweg² der Fahrzeuge protokolliert und die durchschnittlichen Warteschlangen erfasst, welche sich an den Ladesäulen bilden. Abschließend wurde der Energiedurchsatz je Fahrzeug und Stunde erfasst.

Simulation	Ladeweg	Warteschlange	Energiedurchsatz
0 % Ladesäulen-Management-System:	2,7 %	1076	1,5 kWh/h
10 % Ladesäulen-Management-System	2,5 %	893	1,8 kWh/h
50 % Ladesäulen-Management-System	2,4 %	284	3,3 kWh/h
100 % Ladesäulen-Management-System	3,1 %	20	3,9 kWh/h

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse

Die Simulationen zeigen, dass ein Ladesäulen-Management-System auch schon bei geringen Adaptionsquoten der Fahrer positive Effekte erzielen kann. Wenn nur 10 % der Fahrer den optimierten Empfehlungen des Ladesäulen-Management-Systems nachkommen, können die durchschnittlich erforderlichen Ladewege für die Fahrer um -3,2 % reduziert werden. Gleichfalls nehmen die Warteschlangen an den Ladesäulen um -20,5 % ab. Der Energiedurchsatz wird um + 25,7 % verbessert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Forschungsstand zeigt bereits erste positive Effekte, welche mit einem Ladesäulen-Management-System erzielbar sind, selbst wenn die Ladeempfehlungen des Systems nur von einer Minderheit der Fahrer befolgt werden. Im weiteren Forschungsverlauf werden die Simulationen mit weiteren Fahrprofilen ergänzt und zusätzliche Szenarien simuliert.

Darüber hinaus erfolgt eine weiterführende Untersuchung bezüglich einer effizienten Partitionierbarkeit der Gesamtproblemstellung und der zugehörigen Verteilung der zu berechnenden Daten auf unterschiedlichen Berechnungs-Servern.

² Ladeweg: Bei dem Ladeweg handelt es sich um den Weg, welchen die Fahrzeuge investieren müssen, um zu einer Ladesäule zu gelangen. Wenn ein Elektrofahrzeug z.B. 145 km Fahrreichweite mit einer Akkuladung hat und durchschnittlich 2 km Ladeweg zum Aufsuchen einer freien Ladesäule investieren müsste, dann würden der Ladeweg 1,37 % der Gesamtreichweite betragen. In den Simulationen wurde der Ladeweg zur besseren Interpretation daher in Relation (Prozent) zur Gesamtreichweite der Fahrzeuge angegeben.

Literaturverzeichnis

- [Bdr11] Bundesregierung,
Regierungsprogramm Elektromobilität, S. 10, 2011.
- [NPE14] Nationale Plattform Elektromobilität,
Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung, S. 3, 2014.
- [Bdr9] Bundesregierung,
Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität, S. 6, 2009.
- [NPE11] Nationale Plattform Elektromobilität,
Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, S. 31, 2011.
- [Eur14] European Union,
Directive 2014/94/EU of the european Parliament and of the Council, S. 4, 2014
- [Kba15] Kraftfahrt-Bundesamt,
Bestand an Pkw am 1. Januar 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten, 2015.
- [Sta15] Statistisches Bundesamt,
Umweltökonomische Gesamtrechnungen, S. 12, 2015.
- [MK13] Electric Vehicle Route Assistance Using Forecast on Charging Station
The Third International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, S. 139, Lisbon, 2013.
- [Ha12] Han, Y.; Chen, Yan.; Han, F.; Liu, K.
An Optimal Dynamic Pricing and Schedule, University of Maryland, Maryland, S. 2, 2012.
- [Ks12] Stiefen, K.
Simulation und Optimierung der Standort- und Kapazitätsauswahl in der Planung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten, Universität Paderborn, Paderborn, S. 120, 2012