

DISS. ETH NO. 21633

***AGENT-BASED SIMULATION OF ELECTRIC VEHICLES:
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A FRAMEWORK***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
RASHID AHMED WARAICH

MSc ETH in Computer Science

born on 25.10.1982

citizen of
St. Gallen-Tablat (Switzerland) and Pakistan

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Kay W. Axhausen, examiner

Prof. Dr. Theo Arentze, co-examiner

2013

Abstract

Major global concerns for today's world are the implications of climate change and future energy security. The transportation sector plays an important role within this context, as it currently heavily relies on fossil fuels. In order to break this dependence, electric vehicles could play a key role, especially due to their greater energy conversion efficiency compared with conventional vehicles. Furthermore, by using electricity these vehicles can play an important role in the energy system of the future, where energy generation is envisioned to be more sustainable, incorporating a higher share of renewable energy resources. However, as many of these energy sources are intermittent and require energy storage capacities, the batteries of electric vehicles could take up this role; by exchanging information between electricity demand and supply stakeholders in real-time ("smart grid"), an electric vehicle would charge at times of electricity oversupply and stop charging or even supply energy back to the grid for short periods in times of electricity generation shortage, in order to stabilize the electricity network ("vehicle to grid").

But there are also concerns that the electricity grid, which has not been designed with dynamic demands in time and space in mind, could suffer from the large scale integration of electric vehicles. This could manifest itself in powerline and transformer overloads on lower levels of the electricity network distribution infrastructure. This security and stability of the grid is further at risk due to increased distributed energy generation (including alternative energy) and the liberalization of electricity markets. In this case electricity is traded beyond national borders, leading to possible congestion at powerlines. In order to support the analysis and future design of such complex systems including electric vehicles, integrated modeling of energy demand and supply is needed. This dissertation proposes a framework for such modeling, with particular focus on electricity demand modeling for electric vehicles.

As many problems within this context require disaggregated models in time and space, e.g. to uncover bottlenecks in the electricity grid, an existing agent-based travel demand simulation called MATSim is used, which allows the modeling of individual preferences. In order to prepare MATSim for simulation of large scale disaggregated electric vehicle scenarios, a new traffic micro-simulation model is implemented together with other performance enhancements to the framework, making use of parallel computation. Additionally, the current parking model in MATSim is re-

placed by a new parking model, which takes parking supply constraints into account and also supports special parking for electric vehicles with integrated electricity charging facilities. The parking choice model has been developed further towards an initial parking search model in the course of this dissertation.

Based on this work, a framework has been developed that integrates various models, including a vehicle fleet definition, vehicle energy consumption models and electricity charging models. In addition, various types of charging infrastructure are modeled including stationary infrastructure with plugs and inductive charging along roads. Furthermore, several types of charging schemes are available including *smart charging*, where an intelligent central entity in the smart grid is assumed which controls the charging of vehicles.

During the course of this dissertation it became evident that there is a lack of integrated and detailed electricity demand and supply models, which hampers interdisciplinary work in the field. Therefore, the framework is being generalized and published as open source under the name “Transportation Energy Simulation Framework”. For many models only basic implementations and interfaces are provided. The idea is that other researchers who are experts within their fields can build on top of it, for example models for “vehicle to grid” applications.

A case study for the city of Zurich is presented in this dissertation, which highlights the capabilities of the framework to uncover possible bottlenecks in the electricity network. Furthermore, the case study also highlights the ability of the models to support policy design. To the best of the author’s knowledge such integrated modeling is the first of its kind, in terms of methodology, spatial and temporal resolution and scenario size.

Kurzfassung

Heutzutage stehen Fragen bezüglich möglicher Folgen des Klimawandels und Energiesicherheit im globalen Fokus. In diesem Umfeld spielt der Transportsektor eine wichtige Rolle, da dieser derzeit hauptsächlich auf fossile Energieträger angewiesen ist. Um diese Abhängigkeit zu reduzieren, könnten elektrische Fahrzeuge eine zentrale Rolle einnehmen, insbesondere wegen ihrer höheren Energieumwandlungseffizienz im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen. Da diese Fahrzeuge mittels Elektrizität betrieben werden, könnten sie eine wichtige Rolle im Energiesystem der Zukunft einnehmen, in welchen die Energiegewinnung zunehmend nachhaltiger gestaltet werden soll und der Anteil der erneuerbaren Energiequellen zunehmen soll. Da aber die Gewinnung erneuerbarer Energie zeitlich fluktuieren kann und unzuverlässig ist, braucht es Energiespeicherkapazitäten. Die Batterien der elektrischen Fahrzeuge könnten diese Rolle übernehmen, indem sie in Echtzeit Information zwischen Energienachfrage und Energieanbieter austauschen könnten. Dadurch könnten die Batterien zu jenen Zeiten aufgeladen werden, wo es ein Energieüberangebot gibt, und aufhören zu laden oder sogar Energie ins Netz für kurze Zeiten entladen, wenn es Engpässe in der Energiegenerierung gibt, um das elektrische Netz zu stabilisieren.

Es bestehen aber Bedenken, dass das elektrische Netz, welches nicht für eine solche dynamische Nachfrage konzipiert wurde, durch eine grossflächige Integration elektrischer Fahrzeuge in Mitleidenschaft gezogen werden könnte. Dies könnte sich in Form von Stromleitungs- und Transformatorenüberladungen ausdrücken, insbesondere auf tieferen Ebenen des elektrischen Netzes. Die Sicherheit und Stabilität des elektrischen Netzes sind des Weiteren durch die verteilte Energieerzeugung und die Liberalisierung der Strommärkte gefährdet. In letzteren Fall wird der elektrische Strom über Landesgrenzen hinaus gehandelt, welches zu Engpässen in Stromübertragungsleitungen führen kann. Um die Analyse und das zukünftige Design eines solch komplexen Systems mitsamt elektrischen Fahrzeugen zu untersuchen, ist eine integrierte Modellierung von elektrischer Nachfrage und Angebot erforderlich. Diese Dissertation schlägt für solche Modellierung ein Framework vor, welches insbesondere auf die Modellierung elektrischer Nachfrage durch elektrische Fahrzeuge fokussiert.

Aufgrund der erforderlichen Detailliertheit in Raum und Zeit bedarf es disaggregierter Modelle, z.B. um Engpässe im elektrischen Netz aufzudecken. Deshalb wird die agenten-basierte Nachfragesimulation MATSim verwendet, welche es erlaubt individuelle Präferenzen von Personen zu modellieren. Um MATSim für die Simulation grosser und disaggregierter Szenarien vorzubereiten, wurde ein neues Verkehrs-Mikrosimulationsmodell implementiert und weitere Laufzeitverbesserungen des Frameworks vorgenommen, wobei insbesondere Parallelkalkulationen zum Einsatz kamen. Zusätzlich wurde das aktuelle Parkmodell in MATSim durch ein neues Parkmodell ersetzt, welches Parkangebotsbeschränkungen berücksichtigt und auch spezielle Parkplätze für Elektrische Fahrzeuge mit Lademöglichkeiten integriert. Auch wurde dieses Modell hingehend zu einem initialen Parksuchmodell erweitert.

Basierend auf diesen Arbeiten wurde ein Framework entwickelt, welches die diversen Modelle integriert, inklusive eines Fahrzeugflottenmodells, Fahrzeugenergieverbrauchsmodells und diverser Elektrizitätsauflademodelle. Zusätzlich wurden diverse Typen von Auflade Infrastrukturen modelliert, inklusive stationärer Auflade Infrastruktur mit Stromstecken und induktives Aufladen entlang von Strassenzügen. Des Weiteren sind diverse Typen von Aufladearten verfügbar, inklusive „Intelligentes Aufladen“, bei welchen eine zentrale Einheit im Stromnetz angenommen wird, welche das Aufladen der Fahrzeuge steuert.

Während dem Werdegang dieser Dissertation wurde klar, dass es einen Mangel an integrierten Modellen für detaillierte Elektrizitätsnachfrage- und Angebotsmodellierung gibt, welche die interdisziplinäre Arbeit in diesem Fachgebiet beeinträchtigt. Deshalb wird das Framework verallgemeinert und Opensource unter dem Namen “Transportation Energy Simulation Framework” zur Verfügung gestellt. Für viele mögliche Anwendungen stehen Grund Implementationen samt Schnittstellen zur Verfügung. Die Idee ist, dass andere Forschende, welche Experten in ihren jeweiligen Gebieten sind, darauf aufbauen und das Framework erweitern können.

Es wird eine Fallstudie für Zürich in der Dissertation präsentiert, wo das Framework benutzt wird um mögliche Engpässe im elektrischen Netz aufzudecken. Auch zeigt die Fallstudie Möglichkeiten auf um Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Gemäss dem Wissen des Autors ist die integrierte Modellierung die erste ihrer Art, aufgrund der Methodik, geographischer und zeitlicher Auflösung sowie Grösse der möglichen Szenarien.