



Gesellschaft für Energie und  
Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH

**„Carsharing und Intermodalität als  
kombinatorische Optimierungsprobleme  
im Kontext der Elektromobilität“**

Abschlussbericht von René Schönfelder, Lübeck  
EKSH-Promotionsstipendium 3/2013

Dauer des Stipendiums:  
August 2013 bis Juli 2016

Betreuer: Prof. Dr. Martin Leucker,  
Universität zu Lübeck

Kontakt: [schoenfelder2211@gmail.com](mailto:schoenfelder2211@gmail.com)  
EKSH-Projektleiter: Dr. Klaus Wortmann, [wortmann@eksh.org](mailto:wortmann@eksh.org)

Dokumentation

## Abschlussbericht

# zum Promotionsvorhaben „Carsharing und Intermodalität als kombinatorische Optimierungsprobleme im Kontext der Elektromobilität“

von René Schönfelder

03. Mai 2017

### Einleitung

Mit dem dritten Jahr des Promotionsstipendiums schließe ich meine Forschungen zur nachhaltigen Mobilität durch die Entwicklung einer Systemlösung und der dabei auftretenden Optimierungsprobleme ab. Ich berichte über den aktuellen Stand meiner Ergebnisse und beschreibe mögliche Perspektiven für die Zukunft.

Nachdem ich meine Forschung 2012 im Institut für Softwaretechnik und Programmiersprachen unter der Betreuung von Prof. Leucker angetreten bin, entwickelte ich die vier Forschungsfragen, mit denen ich 2013 in das Stipendium gestartet bin:

1. Welche Mobilitätskonzepte wird es in Zukunft geben und wie sieht moderne Mobilität z.B. auch in Schleswig Holstein aus? Welche Rolle spielen dabei Elektrofahrzeuge?
2. Welche Optimierungsprobleme treten in der Elektromobilität auf, welche Kriterien können verwendet werden und wie können Lösungen exakt oder approximativ berechnet werden?
3. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede tragen auftretende Optimierungsprobleme in sich und wie lassen sich vorhandene Modelle erweitern oder kombinieren?
4. In welcher Form trägt eine Lösung der Optimierungsprobleme zu tatsächlichen Systemlösungen bei?

Die erste Frage ist allgemein gehalten und prognostisch. Sie setzt damit den Rahmen für die drei folgenden, konkreteren Fragen, zu denen ich Ergebnisse gefunden und publiziert habe.

### Ergebnisse

Die praktische Umsetzung meines Forschungsvorhabens erfolgte konkret mit dem Navigationssystem GreenNav, das speziell auf Elektrofahrzeuge ausgerichtet ist und

beispielsweise Höhenunterschiede berücksichtigt und fortgeschrittene Reichweitenprognosen anbietet. Mein Ziel dabei war die Entwicklung eines Prototypen anhand dem ich die von mir entwickelten Konzepte in der Praxis verifizieren konnte. Weiterhin dient GreenNav als Lernplattform für Informatik-Studierende, die so tatkräftig die Entwicklung unterstützen und aktiv an der Forschung teilnehmen konnten.

Bei der Recherche bin ich auf ein wesentliches Problem gestoßen, dass häufig in der Algorithmenentwicklung vorzufinden ist. Ausgehend von der Kürzesten-Wege-Suche, die als Grundlage für jedes Navigationssystem dient, gibt es zwei Richtungen, die in der Forschung verfolgt werden. Die erste Richtung ist die Entwicklung von wesentlich effizienteren Algorithmen für die Kürzeste-Wege-Suche als Dijkstra's Algorithmus und A\*. Die andere Richtung ist die Erweiterung der Kürzesten-Wege-Suche, um den realen Anforderungen zu entsprechen. Das resultierende Problem ist, dass beide Richtungen nur unter großem Aufwand und häufig unter Vernachlässigung des Praxisbezugs miteinander verbunden werden können.

Aus diesem Grund veröffentlichte ich 2014 in Beijing ein verallgemeinertes Problem der Kürzesten-Wege-Suche auf der IOV (Internet of Vehicles), einer internationalen Konferenz über die Vernetzung von Fahrzeugen. Dabei fügte ich die Modelle des energie-optimalen Routings (für Elektrofahrzeuge) mit zeitabhängigem Routing (für öffentlichen Verkehr) zusammen. Das entwickelte Modell (State-Based-Routing), verwendet Funktionen mit speziellen Eigenschaften als Kantengewichte. Ich konnte zeigen, dass ein Großteil aller Algorithmen für Kürzeste-Wege auch auf dieses von mir entwickelte Modell anwendbar ist.

Um die genauen Umstände zu ermitteln, wann genau sich die Ergebnisse der Algorithmenforschung auf verallgemeinerte Modelle anwenden lassen, beschäftigte ich mich mit algebraischen Routingmodellen. Für das Routing von Fahrzeugen gab es noch keine algebraischen Ansätze, ich fand aber durchaus schon einige Arbeiten, die sich auf algebraisches Internetrouting beziehen, also auf die Wegfindung von Nachrichtenpaketen im Internet. Diese Ergebnisse passte ich auf das Routing von Fahrzeugen an und konnte damit die Frage nach den genauen Umständen der Anwendbarkeit von Algorithmen auf verallgemeinerte Probleme weitgehend beantworten. Dieses Ergebnis veröffentlichte ich 2015 in Buenos Aires auf der IJCAI (International Joint Conference on Artificial Intelligence).

Um im Gegenzug auch weiterhin das GreenNav-Projekt voranzutreiben, entwickelte ich gemeinsam mit einer kleinen Gruppe von Master-Studierenden ein Konzept zur Weiterführung von GreenNav als Open-Source-Projekt. Auf diese Weise werden nicht nur die Ergebnisse der Öffentlichkeit nutzbar gemacht, der Aufbau einer offenen Community trägt außerdem zur kontinuierlichen Weiterentwicklung bei. Aus internen Gründen haben wir uns dann gemeinsam mit

der Institutsleitung dazu entschieden, das Frontend (also die Webseite für den Zugriff auf die im Backend liegenden Algorithmen) auf der Open-Source-Plattform Github zu veröffentlichen. Dies gab uns einerseits die Möglichkeit die vielseitigen, technischen Angebote für OpenSource-Projekte zu nutzen, vor allem verfolgten wir damit aber den Aufbau einer GreenNav-Community, um das Projekt auch über die finanzielle Unterstützung meines Stipendiums hinaus weiterzuführen. Mit der Open-Source-Entwicklung bewarben wir uns weiterhin um die Teilnahme am Google Summer of Code, einem von Google organisiertem und finanziertem, dreimonatigem Coding-Projekt, in dem Studierende sich aus aller Welt auf Google-Stipendien zur Weiterentwicklung von GreenNav bewerben konnten. Zusammenfassend wurden so drei Studierende gefördert, die im Sommer 2016 tatkräftig bei der Programmierung geholfen haben und so den Start für die GreenNav-Community legten.

## Bezug und Rückblick

In Bezug auf die dritte Frage nach den Gemeinsamkeiten und Unterschieden der auftretenden Optimierungsprobleme sowie ihrer Erweiterbarkeit und Kombinierbarkeit setzte ich mich meinen Fokus auf Routing-Probleme. Auf diesem Gebiet konnte ich hervorragende und international anerkannte Ergebnisse vorweisen, die nun auch den Schwerpunkt meiner Dissertation einnehmen. Um insgesamt den Rahmen meines Forschungsvorhabens nicht weiter zu überziehen, habe ich mich deswegen dafür entschieden, die Planungsaspekte meiner Forschungsfragen auszulassen.

Die zweite Forschungsfrage mündete stets in die eigentliche Problemstellung nach den Zielen der Energiewende – welches Ziel wird mit der Einführung der Elektromobilität konkret verfolgt? Nur hierauf aufbauend kann auch eine Antwort nach den auftretenden Optimierungsproblemen erfolgen. Ursprünglich lag der Fokus meiner Forschung auf der Suche nach energie-optimalen Wegen, um einerseits Energie auf dem Weg von A nach B zu sparen, andererseits aber besonders um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu optimieren. Dabei, so in der Algorithmenforschung leider häufig vernachlässigt, ist das eigentliche Ziel, den Nutzen und die Einsatzgebiete von Elektrofahrzeugen – die mit regenerativen Energien betrieben werden können – zu entdecken und diese in das bestehende Verkehrsnetz optimal zu integrieren. Die Vorstellung, jedes herkömmliche Auto gedankenlos durch ein Elektrofahrzeug zu ersetzen, ist irreführend. Stattdessen sollte das Potenzial der Elektromobilität optimal ausgenutzt werden, indem wir die Anwendungsfälle erkunden und ausbauen. Aufbauend auf dieser grundlegenden Vorstellung widmete ich mich besonders der Integration von Elektromobilität und öffentlichen Verkehrsmitteln. Daraus resultiert – aus mathematischer/algorithmischer Sicht – dass Routing-Probleme eine Vielzahl von Kriterien, wie beispielsweise Zeitabhängigkeit, Zeitoptimalität, Kosten, Komfort, und eben besonders auch den Energieverbrauch berücksichtigen müssen. Um einen Ansatz zu entwickeln, der diese Kriterien vereint, entwickelte ich das algebraische Routing-Modell für Straßennetze.

Bezüglich der vierten Forschungsfrage kann ich direkt von meinen Erfahrungen in der Entwicklung von GreenNav berichten, da ich hier gemeinsam mit Studierenden an einer prototypischen Systemlösung gearbeitet habe. Im Laufe des Projekts wurden eine Vielzahl verschiedener Optimierungsprobleme entwickelt und verworfen. Die Hoffnung auf die Entdeckung eines geeigneten, übergeordneten Konzepts wurde jedoch nicht aufgegeben, da eine vermeintliche Gemeinsamkeit zwischen den verwandten Problemen stets auf der Hand lag, sich aber der mathematischen Erfassung lange Zeit entzog. Glücklicherweise wählte ich den algebraischen Ansatz, da ich so nicht nur die Routing-Probleme miteinander kombinieren konnte, sondern gleichzeitig auch stets eine Analogie zur algorithmischen Umsetzung in Programmiersprachen mit generischen Typsystemen (wie Java, C++, C#) hatte. Letztendlich entschied ich mich für eine Umsetzung in Scala – einer funktionalen Programmiersprache. Vereinfacht gesagt, ist eine funktionale Programmiersprache ziemlich nah an der Mathematik gehalten, deshalb war die Programmierung recht gut umsetzbar. Vollständig abgeschlossen, ist diese Analogie jedoch noch nicht, da bei der Programmierung nicht nur die mathematischen Konzepte eine wichtige Rolle spielen, sondern auch die softwaretechnischen Konzepte, das heißt, die verschiedenen mathematischen Beschreibungen sinnvoll unter einem Dach zu vereinigen. Hier ist noch viel zu tun, denn ein Promotionsprojekt kann keine vollständige Systemlösung zum Ergebnis haben, sondern nur explorativ den Weg dorthin aufzeigen. Ich bin der Meinung, dass dies sehr gut gelungen ist, da die Umsetzbarkeit für ein intermodales Navigationssystem prototypisch nachgewiesen wurde. Entscheidend für eine vollständige Umsetzung ist besonders die Zusammenarbeit mit öffentlichen Verkehrsbetreibern und Mobilitätsanbietern oder zumindest die Offenlegung ihrer Verkehrsverbindungsdaten.

Zusammenfassend kann ich aus dieser Perspektive einen Ausblick bezüglich der einleitenden Forschungsfrage geben. Das Elektrofahrzeug ist vielseitig, es ergibt sich bereits eine breite Vielfalt aus möglichen Anwendungen, vom elektrisch unterstützten Post-Fahrrad über das private Elektroauto bis hin zu Elektrobussen und -LKWs. Gemeinsam haben diese aktuell ihre begrenzte Reichweite und damit verbunden besonders die Angst bei Kunden und Investoren des 'Liegenbleibens'. Um genau das zu vermeiden, werden vielerlei Vorschläge gemacht. Entscheidend ist jedoch die Erkenntnis, dass Elektrofahrzeuge eben nicht wie herkömmliche Autos verwendet werden können/sollten und deshalb auch nicht den gleichen Ansprüchen unterliegen. Stattdessen überzeugen Elektrofahrzeuge genau dort, wo keine langen Reichweiten gefahren werden oder diese zumindest gut vorausgeplant werden können. In Verbindung mit öffentlichem Verkehr ist genau dies möglich, deshalb sehe ich die Zukunft in einem gut strukturiertem intermodalen Verkehr, der nicht nur CO2 reduziert, sondern auch die Städte sauberer macht, weniger Lärmbelästigung nach sich zieht, eine „Blechwüste“ vermeidet, und allen Menschen gleichermaßen eine komfortable, bezahlbare und grüne Mobilität ermöglicht.



## Zukunftsperspektive

Mit den erzielten Ergebnissen konnte ich einen Beitrag zum aktuellen, wissenschaftlichen Diskurs in der Forschung zur Algorithmenentwicklung und zur Elektromobilität leisten. Um die Reichweite dieser Ergebnisse zu erhöhen, veröffentlichte ich Teile des GreenNav-Projekts und ermöglichte den Aufbau einer Open-Source-Community, um das Projekt auch nach Abschluss der Promotion fortsetzen zu können.

In der Forschungsgruppe zeigten sich einige talentierte Studierende interessiert an der Fortsetzung der Forschungsarbeiten, insbesondere an der konkreten Umsetzung eines einsatzfähigen Prototypen, um damit Unternehmen aus und in der Region zu unterstützen und so den Transfer in die Wirtschaft umzusetzen.

Die Niederschrift der Dissertationsschrift verzögerte sich leider aufgrund gesundheitlicher Umstände. Der Hauptteil der Dissertation ist formuliert und befindet sich jetzt in der Endredaktion. Die finale Version und Einreichung zur Promotionsprüfung strebe ich im Frühjahr 2017 an.

Nach Auslauf meines Stipendiums bin ich nun bei einem Softwareunternehmen in der Wirtschaft tätig und unterstütze die Entwicklung einer Logistik-Software. Ich möchte nun erst einmal weitere Erfahrungen in der Praxis sammeln, schließe aber eine Rückkehr in den Hochschulbetrieb nicht aus. Für die Möglichkeit im Rahmen des Stipendiums ein gesellschaftlich relevantes Thema sowohl abstrakt zu untersuchen als auch in der Praxis umzusetzen, bin ich der EKSH sehr dankbar.

## Hinweise und Empfehlungen

Ich bin der EKSH nicht nur für die finanzielle Unterstützung, sondern auch für den positiven Rückhalt sehr dankbar. Diesen Rückhalt wünsche ich jedem jungen Wissenschaftler und jeder jungen Wissenschaftlerin im Rahmen ihrer Forschungsarbeit. Gerne würde ich alles, was ich gelernt habe, weitergeben an die nachfolgenden StipendiatInnen. Es ist aber auch so, dass alle Tipps und Hinweise immer nur Anregungen sind und in der jeweiligen Situation vielleicht auch anders ausfallen können. Trotzdem möchte ich ein ein paar allgemeine Tipps geben:

1. Such dir Gleichgesinnte, sprich über deine Probleme, sprich aber auch genau so über deine Erfolge. Ein Austausch mit anderen ist inspirierend und motivierend.
2. Überdenke deine Ausgangslage. Mit einem guten Thema kannst du zwar viel

erreichen, genauso wichtig ist aber auch eine Betreuung, die sich ernsthaft für die Ergebnisse deiner Fragestellungen interessiert, eine Forschungsgruppe, in der du verwandte Themen findest und dich austauschen kannst, und ein Ziel, für das du brennst und das dich mehrere Jahre bei der Stange hält.

3. Ein Lese-Tagebuch. Dadurch weißt du dann auch nach drei Jahren noch, wieso ein Artikel wichtig für deine Forschung war. Ich schreibe mir inzwischen zu jedem gelesenen Artikel ein paar Sätze auf, was dieser mit meinem Thema zu tun hat.
4. Falls du nicht kumulativ promovierst, dann solltest du zwischendurch schon einmal einige Abschnitte niederschreiben, auch wenn du sie am Ende noch einmal umschreiben solltest.
5. Deine Forschungszeit gehört dir und nur dir allein. Sicherlich wirst du deinen Professor oder deine Professorin in der Lehre unterstützen, Studierende werden dich belagern und deine Familie wird dich in Anspruch nehmen. Aber nimm dir Zeit, um zu lesen; nimm dir Zeit für Ideen; nimm dir Zeit, um zu schreiben. Und trenne diese drei Dinge voneinander.
6. Lass dich von schwierigen Zeiten nicht entmutigen!

Gerne stehe ich bereit für Nachfragen. Meine Email: [schoenfelder2211@gmail.com](mailto:schoenfelder2211@gmail.com)