

# Reichweitenoptimierende Fahr- und Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge

## Kurzfassung

Stefan Köhler<sup>1</sup>

**Abstract:** Im Rahmen der Dissertation wurde ein neuartiges, fahrzeugweites Energiemanagement erforscht und realisiert. Dieses Energiemanagement beinhaltet die Berechnung von situationsadaptiven und von den Fahrzeugparametern abhängigen Geschwindigkeitsprofilen, die aus Sicht der Zeit- und Energieeffizienz optimiert werden. Die Profile dienen wahlweise als Eingang für eine automatische Längsführung wie beim Adaptive Cruise Control oder werden durch ein Fahrerassistenzsystem zur Generierung von Fahrhinweisen verwendet. Eine weitere Komponente des Systems, welche zu gesteigerter Energieeffizienz führt, ist die Drehmomentverteilung für einen Antriebsstrang mit zwei separaten Motoren. Diese Strategie wird weiterhin für Fahrzeuge mit radindividuellen Motoren erweitert, um so zusätzlich die Agilität des Fahrzeugs zu erhöhen. Auf öffentlichen Straßen konnten mit diesem System Reichweitensteigerungen im Bereich von 26 % bei einer Verlängerung der Reisezeit um nur 8 % erzielt werden.

## 1 Einleitung und Motivation

Der sogenannte Treibhauseffekt ist einer der Hauptgründe, der in den letzten Jahren zur Forderung der vermehrten Einführung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen beigetragen hat. Forscher argumentieren, dass die vom Menschen verursachte Klimaveränderung und die damit einhergehende Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde nur durch die Reduzierung des Ausstoßes sogenannter Treibhausgase begrenzt werden kann [So07, Co10]. Die EU plant aus diesem Grund im Rahmen des *2030 Framework of Climate & Energy* die Emissionen um 40 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu senken [Eur14a]. Eine der Stellschrauben ist dabei die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Personenkraftfahrzeuge, die in der EU einen Anteil von etwa 12 % der Gesamtemissionen haben [Eur14b]. [Ed14] benennt mit 10,2 % durch Transport von Personen und Gütern auf der Straße einen vergleichbaren Anteil für eine weltweite Betrachtung der Emissionen.

Setzt man voraus, dass der Strom, der zum Laden der Elektrofahrzeuge genutzt wird, aus regenerativen Quellen stammt, können diese in signifikantem Maße zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen. Selbst wenn die Primärenergie zum Antrieb der Fahrzeuge nicht aus regenerativen Quellen stammt, ist es zumindest möglich, die Emissionsbelastungen in bestimmten Gebieten, wie z. B. in der Innenstadt, zu reduzieren und damit zur Steigerung der Lebensqualität beizutragen. All diese Gründe sprechen für eine frühzeitige Einführung von Fahrzeugen mit Elektroantrieben auf deutschen Straßen und führen zu einer großen Anzahl an Forschungsprojekten, die sich mit der Verbesserung aktueller Technologien im Bereich der Elektromobilität beschäftigen.

---

<sup>1</sup> Eberhard Karls Universität Tübingen, koehler@fzi.de

Trotz immenser Fortschritte in den Bereichen der Energiespeichertechnologie, der Elektromotoren und deren Leistungselektronik sowie der Regelungs- und Steuerungstechnik sind die hauptsächlich durch die Batterien verursachten hohen Kosten und die begrenzte Reichweite noch immer eine große Hürde für eine umfangreiche Verbreitung der Elektromobilität. Aktuelle Elektrofahrzeuge im Mittelklasse-Segment, die als Energiespeicher nur eine Batterie besitzen (BEV, engl. Battery Electric Vehicle), haben trotz des sehr hohen Tank-to-Wheel-Wirkungsgrads (TTW) von etwa 70 %, gegenüber typischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV, engl. Internal Combustion Engine Vehicle) mit etwa 15 % [AS03, HY08] eine auf typischerweise 100 km bis 200 km begrenzte Reichweite [Gr11]. Der TTW-Wirkungsgrad beschreibt hierbei das durchschnittliche Verhältnis von an den Rädern genutzter Antriebsenergie zur am Energiespeicher theoretisch physikalisch verfügbaren Energie. Erschwerend kommen hierbei die langen Ladezeiten der Batterien in der Größenordnung von Stunden hinzu, während ein konventionelles Fahrzeug im Gegensatz dazu innerhalb weniger Minuten betankt ist. Zusammen mit den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten führt dies dazu, dass noch immer keine breite Marktdurchdringung erreicht werden konnte, obwohl in den letzten Jahren vermehrt BEV-Modelle aufkommen. Der Grund für die stark begrenzte Reichweite – trotz des hohen TTW-Wirkungsgrads – liegt in der vergleichsweise geringen Energiedichte der Batterien des aktuellen Stands der Technik, welche etwa um den Faktor 50 niedriger ist als die von Benzin oder Diesel [Li11, IK12]. Dies führt zu Batteriepacks mit einem typischen Gewicht von bis zu 500 kg, selbst bei moderaten Reichweitenansprüchen.

Ziel der verfassten Arbeit ist es, insbesondere die aufgezeigte geringe Reichweite der Elektrofahrzeuge zu adressieren. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Reichweite ist wie beim Model S von Tesla der Einsatz größerer Batterien, welcher aus Umwelt- und Kostenaspekten allerdings vermieden werden sollte. Zudem ist eine mechanische Anpassung des Fahrzeugs, wie der Einsatz von Energiesparreifen, Verbesserungen des Windwiderstands und Leichtbauweise zur Reduktion der Fahrzeugmasse möglich. Um die Ansätze generisch zu halten, so dass die Resultate in unterschiedlichen Modellen von Elektrofahrzeugen eingesetzt werden können, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, mechanische Änderungen zu untersuchen. Stattdessen sollen Fahr- und Betriebsstrategien betrachtet werden, die durch Zuhilfenahme aufkommender Technologien wie der Kommunikation mit Infrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern (Car2X), Informationen aus dem Navigationssystem sowie Videokamera und Radarsensoren gespeist werden. Eine Effizienzsteigerung durch diese Strategien ermöglicht damit eine Erhöhung der Reichweite oder – bei gleichbleibender Reichweite – die Verringerung des Total Cost of Ownership. Unterschieds zwischen ICEV und BEV durch die Verwendung kleinerer Batterien [Co14]. Unter Fahrstrategien versteht man hierbei Strategien, welche den Fahrer selbst aktiv involvieren oder eine unmittelbar nachvollziehbare Auswirkung haben. Dies kann unter anderem eine Strategie sein, die einen Abstandsregeltempomat (ACC, engl. Adaptive Cruise Control) nutzt, um vorausfahrenden Fahrzeugen zu folgen. Der Fahrer erlebt die Strategie, die das ACC nutzt, dann unmittelbar anhand der Beschleunigungen bzw. der aus diesen folgenden Geschwindigkeitstrajektorie. Weitere bereits gängige Fahrstrategien umfassen beispielsweise visuelle Schaltempfehlungen bei konventionellen Fahrzeugen, die den Fahrer anleiten möglichst energieeffizient zu fahren. Betriebsstrategien agieren dagegen mehr im Hintergrund und sind deshalb meist transparent für den Fahrer. Sie erfordern keine akti-

ve Reaktion des Fahrers und führen im Idealfall zu keinerlei negativem Einfluss auf das Fahrerlebnis. Beispiele hierfür sind die klimatische Konditionierung der Fahrzeugkomponenten, die Einspritzung bei konventionellen Fahrzeugen oder die Zusammenarbeit von Verbrennungs- und Elektromotor bei einem Hybridfahrzeug.

## 2 Entwickeltes System

Einführend soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass der im weiteren Verlauf des Dokuments verwendete Begriff *Energieverbrauch* aufgrund seiner breiten umgangssprachlichen Durchdringung gewählt wird. Physikalisch korrekt ist jedoch, dass Energie nicht verbraucht, sondern umgewandelt wird. Bei der Umwandlung der Energie in der Wirkkette des Antriebsstrangs über die einzelnen Komponenten wie Inverter, Maschinen, Getriebe etc. bis zur Radnabe wird dabei ein Teil der zur Verfügung gestellten Energie in nicht gewünschte Energie in Form von Wärme oder auch verschleißender Arbeit umgesetzt. Nur ein Teil der dem Antriebsstrang zugeführten Energie wird für die vom Fahrer gewünschte Energiedienstleistung, dem Antrieb des Fahrzeugs, aufgebracht. Mit Energieverbrauch wird in dieser Arbeit also der Einsatz an Energie bezeichnet, die zur Bewältigung einer Strecke aufgewendet wird. Die gewünschte Reichweitenoptimierung wird durch die Minimierung des Energieeinsatzes pro gefahrenen Kilometer definiert.

Anhand der Analyse des Modells eines typischen BEV sowie durch Simulationen wird dessen Energieverbrauch für diverse Szenarien ermittelt, um einen ersten Ausblick auf mögliche Ansätze geben zu können. Die Analyse berücksichtigt hierbei aufgrund einer besseren Repräsentation realer Fahranwendungsfälle gegenüber üblichen Geschwindigkeitsprofilen, wie dem oft gebräuchlichen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), die ARTEMIS-Zyklen, die aus dem europäischen Projekt *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems* [An06] hervorgegangen sind. Es wird hierbei zwischen drei ARTEMIS-Zyklen unterschieden: Urban, Rural und Motorway.

Durch Simulation der Fahrten eines typischen Elektrofahrzeugs können die für den Energieverbrauch relevanten Anteile für die unterschiedlichen Fahrzszenarien analysiert werden. Primär unterteilen sich diese in *Rollreibung*, *Strömungswiderstand*, *Verluste durch Reibbremsen* und *Verluste im Antriebsstrang*. Bei Kurvenfahrten entstehen zudem Verluste aufgrund der Reifenverformung und eines Teils der Seitenführungskraft, der gegen die Fahrtrichtung wirkt. Da von einer mechanischen Anpassung des Fahrzeugs abgesehen wird, ergeben sich insbesondere die nachfolgend aufgezählten Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs:

- Vermeidung des Einsatzes der Reibbremse,
- Vermeidung von (nur kurzzeitig) hohen Geschwindigkeiten,
- Wählen von Arbeitspunkten hoher Energieeffizienz (insbesondere bei überaktuiertem System),
- Wenn möglich: Auskuppeln der elektrischen Maschinen zur Reduktion der Verluste.

Da die Fahr- und Betriebsstrategien insbesondere auf die Antriebsstrangverluste und den Einsatz der Reibbremse wirken, ergeben sich für Fahrten in der Stadt oder auf unübersichtlichen Überlandrouten gute Aussichten bezüglich des Einsparpotenzials. Bei schnelleren Fahrten mit wenigen Verzögerungsvorgängen zeigt sich vergleichsweise wenig Spielraum. Hier ist zur umfangreichen Einsparung von Energie eine Reduktion der Geschwindigkeit notwendig. Bei entsprechender Berücksichtigung der Nebenbedingung Zeit kann dies jedoch ein Freiheitsgrad für die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen werden.

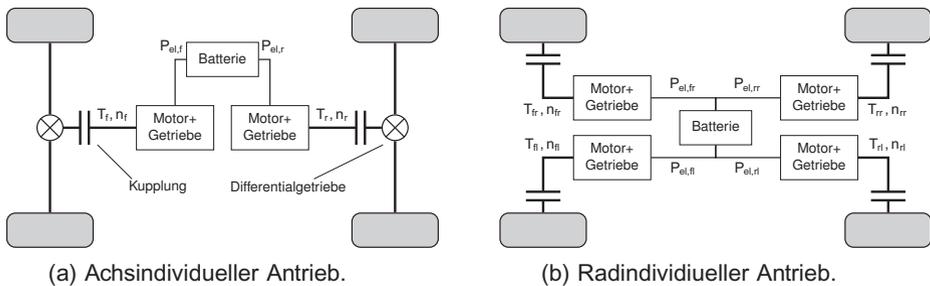


Abb. 1: Betrachtete Antriebsstrangtopologien.

Zur Erschließung weiterer Freiheitsgrade werden in der Forschung bei Elektrofahrzeugen oft achs- und radindividuelle Antriebsstopologien betrachtet. In Abbildung 1 ist auf der linken Seite die Antriebsstrangtopologie mit achsindividuellem Antrieb zu sehen, welche eine energieoptimierte Drehmomentverteilung erlaubt. Auf der rechten Seite ist der radindividuelle Antrieb dargestellt, der neben der Optimierung des Wirkungsgrads der Maschinen zudem eine ein Torque-Vectoring zur Verbesserung der Fahrdynamik bei Kurvenfahrten ermöglicht.

Ein grobes grafisches Konzept zur Aufführung relevanter Ein- und Ausgangsgrößen sowie der funktionalen Blöcke des entwickelten Systems wird in Abbildung 2 als einfaches Blockdiagramm vorgestellt. Als Eingangsgrößen sind dabei insbesondere das Navigationssystem, die Umfeldsensorik mit Radar und Video sowie die Intelligente Infrastruktur zu nennen. Das in der Arbeit realisierte System berücksichtigt hierbei vorerst lediglich gesetzliche Geschwindigkeitsbegrenzungen, die durch Navigationssystem, Intelligente Infrastruktur (variable Geschwindigkeitsbegrenzungen) oder durch die videobasierte Verkehrszeichenerkennung zur Verfügung gestellt werden. Die Optimierung ist dazu auf zeitinvariante Geschwindigkeitsbegrenzungen ausgelegt. Durch eine Erweiterung dieser können jedoch auch die Informationen über Ampelphasen und die Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge miteinbezogen werden. Durch Fusionieren der verfügbaren Informationen (gesetzliche Geschwindigkeitsbegrenzungen und Kurvenkrümmungen) können Geschwindigkeitsbegrenzungen für die vorausliegende Strecke abgeleitet und beeinflussende Nebenbedingungen wie die Straßensteigung berücksichtigt werden. Um die aktuellen Rahmenbedingungen aus Sicht des Arbeitspunkts der Komponenten miteinbeziehen zu können, liefern diverse Fahrzeugsysteme wie die Elektromotoren, Fahrdynamiksensoren und Batterie-Manager zusätzliche Informationen zu ihrem aktuellen Zustand. Schließlich können weitere Informationen wie Umgebungstemperatur, Glättegefahr und grobe

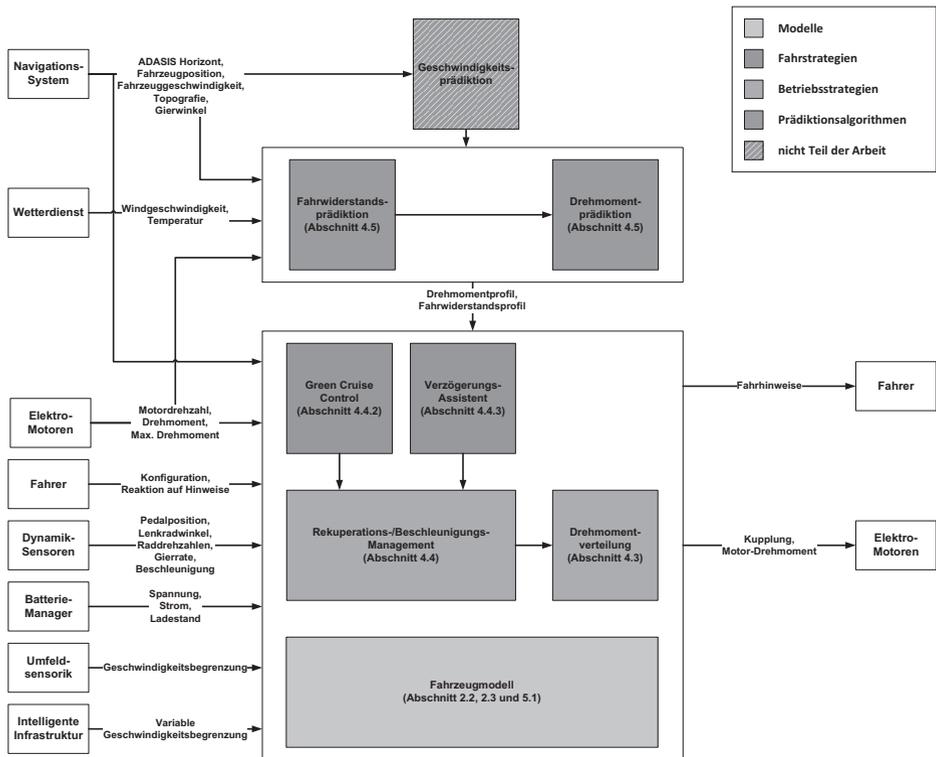


Abb. 2: Skizze des realisierten fahrzeugweiten Energiemanagements.

Abschätzungen des wirkenden Umgebungswinds von Wetterdienstanbietern herangezogen werden. Die Senken des Systems sind der Fahrer und die Elektromotoren samt deren Kupplungen.

Obwohl die Verluste durch die Fahrwiderstände selbst ohne große Zeiteinbußen kaum beeinflussbar sind, bietet eine Optimierung von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen großes Potenzial, um Verluste durch die Reibbremse oder durch Rekuperation bei niedrigem Maschinenwirkungsgrad zu vermeiden. Während aktuelle Systeme wie der Tempomat bei konstanten Geschwindigkeiten oder das ACC bei Regelung auf vorausfahrende Fahrzeuge lediglich den Komfort berücksichtigen, wird die Aufgabe der Längsregelung bei dem vorgeschlagenen *Green Cruise Control* (*GreenCC*) mit dem Fokus auf Energieeffizienz behandelt. Die zuvor vorgestellten Informationen können genutzt werden, um eine energieeffiziente Geschwindigkeitstrajektorie zu planen und im Rahmen eines modellprädiktiven Ansatzes zu stellen. Bei Geschwindigkeitsänderungen wird sowohl beim Verzögerungs- als auch beim Beschleunigungsvorgang darauf geachtet, dass die Elektromotoren in der Nähe eines Arbeitspunkts hohen Wirkungsgrads betrieben werden und dass der Einsatz der Reibbremse wenn möglich vollkommen vermieden wird. Die unterliegende Optimierung berücksichtigt in diesem Fall sowohl die Energieeffizienz als

auch die Reisezeit mit einem vom Nutzer definierten Gewichtungsgang. Die Längsführung wird bei aktiviertem *GreenCC* vollständig vom Fahrzeug übernommen, während die Seitenführung weiterhin durch die Lenkradvorgabe erfolgt. Als Alternative zum *GreenCC* ist ein sogenannter *Verzögerungsassistent* implementiert, der die Längsführung nur bei Verzögerungsvorgängen übernimmt. Zur Realisierung des Systems wurde ein semi-autonomer Ansatz gewählt, bei dem der Fahrer die Fahrzeuggeschwindigkeit zum Großteil der Zeit über das Gaspedal selbst vorgibt. Der Verzögerungsassistent berechnet anhand eines aus den zuvor genannten Informationen erstellten elektronischen Horizonts optimale Verzögerungsvorgänge. Liegt in der Reichweite des elektronischen Horizonts eine Geschwindigkeitsbegrenzung, die geringer ist als die aktuelle Geschwindigkeit, wird eine auf Energieeffizienz optimierte Verzögerungsstrategie berechnet. Zu gegebenem Zeitpunkt wird der Fahrer dann informiert, den Fuß vom Gaspedal zu nehmen. Reagiert der Fahrer, findet ein autonomer Verzögerungsvorgang statt. In diesem Fall gibt der Fahrer durch die frühere oder spätere Akzeptanz des Hinweises selbst die Gewichtung zwischen Zeit- und Energieeffizienz vor. Beide implementierten Fahrstrategien geben eine gewünschte Geschwindigkeitstrajektorie vor, die durch das von den Elektromotoren gestellte Drehmoment erzeugt wird.

Bei mehr als einem Antriebsselement kann das dabei geforderte Drehmoment beim Beschleunigen, beim Aufrechterhalten der Geschwindigkeit oder beim Bremsen durch die regenerative Bremse in unterschiedlichem Verhältnis auf diese verteilt werden. Ziel der *Drehmomentverteilung* ist es, dies so zu gestalten, dass sich alle Antriebsselemente in Arbeitspunkten befinden, die zu einem optimalen Gesamtwirkungsgrad des Systems führen. Sind mehr als zwei Motoren vorhanden, kann durch ein *Torque-Vectoring* sowohl die Fahrdynamik verbessert werden, als auch – bei größeren Querbeschleunigungen – die Energieverluste durch den Seitenschlupf reduziert werden. Das *Beschleunigungs- und Reuperationsmanagement* ist eine zwischen die Strecken Fahrer-Drehmomentverteilung, *GreenCC*-Drehmomentverteilung und *Verzögerungsassistent*-Drehmomentverteilung geschaltete Funktion, die den aktuellen Zustand der Maschinen und der Fahrzeugbatterie überwacht. Entsprechende Informationen, wie aktuelle temperaturabhängige Effizienz der Komponenten, werden dann an die vorgeschalteten Systeme geliefert, um die Optimierung anzupassen. Sind die Funktionen *GreenCC* und *Verzögerungsassistent* inaktiv, kann dem Fahrer mit dessen Hilfe zudem der entsprechende Hinweis (weniger stark Beschleunigen/Bremsen) über das Armaturenbrett oder direkt über eine aktive Pedalerie mitgeteilt werden.

### 3 Ergebnisse

Um die im Rahmen der Arbeit entwickelten Systeme zu bewerten sind neben umfangreichen Simulationen und Fahrten auf abgesperrten Testgeländen<sup>3</sup> mehr als 600 Testkilometer auf öffentlichen Straßen unter realen Verkehrsbedingungen absolviert worden, deren Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden.

---

<sup>3</sup> Aus Umfangsgründen sei hierzu auf die Dissertation [Kö16] verwiesen.

Zur Analyse der Drehmomentverteilung und dem Vergleich mit einer naiven 50:50-Drehmomentverteilung wurde der Versuchsträger auf einer 50km langen Strecke vom Forschungszentrum Informatik Karlsruhe über die Autobahn A5 via Gernsbach nach Bad Herrenalb gefahren. Die gewählte Route hat eine Länge von ca. 50km und besteht zu etwa 38 % aus Autobahnfahrt, zu 40 % aus Überlandfahrt sowie zu 22 % aus Stadtdurchfahrten. Insgesamt wurde die Strecke jeweils dreimal mit der optimierten Drehmomentverteilung und dreimal mit der 50:50-Verteilung gefahren, so dass Messdaten für etwa 300km gesammelt werden konnten.

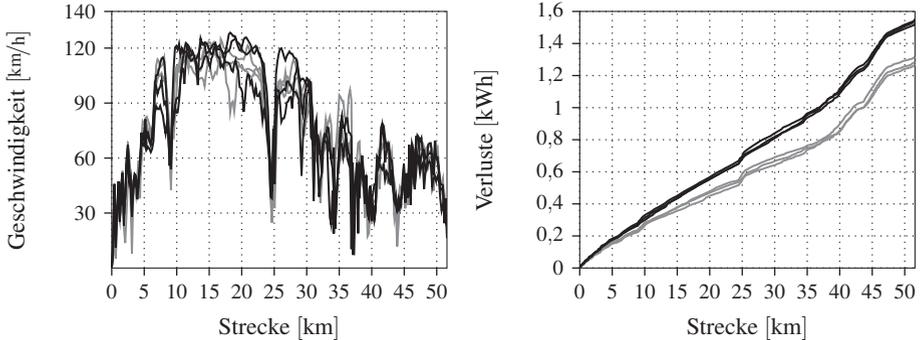


Abb. 3: Geschwindigkeitstrajektorien sowie kumulative Verluste in Maschine und Inverter für die Fahrten mit optimierter (rot) und 50:50 (schwarz) Drehmomentverteilung.

Abbildung 3 zeigt die Geschwindigkeitstrajektorie der Fahrten und die dabei gemessenen Verluste durch Maschine und Inverter. Es ist zu erkennen, dass die Verluste durch Maschine und Inverter bei den drei Fahrten mit der optimierten Drehmomentverteilung um 16,2 % gegenüber den Fahrten mit der 50:50-Drehmomentverteilung reduziert werden konnten. Die Gesamtenergieaufnahme des Antriebsstrangs konnte von 11,63 kWh auf 11,19 kWh reduziert werden, was für die befahrene Strecke einer Reichweitensteigerung um ca. 3,8 % entspricht. Neben der Geschwindigkeitstrajektorie, die für die sechs Fahrten vergleichbar ausfällt, können noch weitere Umgebungsfaktoren Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Einer dieser Faktoren ist der Umgebungswind, der sich auf der offenen Autobahnstrecke deutlich auf den Energieverbrauch auswirken kann. Um einen neutraleren Vergleich für die durchgeführten Fahrten zu erhalten, soll deshalb der Antriebsstrangwirkungsgrad betrachtet werden. Da hierbei direkt das Verhältnis der aufgebrauchten mechanischen Leistung zur aus der Batterie entnommenen elektrischen Leistung betrachtet wird, ist das Ergebnis repräsentativer als eine reine Betrachtung des Energieverbrauchs. Anhand der Testfahrten kann man eine mittlere Steigerung der Antriebsstrangeffizienz um 1,7 pp erkennen. Betrachtet man ausschließlich jene Abschnitte der Strecke, welche der Autobahn- und Überlandfahrt entsprechen, wird eine Verbesserung der Effizienz um bis zu 3,2 pp erzielt. Eine Teilstrecke der Überlandfahrt, in der eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h vorliegt, zeigt im Mittel sogar 5,4 pp Effizienzsteigerung. Die Messungen bestätigen damit die Simulationen der Geschwindigkeitszyklen, die im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurden. Neben diesen quantitativen Bewertungen der Testfahrt kann zudem qualitativ eine angenehme Fahrt festgestellt werden. Bei Abschnitten hoher Steigungen oder bei Überholvorgängen wird die zweite Maschine sinnvoll eingekuppelt,

womit bei gegebener Anforderung die volle Leistung bereitgestellt werden kann. Bei konstanten Fahrten mit geringer Steigung wird dagegen nur eine Maschine verwendet, so dass sich das Fahrzeug in einem energieeffizienten Betrieb befindet.

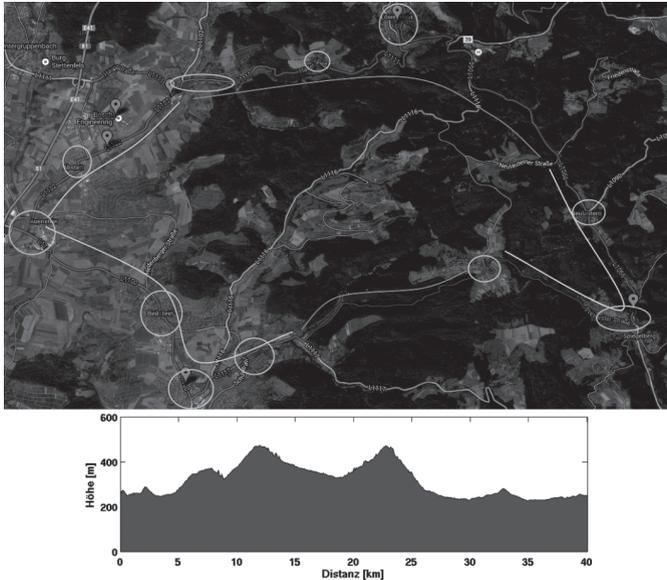


Abb. 4: Route und Höhenprofil für die Teststrecke nahe Abstatt [Im15, GG15].

Um auch die die Funktion des Verzögerungsassistenten in Kombination mit der optimierten Drehmomentverteilung zu validieren, wurden weitere Testfahrten auf der öffentlichen Straße durchgeführt. Der genutzte Versuchsträger ist mit einem parallelen RBS ausgestattet, was bei einem manuellen Bremsvorgang immer zu einem Einsatz der Reibbremse führt. Als Teststrecke wurde eine 42km lange Rundfahrt mit Start- und Endpunkt beim Versuchsträgerstandort auf dem Gelände der Robert Bosch GmbH in Abstatt ausgewählt. Die gewählte Strecke und ihr Höhenprofil sind in Abbildung 4 visualisiert. In der Grafik ist zusätzlich farblich annotiert, um welche grobe Klassifizierung es sich bei dem jeweiligen Streckenabschnitt handelt. In Gelb sind dabei höherwertige Landstraßen markiert, bei denen Steigung und Straßenkrümmung gemäßigt sind. Rot markierte Abschnitte zeigen weniger hochwertige Straßen, in denen die Höhenunterschiede größer sind und Kurvenabschnitte existieren, in denen der Fahrer mit Geschwindigkeiten deutlich unterhalb der legalen Geschwindigkeitsbegrenzungen fahren sollte. Insgesamt ist die Anzahl der Streckenkilometer des jeweiligen Straßentyps in etwa gleich verteilt. Die elf grün markierten Ortsdurchfahrten fügen ein weiteres typisches Szenario in die Teststrecke ein.

Insgesamt wurde die Strecke sieben Mal gefahren, was zu einer Bewältigung von knapp 300 Testkilometern führt. Zur Validierung des Systemverhaltens ist der Versuchsträger einmal von einem typischen, sportlichen Fahrer ohne Unterstützung des Systems und ohne spezifische Vorgabe gefahren worden. Ein weiteres Mal absolvierte der Fahrer die Strecke ohne Unterstützung des Systems, nun jedoch mit der Vorgabe möglichst energiesparend zu agieren (B). Mit aktiviertem Fahrerassistenzsystem wurde die Strecke von unterschied-

lichen Fahrern zwei Mal unter der Vorgabe die Hinweise des Systems nach eigenem Belieben zu akzeptieren, durchfahren (C). Bei drei weiteren Fahrten wurden die Hinweise des Systems frühestmöglich durch den Fahrer akzeptiert (D).

In Abbildung 5 werden die erzielten Zeitmehrkosten und die Reichweitensteigerung – für (C) und (D) jeweils gemittelt – relativ zum Fahrer ohne Vorgabe dargestellt. Für (D) ist neben einer deutlichen Einsparung an Energie zusätzlich eine deutliche Verlängerung der Fahrtzeit zu verzeichnen. Auch wenn die Energieeinsparung von etwa 37 % beinahe doppelt so groß ist wie die Verlängerung der Fahrtzeit von etwas mehr als 20 %, haben alle drei Fahrer angegeben, dass sie die Fahrt als ungewohnt empfunden haben. Vor allem die Ausrollphasen bei Gefällen oder bei nachfolgendem Fahrzeug wurden dabei als zu lang empfunden. Haben die Fahrer in (C) die Hinweise nach eigenem Belieben akzeptiert und damit Kombinationen von Ausrollphasen und einer Rekuperation mit maximaler Energieeffizienz erzeugt, wurde die Fahrt als angenehmer empfunden. Bei einer verlängerten Fahrtdauer von 8 % ergibt sich dann eine um 26 % gesteigerte Reichweite im Vergleich zum sportlichen Fahrer. Auch der Fahrer, der ohne Unterstützung des Verzögerungsassistenten vorausschauend fährt, erzielt eine deutliche Verringerung des Energieverbrauchs. Es zeigt sich jedoch, dass er trotz einer längeren Fahrtzeit von 9 % weniger Energie einspart als bei Unterstützung durch die Kombination von Drehmomentverteilung und Verzögerungsassistent. Da der Fahrer ohne Unterstützung des Verzögerungsassistenten bei einer Fahrt mit idealem, seriellen RBS einen geringeren Einsatz der Reibbremse erreichen würde, werden für ein Fahrzeug mit diesem System etwa 5 pp schlechtere Ergebnisse als aufgelistet erwartet.

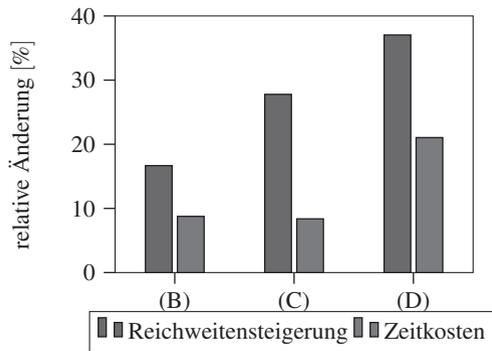


Abb. 5: Erzielte Reichweitensteigerung und Erhöhung der Reisedauer relativ zu Fahrer (A).

## 4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird der Reichweitengewinn bei Einsatz der vorgeschlagen Strategien durch mehrere Faktoren erzeugt: Außer in Ausnahmefällen muss der Fahrer nicht über das Bremspedal bremsen und die Nutzung der Reibbremse wird vermieden. Weiterhin können durch die bessere Vorausschau mittels Streckendaten effizientere Geschwindigkeitsprofile berechnet und umgesetzt werden, als sie der Fahrer durch eigene Intuition fahren würde. Schließlich nutzt die Drehmomentverteilung die Kenntnisse der Charakteristik des Antriebsstrangs, um die Motoren stets in einem situationsabhängigen, optimierten Arbeitspunkt zu betreiben.

## Literaturverzeichnis

- [An06] André, Michel; Joumard, Robert; Vidon, Robert; Tassel, Patrick; Perret, Pascal: Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmospheric Environment*, 40(31):5944 – 5953, 2006.
- [AS03] An, F.; Santini, D.: Accessing Tank-to-Wheel Efficiencies of Advanced Technology Vehicles. In: *SAE 2003 World Congress & Exhibition*. mar. 2003.
- [Co10] Council, National Research: *Advancing the Science of Climate Change*. The National Academies Press, Washington, DC, 2010.
- [Co14] Company, McKinsey & : A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2014. aufgerufen: 09.12.2014.
- [Ed14] Edenhofer, O. et al.: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, 2014.
- [Eur14a] 2030 framework for climate and energy policies, 2014. aufgerufen: 17.10.2014.
- [Eur14b] Reducing CO2 emissions from passenger cars, 2014. aufgerufen: 17.10.2014.
- [GG15] Geocontext-GIS: , Geocontext Höhenprofil, 2015. aufgerufen: 02.01.2015.
- [Gr11] Grünig, M.; Witte, M.; Marcellino, D.; Selig, J.; van Essen, H.: , An overview of Electric Vehicles on the market and in development (Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 1), 2011. aufgerufen: 09.12.2014.
- [HY08] Handa, K.; Yoshida, H.: Development of Next-Generation Electric Vehicle - Mitsubishi's i-Mi EV. *ATZ* 10/2008, 2008.
- [IK12] Inderwildi, O.; King, D.: *Energy, Transport, & the Environment: Addressing the Sustainable Mobility Paradigm*. Springer, 2012.
- [Im15] Imagery 2015 AeroWest, DigitalGlobe, GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Landsat, Map data 2015 GeoBasis-DE/BKG (2009), Google: , Google Maps, 2015. aufgerufen: 02.01.2015.
- [Kö16] Köhler, Stefan: *Reichweitenoptimierende Fahr- und Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge*. Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2016.
- [Li11] Liu, Ru-Shi; Zhang, Lei; Sun, Xueliang; Liu, Hansan; Zhang, JiuJun: *Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.
- [So07] Solomon, S. et al.: , *Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*. aufgerufen: 09.12.2014.



**Stefan Köhler** ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie. Von der Hochschule Technik und Wirtschaft in Karlsruhe erhielt er 2008 den Abschluss als B.Eng. im Fach Mechatronik und 2011 den Abschluss M.Eng. im Fach Elektrotechnik. Im Rahmen des EAES Promotionskollegs promovierte er am Mai 2016 an der Eberhard Karls Universität Tübingen.