



regional
eco
mobility
2030

Urbane Mobilität der Zukunft

Symposium des Innovationsclusters
REM 2030 am 17./18. Juni 2015 in Karlsruhe

Tagungsband

Martin Wietschel, Simon Funke (Hrsg.)
Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung

Urbane Mobilität der Zukunft

Symposium des Innovationsclusters REM 2030 am 17./18. Juni 2015 in Karlsruhe

Tagungsband*

Projektförderung REM 2030

Fraunhofer-Gesellschaft, Landesministerien von Baden-Württemberg,
Industrieunternehmen

Projektkonsortium REM 2030

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
GreenIng GmbH & Co. KG
KIT, Institut für Fahrzeugsystemtechnik FAST
KIT, Institut für Produktentwicklung IPEK

Ansprechpartner

Prof. Martin Wietschel, Simon Funke
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48 | 76139 Karlsruhe
Telefon 0721/6809-0

Bibliografische Information:
urn:nbn:de:0011-n-3451833

Verfügbar in der Datenbank Fraunhofer-Publica unter:
<http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-345183.html>

* in einem separaten Anhangband sind die Posterbeiträge veröffentlicht

Karlsruhe 2015

Vorwort

Der Klimaschutz und knappe Ressourcen erfordern neue Lösungen für die Mobilität. Der Verkehrssektor produziert ca. 20 Prozent der CO₂-Emissionen in Deutschland, wovon knapp 60 Prozent auf den motorisierten Individualverkehr entfallen. Elektrische Antriebe bieten die Chance, mit dem Einsatz von Energie aus erneuerbaren Quellen zum Erreichen der Klimaschutzziele im Verkehrssektor beizutragen. Aber nicht nur aus Sicht des Umweltschutzes, auch aus gesellschaftlicher Sicht ergeben sich neue Herausforderungen für die Gestaltung des Verkehrs: So müssen neue Mobilitätstechniken und -konzepte veränderten gesellschaftlichen Bedingungen, wie dem demographischen Wandel, der Urbanisierung und dem Wertewandel hin zu mehr Nachhaltigkeit, gerecht werden.

Neben Innovationen in der Antriebstechnologie ermöglichen besonders Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) eine neue Form der Mobilität. Damit wird es notwendig, Mobilität als Gesamtzusammenhang von Fahrzeugen, technischen Infrastrukturen, organisatorischen Konzepten und intermodalen Verkehrsansätzen zu begreifen und zu konzipieren. Enorm an Bedeutung gewinnen neue, durch Inter- und Multi-Modalität sowie Sharing-Formen geprägte Mobilitätskonzepte, speziell für Großstädte und Ballungsräume.

Vor diesem Hintergrund arbeiten im Fraunhofer Innovationscluster REM 2030 die Fraunhofer-Institute ISI, ICT, IWM und IOSB sowie die Institute ETI, FAST und IPEK des Karlsruher Instituts für Technologie KIT mit renommierten Industrieunternehmen eng zusammen. Ein systemischer Ansatz, der die Themen Fahrzeug, Infrastruktur und Wertschöpfungsketten verbindet, ist hierbei von zentraler Bedeutung. Um diese Projektergebnisse darzustellen und zu diskutieren, veranstaltete das Innovationscluster REM 2030 das Symposium »Urbane Mobilität der Zukunft« am 17. und 18. Juni 2015 in Karlsruhe.

Dieser Tagungsband enthält die Beiträge des Symposiums. Die Tagungsbeiträge werden in zwei Kapitel untergliedert:

- Rahmenbedingungen im Bereich der Elektromobilität
- Technische Entwicklungen im elektrischen Antriebsstrang

Die Beiträge zu dem Thema Rahmenbedingungen befassen sich mit neuen Mobilitätskonzepten, geeigneten Nutzungsszenarien sowie der Akzeptanz von Elektromobilität. Die Tagungsbeiträge zu technischen Entwicklungen im Zusammenhang mit Elektromobilität untersuchen die technische Umsetzung neuer Fahrzeugkonzepte sowie die Entwicklung von Getrieben und die Integration in das Gesamtsystem. Im separaten Anhang dieses Tagungsbandes sind Posterbeiträge enthalten, welche auf dem Symposium präsentiert wurden.

Wir bedanken uns herzlich bei allen Autorinnen und Autoren, die mit ihrer Forschung zur Erstellung dieses Tagungsbandes beigetragen haben.

Martin Wietschel
Simon Funke

Juli 2015

Tagungsbeiträge

Rahmenbedingungen im Bereich der Elektromobilität

- Wirkungen zukünftiger Mobilität: mobiTopp – Simulationswerkzeug zur Integration von Carsharing und Elektromobilität in die Mobilitätslandschaft 3
M. Kagerbauer, M. Heilig, N. Mallig, P. Vortisch
- Eine empirisch validierte Systematik und Datenbank zur Beschreibung und Entwicklung von Elektromobilitätsdienstleistungen 13
R. Luzsa, S. Schmitt-Rüth
- Potentiale der E-Mobilität in Eco-Gewerbeparks: Der eCar-Park Sindelfingen 23
M. Schmid, W. Rid
- „Und wenn das Auto elektrisch wäre?“ Zur prägenden Wirkung von Mobilitätsleitbildern bei Familien 31
U. Schneider
- Nachhaltige Mobilitätskonzepte – Bausteine für eine Wende..... 41
M.-C. Tran, E. Frensemeier, J. Garde, S. Hellali-Milani, J. A. Schmidt

Technische Entwicklungen im elektrischen Antriebsstrang

- Schaltbare Getriebe für Elektrofahrzeuge am Beispiel urbaner Nutzungsszenarien 53
A. Albers, K. Bause, S. Klingler, R. Puls, M. Behrendt
- Virtuelle Gesamtsystemoptimierung von E-Bussen im urbanen Verkehr mittels gekoppelter Simulation..... 61
K. Berthold, P. Gratzfeld
- Gesamtsystemintegration eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Brennstoffzellen Range Extender 69
A. Simsek, L. F. Berg, H.-P. Kollmeier
- Velocité – Die (R-)Evolution des E-Bikes 83
H. Wittig, S. Thanner, E. Dressler, F. Bussinger

Rahmenbedingungen im Bereich der Elektromobilität





regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Wirkungen zukünftiger Mobilität: mobiTopp – Simulationswerkzeug zur Integration von Carsharing und Elektromobilität in die Mobilitätslandschaft

Martin Kagerbauer, Michael Heilig, Nicolai Mallig und Peter Vortisch¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany, E-Mail: martin.kagerbauer@kit.edu

Keywords: Nachfragemodellierung, mobiTopp, Carsharing, Elektromobilität, Verkehrsplanung

Einleitung

Die Verkehrsnachfrage vor allem in industrialisierten Ländern wird zunehmend heterogener. In Deutschland stellen wir in verschiedenen Erhebungen zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung (z. B. Deutsches Mobilitätspanel (MOP)) fest, dass die individuelle Verkehrsleistung im Wesentlichen stagniert und bei ca. 40 Kilometern pro Person und Tag liegt (vgl. Abb. 1) (1). Dennoch sind Veränderungen im Längsschnitt in einzelnen Bereichen festzustellen (2). Während die jungen Erwachsenen bei unveränderter mittlerer Verkehrsleistung im Vergleich zu vor zehn bis 15 Jahren heute signifikant weniger mit dem Pkw unterwegs sind und dafür mehr mit dem öffentlichen Verkehr, steigt die Pkw-Verkehrsleistung der Senioren (vgl. Abb. 2).

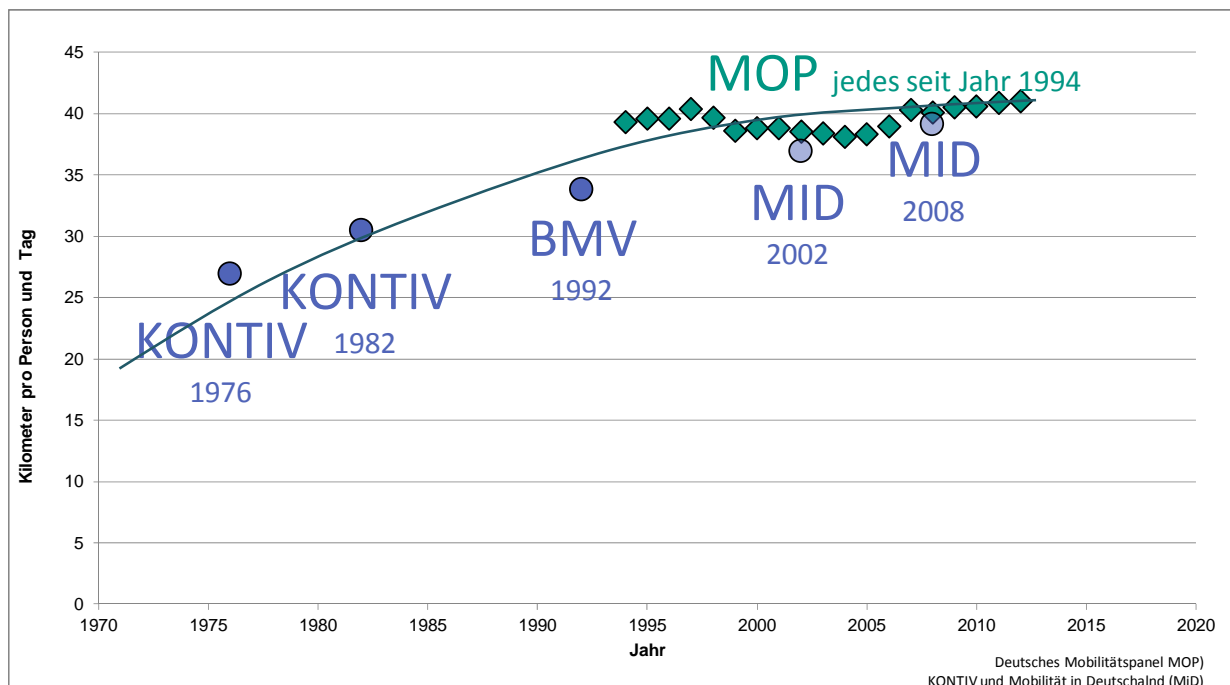


Abb. 1: Veränderungen der Verkehrsnachfrage insgesamt

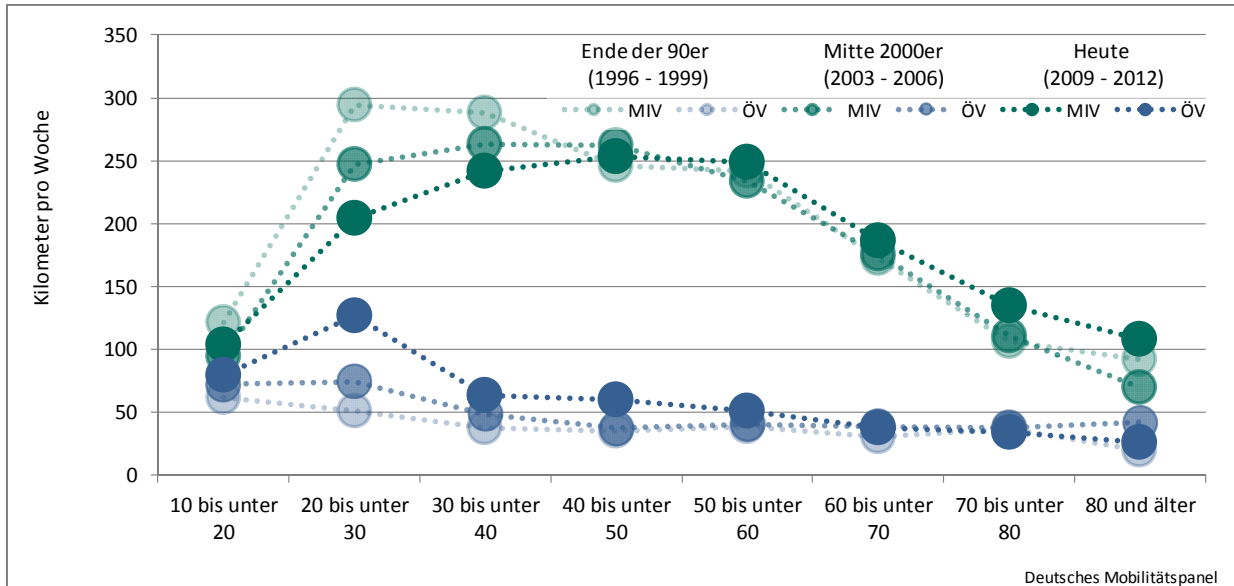


Abb. 2: Veränderungen der Verkehrsnachfrage in den verschiedenen Altersgruppen

Zudem sind auch Tendenzen hin zu mehr multimodaler und intermodaler Verkehrsnachfrage festzustellen. Multimodalität bedeutet, dass die Verkehrsteilnehmer auf unterschiedlichen Wegen im Verlauf eines Zeitraums (z. B. einer Woche) mehrere verschiedene Verkehrsmittel (z. B. Pkw, öffentlicher Verkehr oder Fahrrad) nutzen. Intermodalität bedeutet, dass innerhalb eines Weges, also vom Übergang von einer Aktivität in die Nächste, mehrere Verkehrsmittel genutzt werden – sprich die Kombination von Verkehrsmitteln (z. B. Fahrrad mit ÖV). Eine Zunahme der Multimodalität ist in allen Altersklassen zu sehen (vgl. Abb. 3).

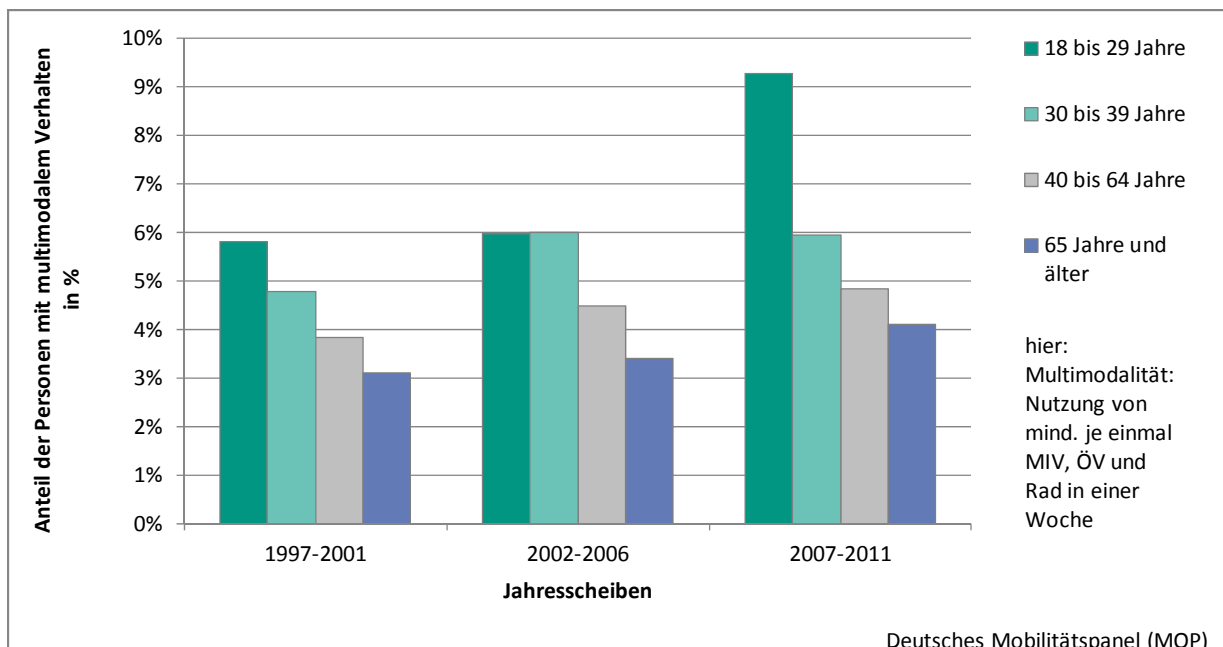


Abb. 3: Veränderungen der Multimodalität

Unterstützt wird die steigende Multimodalität durch zunehmend variabler werdende Angebote, wie zum Beispiel Carsharing. Die Kunden- und Nutzungszahlen von Carsharing weisen in den letzten Jahren enorme Zuwächse aus, wie in Abb. 4 zu sehen ist.

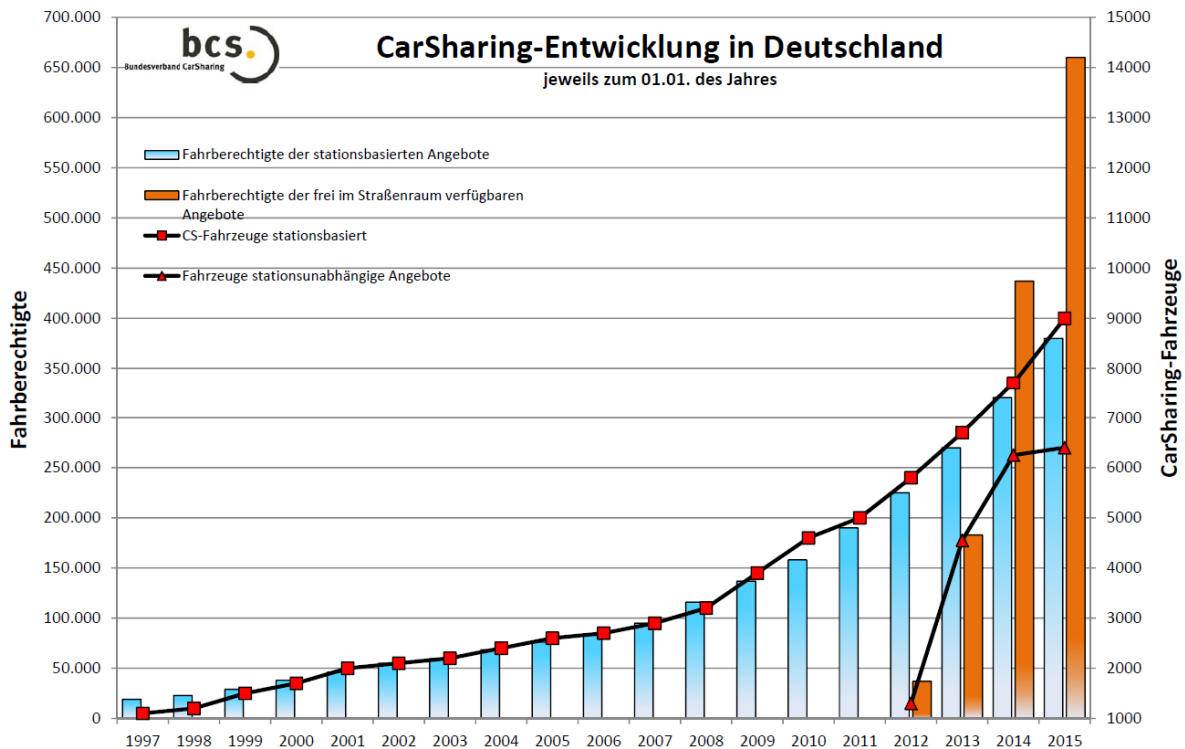


Abb. 4: Anzahl Carsharing-Kunden – Quelle Bundesverband Carsharing

Neben den klassischen stationsbasierten Carsharing-Anbietern, bei denen die Fahrzeuge an vordefinierten Stationen ausgeliehen und wieder zurückgegeben werden müssen, sind in den letzten Jahren auch sogenannte free-floating-Carsharing-Systeme, meist getrieben von Automobilherstellern, in den Markt gekommen. Bei den free-floating-Systemen können die Fahrzeuge je nach Verfügbarkeit in einem vordefinierten Gebiet entliehen und an beliebiger Stelle in demselben Gebiet wieder zurückgegeben werden.

Zudem befinden sich zunehmend elektrisch betriebene Fahrzeuge im Markt, die auf Grund der Reichweitenrestriktionen andere Nutzungsmuster als konventionelle Fahrzeuge aufweisen. Mit diesen veränderten Rahmenbedingungen hinsichtlich Carsharing und Elektromobilität, die sich in Zukunft, so wird prognostiziert, noch verstärken werden, werden die Verkehrsangebote sowie die daraus abzuleitende Verkehrsnachfrage noch variabler. Um das Gesamtverkehrssystem darauf vorzubereiten und die Infrastruktur dementsprechend auslegen zu können, ist es notwendig frühzeitig die Planungstools zu ertüchtigen, um geeignete Planungsgrundlagen zu erhalten.

Agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell mobiTopp

Verkehrsnachfragemodelle dienen grundsätzlich zur Abschätzung der künftigen Verkehrsnachfrage unter der Berücksichtigung veränderter Rahmenbedingungen wie beispielsweise Infrastrukturneu- und -umbau, Veränderungen im Mobilitätsverhalten oder

Implementierung neuer Verkehrssysteme oder -dienstleistungen. Durch die oben beschriebene zunehmende Verbreitung und Nutzung von Sharing-Systemen und die Diversität des Verkehrsmittelnutzungsverhaltens werden die Anforderungen an die Simulationstools höher. Zukunftsorientierte Simulationstools sollen sowohl inter- und multimodales Verkehrsverhalten als auch Elektromobilität abbilden. Im Projekt „eVerkehrsraum Stuttgart“ im Rahmen des Schaufensters livinglabBW^e mobil wird das mikroskopische agentenbasierte Verkehrsnachfragemodell mobiTopp erweitert, indem neben den „klassischen“ Verkehrsmodi auch Carsharing-Systeme (3) und Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden. Somit ist es möglich, Verkehrsverhalten unter Berücksichtigung dieser neuen Mobilitätsformen abzubilden und deren Auswirkungen je nach Ausstattungsgrad zu evaluieren.

mobiTopp (4) bildet alle Aktivitäten und Wege aller Einwohner eines Planungsraums mit ihrem Haushaltskontext über den Zeitraum einer Woche ab. Bei der Initialisierung werden jedem Straßenzug Haushalte und die darin lebenden Personen zugewiesen. Zur Initialisierung der Personen und Haushalte werden diverse Modelle (z. B.: Carsharing-Mitgliedschaft, ÖV-Zeitkartenbesitz, Besitzmodelle für Elektrofahrzeuge) eingesetzt. Als Ergebnis dieses Schrittes liegen sogenannte Agenten als Repräsentanten der Personen mit ihren soziodemografischen Eigenschaften (z. B. Alter, Geschlecht oder Erwerbsstatus) und denen des dazugehörigen Haushalts (z. B. Haushaltsgröße oder Pkw-Besitz) mit den Wohnstandorten und, falls vorhanden, Arbeits- bzw. Ausbildungsplätzen vor.

Auf Basis der Aktivitätenketten der Personen, der jeweils verfügbaren Verkehrsmittel und jeweiligen Mobilitätswerkzeuge der Personen (Führerschein, Carsharing-Mitgliedschaft, Verfügbarkeit der Sharing-Fahrzeuge oder ÖV-Zeitkarte) werden sämtliche Wege mit den gewählten Verkehrsmitteln, Anfangs- und Endzeiten sowie den Wegezwecke mit Dauern der Aktivitäten modelliert. Im Projekt „eVerkehrsraum Stuttgart“ wurde neben den Verkehrsmitteln Fuß, Rad, Pkw als Fahrer bzw. Mitfahrer und öffentlicher Verkehr auch Carsharing (stationsgebunden und free-floating) als weiteres Verkehrsmittel in mobiTopp implementiert (3). Darüber hinaus werden im Modell Pkw detailliert mit verschiedenen Antriebsformen (konventionell, elektrisch, hybrid oder Range Extender) und mit deren Tankfüllstand bzw. Batterieladestand modelliert (5). Je nach Verfügbarkeit bzw. Pkw-Besitz werden diese in der Ziel- bzw. Verkehrsmittelwahl der Personen berücksichtigt. Die Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodellierung werden mit Gravitations- und Logitmodellen beschrieben, die im Wesentlichen für jede Entscheidung, sei es Ziel- oder Verkehrsmittelwahl, einen Nutzen und eine Eintretenswahrscheinlichkeit modelliert. Die endgültige Wahl der Entscheidung wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Ergebnis der Modellierung ist eine Datei mit allen Aktivitäten und Wegen aller Einwohner eines Planungsraums (im Falle der Region Stuttgart: 2,3 Mio. Einwohner) – also ein Datensatz im Umfang einer Vollerhebung über eine gesamte Woche. Die Wege beinhalten den Start und das Ziel des Weges, mit dem gewählten Verkehrsmittel die Dauer und Entfernung und im Falle eines Weges mit dem Pkw oder Carsharing, die Eigenschaften des Pkw.

Mit dieser Software ist es möglich, Auswirkungen von Infrastruktur-, Mobilitätsverhaltensänderungen und anderen Rahmenbedingungen abzubilden. Somit fließen zum einen moderne Mobilitätskonzepte wie Carsharing in die Modellierung ein, zum anderen wird

das Mobilitätsverhalten unter Berücksichtigung der Elektromobilität mit all seinen Eigenschaften (z. B. Reichweitenrestriktionen, verändertes Ziel- oder Verkehrsmittelwahlverhalten) abgebildet.

mobiTopp ermöglicht es, für die Region Stuttgart die aktuelle Verkehrsnachfragesituation inklusive Carsharing und der Vielzahl der Elektrofahrzeuge, die nicht zuletzt auf Grund der zahlreichen Projekte im Schaufenster „livinglabBW^emobil“ unterwegs sind, abzubilden.

Ergebnisse in der Region Stuttgart

Im Projekt eVerkehrsraum Stuttgart, das bis Ende des Jahres 2015 läuft, wird neben der Abbildung der Ist-Situation ein Zukunftsszenario entwickelt, das die Auswirkungen der Verbreitung von Elektromobilität und Carsharing auf das Mobilitätsverhalten sowie auf Belastungen und Mobilität beschreibt.

Für die Ist-Situation wurde bereits Carsharing als neues Verkehrsmittel integriert. Zum einen wurde ein Carsharing-Kunden-Modell entwickelt, zum anderen das bestehende Verkehrsmittelwahlmodell um die Verkehrsmittel „stationsbasiertes Carsharing“ und „free-floating Carsharing“ erweitert.

Für die Modellierung von Carsharing in mobiTopp ist es elementar zu bestimmen, welche Agenten Kunden der verschiedenen Carsharing-Anbieter sind. Carsharing-Kunden müssen mindestens 18 Jahre alt sein und einen Führerschein besitzen. Es wurde ein binärer Logit-Ansatz mit verschiedenen sozio-demografischen Variablen genutzt, um die Kunden zu bestimmen. Aufgrund der Unterschiede in der Sozio-Demografie der Kunden der einzelnen Carsharing-Anbieter wurde für jeden Anbieter ein eigenes Modell geschätzt und kalibriert.

Die Daten für diese Schätzung stammen aus verschiedenen Quellen. Da in der Haushaltserhebung der Region Stuttgart keine Informationen über Carsharing-Kunden enthalten sind, wurde für die Schätzung der Modelle die Haushaltserhebung der Stadt Karlsruhe genutzt. Um die Bevölkerungsstruktur der Region Stuttgart hierbei zu berücksichtigen, wurden die Daten der Erhebung der Stadt Karlsruhe nach Geschlecht, Alter Haushaltsgröße und Pkw-Besitz gewichtet.

Als Einflussvariablen gehen Geschlecht, Zeitkartenbesitz, Beruf, Anzahl Pkw im Haushalt, Haushaltsgröße, Alter und die Dichte von Carsharing-Fahrzeugen am Wohnort in das Modell ein. Anschließend wurde das Modell mit der realen Sozio-Demografie der Kunden der verschiedenen Anbieter kalibriert. Beispielhafte Ergebnisse für den Anbieter stadtmobil Stuttgart sind den Abb. 5 bis Abb. 7 zu entnehmen.

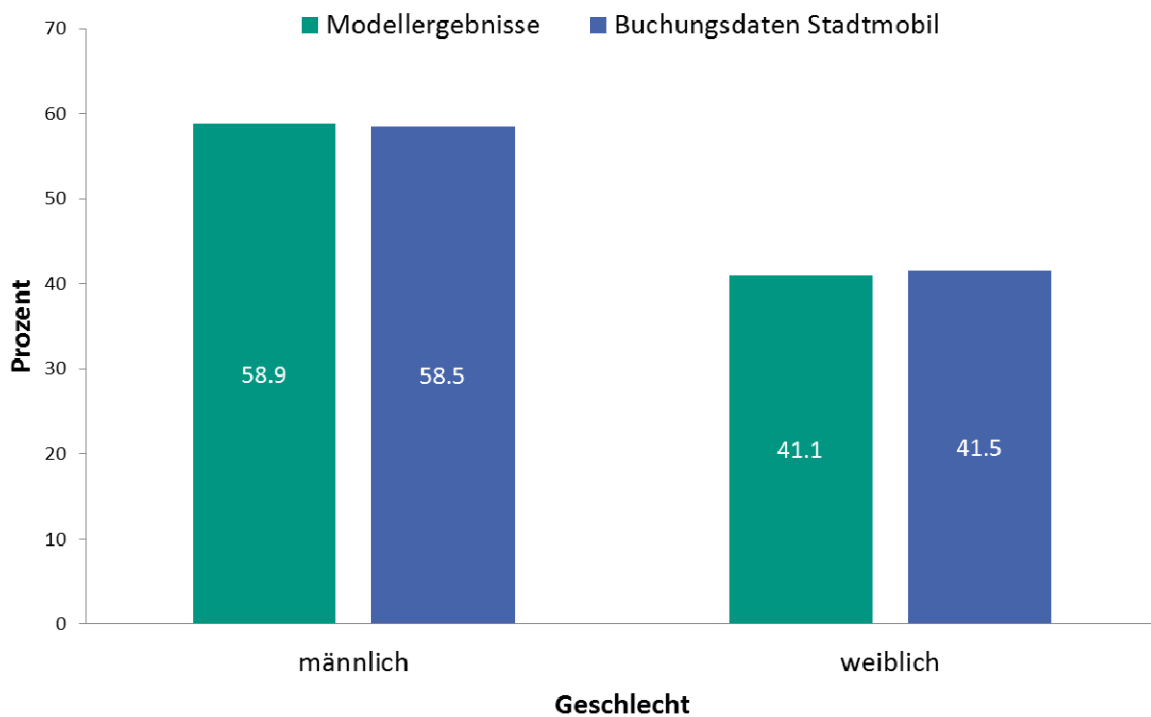


Abb. 5: Verteilung der Carsharing-Kunden im Modell und in Realität nach Geschlecht

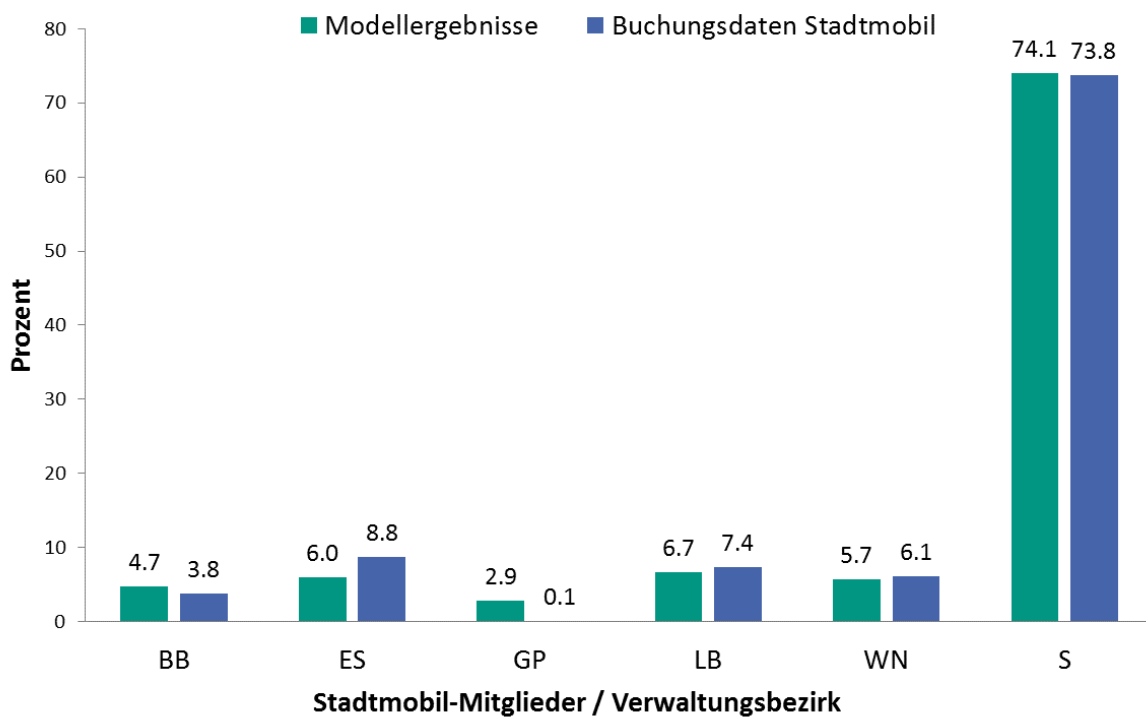


Abb. 6: Verteilung der Carsharing-Kunden im Modell und in Realität nach Verwaltungsbezirk

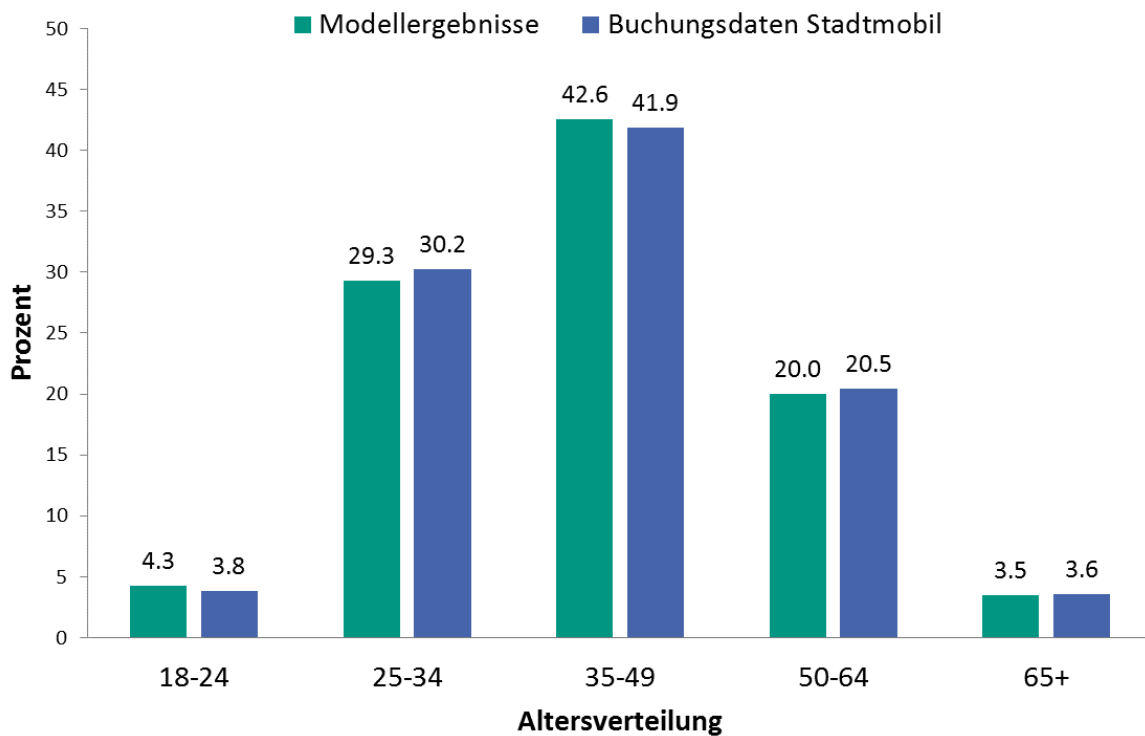


Abb. 7: Verteilung der Carsharing-Kunden im Modell und in Realität nach Alter

Im Zuge der Erweiterung des bestehenden Verkehrsmittelwahlmodells wurden sechs Annahmen gemacht, um die verschiedenen Carsharing-Systeme im Modell abbilden zu können:

1. Die Verkehrsmittel Carsharing sind nur verfügbar, wenn ein Zugang zum entsprechenden Carsharing-Provider vorhanden ist.
2. Carsharing ist nur verfügbar, wenn kein eigenes Auto zur Verfügung steht.
3. Die Parameter für die Carsharing-Verkehrsmittel basieren auf denen für den MIV.
4. Basierend auf der Annahme, dass die Dichte von Carsharing-Stationen mit der Parkplatzverfügbarkeit korreliert, wurden die Zu- und Abgangszeiten mit der Einflussgröße „Parkdruck“ im Modell abgebildet.
5. Fahrzeuge eines stationsbasierten Carsharing-Anbieters müssen an der Station zurückgegeben werden, an der sie ausgeliehen wurden. Um diese Einschränkung im Modell abbilden zu können, kann das Verkehrsmittel stations-basiertes Carsharing nur gewählt werden, wenn der Agent zu Hause ist. Darüber hinaus kann das Verkehrsmittel bis zur Rückkehr nicht gewechselt werden.
6. Fahrzeuge eines free-floating Carsharing-Anbieters können nur innerhalb des Operationsgebietes ausgeliehen und zurückgegeben werden. Das Verkehrsmittel kann somit nicht gewechselt werden, wenn sich der Agent außerhalb des Operationsgebietes befindet.

Die Zu- und Abgangswege sind noch nicht explizit modelliert, es werden jedoch Zu- und Abgangszeiten im Modell berücksichtigt (siehe Punkt 4). Auch hier wird aufgrund der Unterschiede der beiden Carsharing-Systeme zwischen stationsbasiertem und free-floating Carsharing differenziert und für jedes Carsharing-System unterschiedliche Zu- und Abgangszeiten verwendet.

Abb. 8 zeigt beispielhafte Modellergebnisse für den Carsharing-Provider Car2Go in der Region Stuttgart. Dargestellt ist die Anzahl der Buchungen von Car2Go-Fahrzeugen im Tagesverlauf eines Montags.

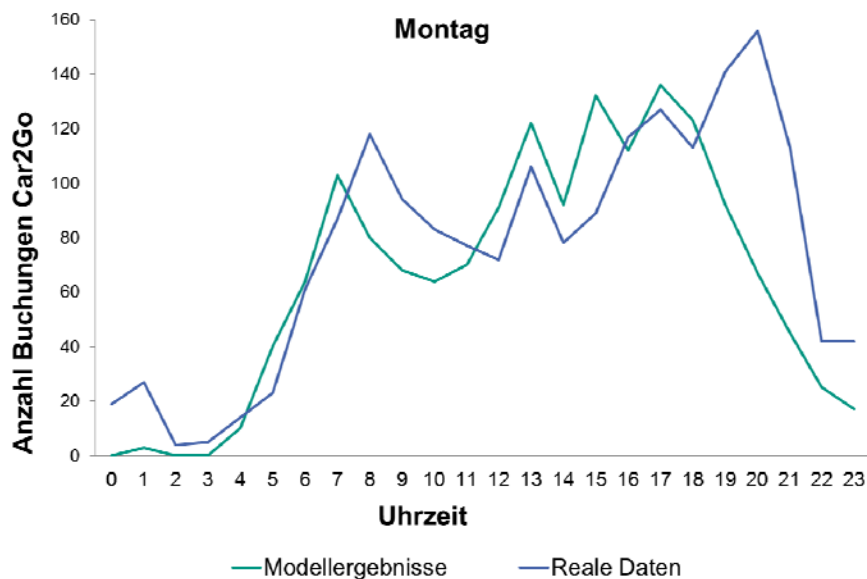


Abb. 8: Anzahl der Buchungen von Car2Go-Fahrzeugen im Tagesverlauf, Montag

Die Modellierung von Zu- und Abgangsweisen ist im Zuge einer Implementierung von Sharing-Angeboten in die Software mobiTopp notwendig. Das bisher verwendete Verkehrsmittelwahlmodell berücksichtigt das für ein traditionelles Verkehrsmodell ausreichende Hauptverkehrsmittel eines Weges. Die Definition des Hauptverkehrsmittels lehnt sich hier an eine vorhandene Definition des DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung) an, in der das ranghöchste Verkehrsmittel als Hauptverkehrsmittel ausgewiesen wird. Da Sharing-Angebote, wie beispielsweise Car2Go oder Call a bike, oftmals nur auf einem Teil des Weges genutzt werden, ist die Modellierung der auf dem Zu- und Abgangsweg genutzten Verkehrsmittel notwendig, um explizite Aussagen über diese Angebote machen zu können.

Für die Modellierung elektromobiler Wege ist zudem ein kombiniertes Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell von Vorteil, da die geringere Reichweite von Elektrofahrzeugen die Ziel- und Verkehrsmittelwahl gleichermaßen beeinflusst.

Ausblick

Mit der entwickelten Software, die auch auf andere Planungsräume übertragen werden kann, ist es in der Region Stuttgart möglich, verschiedene Szenarien der Marktdurchdringung bzw. Ausstattungsgrade der Bevölkerung mit Elektromobilität zu simulieren. Es können somit die Nutzungsintensitäten und im Nachgang die Rentabilität von neuen Carsharing-Stationen oder -Fahrzeugen, von Ladesäulen oder weiteren Mobilitätsangeboten, die auf die einzelne Person wirken, modelliert werden, um eine geeignete Planungsgrundlage für die Umsetzung dieser zu haben. Mit dieser Software steht nun ein Werkzeug zur Verfügung, das quantitative Werte und Grundlagen für Entscheidungsprozesse liefert. Somit können beispielhaft folgende Aspekte näher untersucht werden:

- Wie wirkt sich die Einführung von Incentives für Elektrofahrzeuge wie z. B. kostenloses Parken in der Innenstadt auf die Ziel- bzw. Verkehrsmittelwahl aus?
- Welche Stromlasten entstehen beim Laden von Elektrofahrzeugen bei einem bestimmten Durchdringungsgrad von Elektromobilität an welchen Orten und zu welchen Zeiten?
- An welchen Stellen bringt zusätzliche Ladeinfrastruktur welche Vorteile?
- Wie verändert sich das Verkehrsverhalten (Ziel- und Verkehrsmittelwahl), wenn Personen Elektrofahrzeuge besitzen?
- Wie wirken sich zusätzliche Carsharing-Stationen bzw. Fahrzeuge auf das Mobilitätsverhalten der Personen aus?

Mit mobiTopp ist es möglich neben den konventionellen Verkehrssystemen auch für neuartige Mobilitätsformen Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten bzw. auf alle Verkehrssysteme gesamthaft und integriert abzubilden und zu bewerten.

Literatur

- [1] Streit, Tatjana; Chlond, Bastian; Weiss, Christine; Vortisch, Peter (2015): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2013/2014: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Karlsruhe.
- [2] Kagerbauer, Martin; Bricka, Stacey (2015): Panel, Continuous, and Cross-Sectional Travel Surveys – Germany's Experience. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.
- [3] Heilig, Michael; Mallig, Nicolai; Schröder, Ole; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2015): Multiple-day Agent-based Modeling Approach of Station-based and Free-floating Carsharing. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.
- [4] Mallig, Nicolai; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2013): mobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. In: Procedia Computer Science 19, S. 854–859. DOI: 10.1016/j.procs.2013.06.114.
- [5] Mallig, Nicolai; Heilig, Michael; Weiss, Christine; Chlond, Bastian; Vortisch, Peter (2015): Modelling the Weekly Electricity Demand Caused by Electric Cars. In: Procedia Computer Science 52, S. 444–451.



regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Eine empirisch validierte Systematik und Datenbank zur Beschreibung und Entwicklung von Elektromobilitätsdienstleistungen

R. Luzsa¹, S. Schmitt-Rüth²

¹ Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS, Nordostpark 93, 90411 Nürnberg, E-Mail: robert.luzsa@scs.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS, Nordostpark 93, 90411 Nürnberg, E-Mail: stephanie.schmitt-rueth@scs.fraunhofer.de

Keywords: Elektromobilität, Dienstleistung, Datenbank, Systematik, Kundenanforderungen

1 Einleitung

Der Übergang zur Elektromobilität erfordert - neben technischen Innovationen - auch auf Endkundenbedarfe zugeschnittene Dienstleistungen, welche Elektromobilität im Alltag nutzbar werden lassen [1]. Wie können solche Dienstleistungen, insbesondere mit Blick auf die Gestaltung von Schnittstellen zum Kunden als zentralen erfolgsrelevanten Faktor, entwickelt werden und worauf muss ein Anbieter bei ihrer Entwicklung achten? Vorhandene Geschäftsmodellsystematiken (vgl. [2], [3], [4]) fokussieren bisher meist Teilaspekte dieser Fragen (z. B. IKT-Dienstleistungen). Eine umfassende datengestützte Systematik bei der Entwicklung von Elektromobilitätsdienstleistungen relevanter Aspekte, welche Praktiker bei Konzeption und Planung unterstützten könnte, fehlt ebenso wie ein systematischer Überblick existierender Angebote und deren Charakteristika.

Ziel dieser Arbeit ist daher zum einen die Entwicklung einer solchen handlungs- und entscheidungsunterstützenden Systematik auf Basis einer systematischen Literaturrecherche und dem Vergleich bisheriger Publikationen zu Elektromobilitätsdienstleistungen und -geschäftsmodellen. Zum anderen wird eine Datenbank mit in Deutschland durchgeführten öffentlich geförderten Projekten zu Elektromobilität sowie privatwirtschaftlichen Angeboten aufgebaut. Durch Kategorisierung der Datensätze werden sowohl Validität und Tauglichkeit der entwickelten Systematik zur Beschreibung real existierender Angebote überprüft wie auch Daten zu bisherigen thematischen Schwerpunkten und Unterschieden zwischen öffentlich geförderten und privatwirtschaftlichen Vorhaben im Bereich der Elektromobilität gewonnen.

2 Materialien und Methoden

Zur Entwicklung der Systematik wurden zuerst auf Basis der Ergebnisse einer systematischen Literaturrecherche in Fachdatenbanken zu Merkmalen von Elektromobilitätsdienstleistungen und -geschäftsmodellen und zu kundenseitigen Anforderungen und Akzeptanzfaktoren deduktiv Oberkategorien gebildet. Diese bilden die bei einem Angebot vorhandenen Dienstleistungsbestandteile ab.

Anschließend wurde eine Datenbank mit öffentlich geförderten Projekten aus dem Bereich Elektromobilität sowie privatwirtschaftlichen Angeboten aufgebaut. Geförderte Projekte wurden dabei mittels des Suchterms „elektro* | electro*“ sowie anschließender Einzelbetrachtung der Datensätze aus dem Förderkatalog der Bundesregierung [5], der Umweltforschungsdatenbank UFORDAT des Umweltbundesamtes [6] sowie dem Projektregister des Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ [7] gewonnen und ausgewählt. Zur Auswahl privatwirtschaftlicher Elektromobilitätsdienstleistungen wurden zum einen Elektromobilitätsangebote der umsatzstärksten auf dem deutschen Markt vertretenen Automobilhersteller¹, Energieversorger² und des Elektroautoanbieters Tesla betrachtet und zum anderen weitere Dienstleister über einen iterativ gebildeten Online-Search-String³ identifiziert.

Insgesamt konnten 1814 Datensätze gebildet werden, welche folgende Datenfelder umfassen:

- Titel des Verbundprojektes (geförderte Projekte) bzw. Name des Angebotes (privatwirtschaftliche Angebote)
- Titel des Teilvorhabens (geförderte Projekte)
- Name des Zuwendungsempfänger / der ausführende Stelle (geförderte Projekte) bzw. des Anbieters (privatwirtschaftliche Angebote)
- Anschrift des Zuwendungsempfängers / der ausführenden Stelle (geförderte Projekte) bzw. des Anbieters (privatwirtschaftliche Angebote)
- Förderprogramm (geförderte Projekte)
- Laufzeit (geförderte Projekte)
- Fördervolumen (geförderte Projekte)

Aufgrund des variierenden Detailgrades der herangezogenen Datenquellen liegen nicht für alle Datensätze Angaben zu allen Datenfeldern vor.

Auf Basis des Ansatzes der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [8] wurden die Datensätze unter Bezugnahme auf die jeweiligen Projektbeschreibungen/Projektsteckbriefe (geförderte Projekte) bzw. Anbieterinformationen (privatwirtschaftliche Angebote) durch zwei unabhängige Rater den vorhandenen Oberkategorien zugeordnet und es wurden induktiv Unterkategorien gebildet. Eine Zufallsstichprobe von 100 Datensätzen wurde von beiden Ratern zur Validierung und Vereinheitlichung von Kategoriendefinitionen und Zuordnungsregeln bearbeitet.

1 Volkswagen, Toyota, Daimler, General Motors, Ford, Honda, BMW, Nissan, Hyundai, Peugeot, Chrysler, Renault, Fiat exkl. Chrysler, Kia, Suzuki, Mazda, Mitsubishi

2 E.On, RWE, EnBW, Vattenfall, EWE

3 ((emobility | e-mobility | "e mobility" | elektromobilität | elektroauto | pedelec | elektrofahrzeug) (service | services | solutions | lösungen | dienstleistung | dienstleistungen | dienstleister)) | ((emobility | e-mobility | "e mobility" | elektromobilität | elektroauto | pedelec | elektrofahrzeug) (konfigurieren | informieren | carsharing | tourismus | leasing | laden | fahrzeugversicherung | batterie | flotte | share | versicherung | tarifrechner | finder | smartphone))

Die gewonnenen Daten wurden zum einen deskriptiv ausgewertet und es wurden Häufigkeiten der identifizierten Dienstleistungsbestandteile ermittelt. Weiterhin konnte explorativ ein Vergleich der relativen Vorkommenshäufigkeit von Dienstleistungsbestandteilen zwischen öffentlich geförderten Projekten und privatwirtschaftlichen Projekten vorgenommen werden.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich bisheriger Systematiken und Typologien von Elektromobilitätsdienstleistungen

Tabelle 1 stellt die zentralen Aussagen ausgewählter im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten Publikationen zu Merkmalen von Elektromobilitätsdienstleistungen und -geschäftsmustern dar.

Tabelle 1: Aussagen verwendeter Quellen zur Systematisierung von Elektromobilitätsdienstleistungen

Quelle	Zentrale Aussagen
[9]	Entwicklung einer Typologie von Elektromobilitätseinsatzszenarien: 1) Elektromobile für den öffentlichen Verkehr 2) Elektromobile im Privatbesitz 3) Vorhaben zur Förderung der EM-Nutzung durch lokale Partner (Städte, Firmen) 4) Car-Sharing auf Elektromobilbasis 5) Elektromobile im Unternehmensfuhrpark 6) Elektromobile in industriellen Anwendungen 7) Alternative Geschäftsmodelle für Elektromobile 8) Brennstoffzellenbasierte Szenarien 9) Smart-Grid-basierte Szenarien
[10]	Definition eines holistischen Ansatzes zur Entwicklung von Elektromobilitätsgeschäftsmodellen als Entscheidungsunterstützung für Unternehmen. Ableitung geschäftsmodellrelevanter Merkmale und möglicher Ausprägungsgrade für die Kategorien: 1) Fahrzeug und Batterie 2) Infrastruktur 3) Stromnetzintegration
[11]	Interview- und fallbeispielbasierte Entwicklung eines Business-Model-Frameworks zur Beschreibung von Elektromobilitätsgeschäftsmodellen mit den Dimensionen „Business“, „Customer“, „Financial“ und „Strategic“.
[2]	Untergliederung der Bestandteile von Elektromobilitätsdienstleistungen in Kernprodukt und -dienstleistung (core product) sowie erweitertes Produkt bzw. erweiterte Dienstleistungen (extended product). Beispielhafte Anwendung für Elektromobilitäts-Car-Sharing mit folgenden Kategorien: 1) Trägermedium (z. B. Elektroauto, Elektrozug, Flugzeug) 2) Fahrzeugtyp (z. B. Größe) 3) Mobilitäts-schaffende Dienstleistungen (z. B. Car-Sharing, Batterie-Leasing) 4) Mobilitäts-sicherstellende Dienstleistungen (z. B. Wartung, Reparatur) 5) Mobilitäts-erweiternde Dienstleistungen (z. B. IKT-Dienstleistungen, Chip-Karten)
[12]	Unterteilung existierender Elektromobilitätsgeschäftsmodelle nach Geschäftsmodellen, die das Fahrzeug fokussieren sowie Geschäftsmodellen, die Dienstleistungen um das Fahrzeug fokussieren.
[13]	Identifikation von vier Archetypen von Elektromobilitätsgeschäftsmodellen und Analyse ihrer Besonderheiten und zeitlichen Entwicklung: 1) Hochpreisige, einsatzweckgebundene Elektromobile (z. B. spezifisch zur Freizeitgestaltung) 2) Hochpreisige, einsatzweckoffene Elektromobile (z. B. durch mehr als zwei Sitze oder größeren Stauraum flexibler im Verwendungszweck) 3) Preiswerte, einsatzweckgebunden Elektromobile (z. B. Flottenfahrzeuge für urbane Kurzfahrten) 4) Preiswerte, einsatzweckoffene Elektromobile (z. B. Fahrzeuge mit größerem Stauraum und höhe-

Quelle	Zentrale Aussagen
	rer Reichweite, deren einmaliger Anschaffungspreis für den Endkunden etwa durch Finanzierung der Batterie über Leasing reduziert wird)
[14]	Entwicklung eines Bewertungsframeworks für Geschäftsmodelle für Elektromobilitätsdienstleistungen auf Basis der Geschäftsmodellkomponenten „Schlüsselressourcen“, „Schlüsselaktivitäten“, „Wertversprechen“, „Kundensegmente“, „Wettbewerbsstrategie“ und „Wertschöpfungsnetzwerk“.
[3]	Entwicklung eines Beschreibungsmodells für IKT-Geschäftsmodelle in der Elektromobilität, das Merkmale des Geschäftsmodells, Merkmale der Elektromobilität und Merkmale der IKT mit folgenden Unterkategorien berücksichtigt: <ol style="list-style-type: none"> 1) Merkmale des Geschäftsmodelles <ul style="list-style-type: none"> ▪ Angebotsart (z. B. Produkt, Dienstleistung) ▪ Markt (z. B. Massenmarkt, Nischenmarkt) ▪ Transaktionsbeziehung (z. B. B2B, B2C) ▪ Funktion innerhalb der Wertschöpfungskette (z. B. Spezialist) ▪ Ertragsgrundlage (Hauptleistung oder Nebenleistung) 2) Merkmale der EM <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tätigkeitsfeld (z. B. Mobilität, Wartung) ▪ Grüne Intention (wird kommuniziert oder wird nicht kommuniziert) ▪ Akteur (z. B. Fahrzeughersteller, IKT-Anbieter) 3) Merkmale der IKT <ul style="list-style-type: none"> ▪ IKT-Rolle (z. B. Betreiber des Kernnetzes, Internetdienstanbieter) ▪ IKT-Schnittstelle (z. B. Car-to-Car, Car-to-Mobile-Device)

Bei vergleichender Betrachtung der Typologien und Systematiken fällt dreierlei auf:

- Es werden unterschiedliche Betrachtungs- und Abstraktionsebenen verwendet: So unterscheiden [2] z. B. sehr allgemein mobilitätsschaffende, -sicherstellende und -erweiternde Dienstleistungen, während [10] konkrete Gestaltungsmöglichkeiten z. B. bei der Umsetzung der Ladeinfrastruktur differenzieren.
- Verschiedene thematische Aspekte werden unterschiedlich detailliert berücksichtigt, so erfassen etwa [9] die ökologisch-technischen Themen „Brennstoffzelle“ und „Smart Grid“ allgemein als Oberkategorien, [10] betrachten sie detailliert als Unterkategorien der Kategorie Stromnetzintegration, während sie in anderen Typologien nicht explizit genannt werden.
- Schließlich werden die Schnittstellen der Dienstleistung hin zum Endkunden bzw. -nutzer sowie dessen Erwartungen an die Dienstleistung nicht bzw. nur ansatzweise (z. B. [11]) zur Beschreibung und Klassifikation der Dienstleistung herangezogen.

Insbesondere letzteres erscheint für eine Systematik, die als Handlungs- und Gestaltungshilfe für die Entwicklung von Dienstleistungen, die von Kunden akzeptiert und in Anspruch genommen werden sollen, von großer Bedeutung. So identifizieren Studien zu kundenseitigen Erwartungen an und zur Bewertung von Elektromobilität auch Faktoren wie die Finanzierung eines Elektromobilitätsangebotes, die Wegeinfrastruktur (vgl. z. B. [15]) oder die modale Einbettung, d.h. die Integration von Elektromobilität in das Netz existierender Verkehrsangebote, insbesondere des ÖPNV und der Bahn (vgl. [16]) als relevante Einflussgrößen auf die Bereitschaft, Elektromobilität zu nutzen. Somit sollte auch die jeweilige Berücksichtigung dieser Faktoren zur Beschreibung einer Elektromobilitätsdienstleistung herangezogen werden.

Zur Entwicklung der nachfolgend dargestellten Systematik für Elektromobilitätsdienstleistungen wurde daher zum einen versucht, sowohl Ober- wie auch relevante Unterkategorien von Dienstleistungsbestandteilen aus der existierenden Literatur so zusammenfüh-

ren, dass das entstehende Kategoriensystem insbesondere die Schnittstellen zwischen Dienstleistung und Kunden, die vom Anbieter gestaltet werden können und müssen, abbildet. Zum anderen wurden bei der Auswahl von Kategorien auf vorhandene Befunde zu Kundenbedarfen und zur Kundenakzeptanz Bezug genommen.

3.2 Beschreibung der Systematik für Elektromobilitätsdienstleistungen

Abbildung 1 fasst die entwickelte Systematik zusammen. Auf Basis der Literaturrecherche wurden insgesamt sechs Oberkategorien gebildet, welche Dienstleistungsbestandteile beschreiben. Die Kategorien werden im Folgenden dargestellt:

„Anwendungsszenario“ erfasst in Anlehnung an [9], ob in einem Projekt oder einem privatwirtschaftlichen Angebot der Fokus auf einen Verkehrstyp (Privatverkehr, Wirtschaftsverkehr), einen Nutzungstyp (Einzelnutzung, geteilte Nutzung) oder einen Nutzungsort (urbaner, ländlicher, Fernverkehr) gelegt wird.

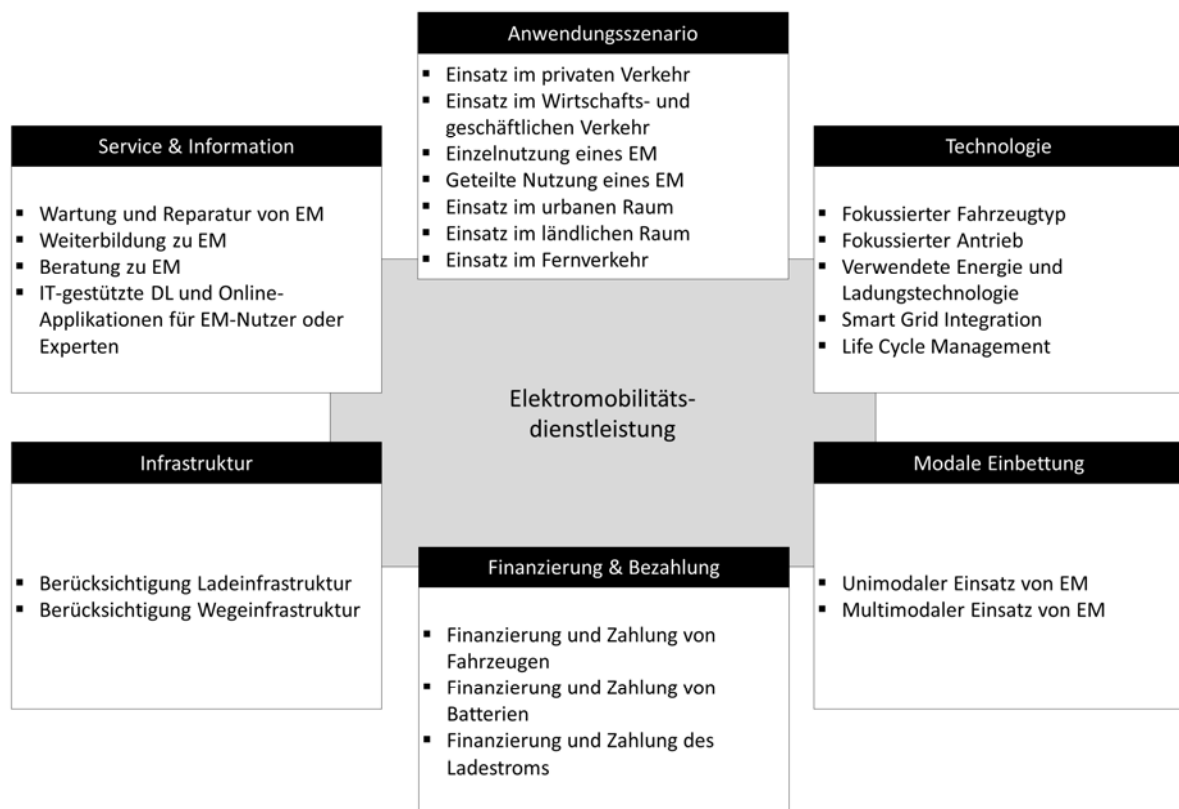


Abbildung 1: Ober- und Unterkategorien der Systematik von Elektromobilitätsdienstleistungen

Eine Kategorisierung unter „Technologie“ analysiert, ob die Dienstleistung auf einen bestimmten Fahrzeugtyp (z. B. PKW, KRAD, Bus, Pedelec, LKW), einen Antriebstyp (Hybrid, vollständig elektrischer Motor), eine Form der Energiegewinnung (z. B. Ladestrom aus regenerativer Energie) oder -bereitstellung, auf die Nutzung von Elektromobilen als Stromspeicher (Smart Grid Integration) oder die Weiterverwertung von Bauteilen, insb. Batterien (Life Cycle Management), ausgelegt ist.

Unter „*Service und Information*“ werden Dienstleistungen im engeren Sinne erfasst, die etwa durch die Wartung eines Fahrzeugs, die Weiterqualifikation oder Beratung zum Thema Elektromobilität oder die Bereitstellung von IT-basierten Angeboten wie Applikationen zur Ladestationssuche, eine direkte Dienstleistungsschnittstelle zum Kunden aufweisen.

Die Kategorie „*Infrastruktur*“ hinterfragt, ob in einem Projekt oder einer Dienstleistung die Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur (z. B. Platzierung, Finanzierung und Betrieb von Ladesäulen) und der Wegeinfrastruktur (z. B. Neubau oder Umbau von Straßen) berücksichtigt wurde, während unter „*Modale Einbettung*“ klassifiziert wird, ob und wie im Rahmen eines Angebotes Schnittstellen zu anderen Verkehrssystemen (z. B. in Form einer Verknüpfung von Elektroautos mit einem Park & Ride-Konzept) gestaltet werden.

Die letzte Kategorie umfasst die Gestaltung der „*Finanzierung & Bezahlung*“ von Elektromobilitätsdienstleistungen hinsichtlich der zentralen Dienstleistungsbestandteile Fahrzeug, Batterie und Strom.

3.3 Thematische Schwerpunkte der untersuchten Projekte und Angebote

Im Folgenden werden die Häufigkeiten, mit denen Kategorien bei den untersuchten 1814 öffentlich geförderten Projekten und privatwirtschaftlichen Dienstleistungen auftreten, angegeben: Mit 1596 Datensätzen in der Kategorie „*Technologie*“ berücksichtigt die Mehrzahl der untersuchten Angebote technologische Fragestellungen und fokussiert entsprechend z. B. einzelne Fahrzeug- oder Antriebstypen. Die zunehmend diskutierten Ansätze „*Smart Grid Integration*“ und „*Life Cycle Management*“ wurden in 123 respektive 66 überwiegend öffentlich geförderten (Teil-)Projekten aufgegriffen.

In der Kategorie „*Anwendungsszenario*“ zeigen sich Schwerpunkte auf den Privatverkehr (586) sowie den Verkehr in urbanen Räumen (441) gegenüber dem Wirtschaftsverkehr (251) sowie ländlichen Räumen (110) und Fernverkehr (20).

Wird in einem Angebot die „*Infrastruktur*“ berücksichtigt, so erfolgt dies überwiegend in Form der Ladeinfrastruktur (525). Die Wegeinfrastruktur (z. B. Bau oder Umwidmung von dedizierten Wegen) wurde bisher nur selten fokussiert.

Angebote aus dem Bereich „*Service & Information*“ wurden in 434 privatwirtschaftlichen Dienstleistungen bzw. (Teil-)Projekten adressiert, wozu insbesondere IT-gestützte Dienstleistungen (244) sowie in der Mehrzahl universitäre bzw. berufliche Weiterbildungskonzepte (115) zählen.

Der Aspekt „*Multimodale Einbindung*“, d.h. die Verknüpfung verschiedener Verkehrssysteme etwa durch Park & Ride-Konzepte oder ermäßigte ÖPNV-Karten für Elektromobilitätsnutzer, kam in 187 der untersuchten Angebote vor.

Fragen der „*Finanzierung & Bezahlung*“ von Elektromobilitätsdienstleistungen wurden in 120 der untersuchten Angebote behandelt - mehrheitlich (65) bezogen auf die Bezahlung

und Abrechnung des benötigten Ladestroms, etwa in Form herstellerseitig angebotener Pay-Cards.

3.4 Vergleich öffentlich geförderter Projekte und privatwirtschaftlicher Angebote

Ein deskriptiver Vergleich der Schwerpunktsetzungen öffentlich geförderter Projekte (n=1770) und privatwirtschaftlicher Angebote (n=44)⁴, d.h. der jeweiligen relativen Vorkommenshäufigkeit von Oberkategorien (vgl. Abbildung 2), zeigt deutliche Unterschiede:

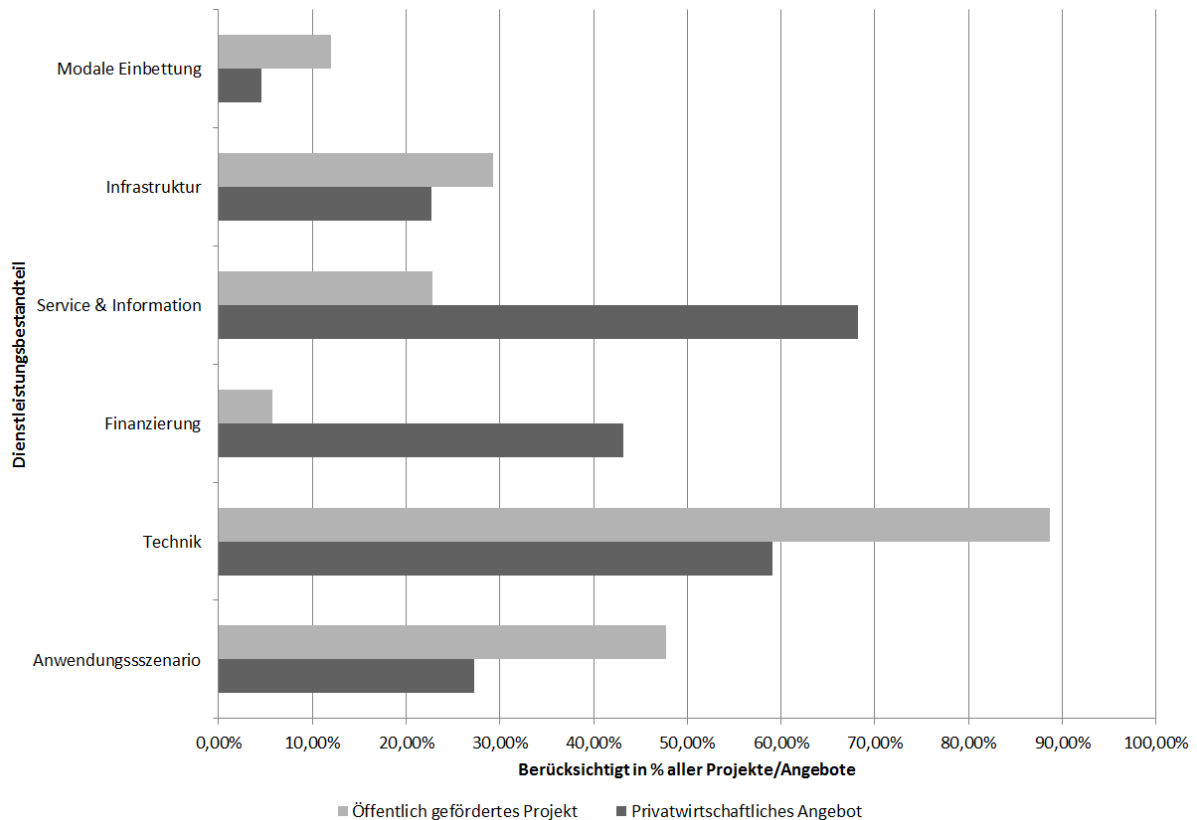


Abbildung 2: Häufigkeiten von Dienstleistungsbestandteilen öffentlich geförderter Projekte und privatwirtschaftlicher Angebote in Prozent (%) (Oberkategorien)

So berücksichtigen 43,2% der betrachteten privatwirtschaftlichen Dienstleistungen auch Fragen der Finanzierung von Elektromobilität, während dies nur in 5,7% der öffentlich geförderten Projekte der Fall ist. Ein ähnlicher Unterschied zeigt sich bei der Kategorie „Service & Information“, in welche 68,2% der privatwirtschaftlichen Angebote fallen, jedoch nur 22,8% der öffentlich geförderten Vorhaben. Hingegen fokussieren öffentliche

4 Die vergleichsweise geringe Anzahl privatwirtschaftlicher Angebote resultiert zum einen aus der Fokussierung auf Anbieter auf dem deutschen Markt, zum anderen aus der Klassifikation von Angeboten mit mehreren Dienstleistungsbestandteilen (z. B. Verkauf eines Elektroautos mit entsprechenden Finanzierungsangeboten und kostenloser Inanspruchnahme eines herkömmlich angetriebenen PKW für eine bestimmte Dauer im Jahr) in nur einem Datensatz mit entsprechender Kategoriensetzung.

Projekte mit 88,8% (privatwirtschaftlich = 59,1%) häufiger die (Weiter-)Entwicklung bzw. den Einsatz konkreter Basistechnologien, mit 47,8% (vs. 27,3%) häufiger den Einsatz von Elektromobilität in einem umgrenzten Anwendungsszenario und mit 12,0% (vs. 4,6%) häufiger die modale Einbettung, d.h. die Gestaltung von Schnittstellen zu anderen Verkehrssystemen. Nur geringe Unterschiede zeigen sich in der Häufigkeit, mit der infrastrukturelle Fragen berücksichtigt werden (öffentlich = 29,3%, privatwirtschaftlich = 22,7%).

Unterschiede zeigen sich auch im Vergleich einzelner Unterkategorien. So fokussieren etwa nur 2,3% der privatwirtschaftlichen Angebote den Geschäfts- und Wirtschaftsverkehr, verglichen mit 9,9% der öffentlich geförderten Projekte; auch Technologien wie die Brennstoffzelle sowie ökologisch-technische Aspekte wie „Smart Grid Integration“ werden überwiegend in öffentlich geförderten Projekten berücksichtigt.

4 Diskussion

Durch Kategorisierung der Datenbank mit öffentlich geförderten Elektromobilitätsprojekten und privatwirtschaftlichen Angeboten konnte die Eignung der entwickelten Systematik, auf dem Markt verfügbare Elektromobilitätsdienstleistungen sowie Forschungsprojekte zu beschreiben und zu kategorisieren, gezeigt werden. Sie stellt ein unterstützendes Werkzeug für Entwickler von Elektromobilitätsdienstleistern dar, indem sie auf für die Entwicklung relevante Gestaltungsaspekte (z. B. die Berücksichtigung von Schnittstellen zu weiteren Verkehrssystemen im Rahmen der Entwicklung eines E-Car-Sharing-Dienstes) aufmerksam macht und Umsetzungsmöglichkeiten aufzeigt. Um die Systematik noch besser auf die Bedürfnisse von Anbietern und Entwicklern von Elektromobilitätsdienstleistungen auszurichten, sollte weitere Forschung darauf abzielen, sie unter Berücksichtigung von Erkenntnissen zu typischen Phasen des Dienstleistungsentwicklungsprozesses (vgl. [17]) zu einem prozessorientierten Toolkit weiterzuentwickeln.

Die deskriptive Auswertung des Auftretens von Dienstleistungsbestandteilen bei öffentlich geförderten Projekten und privatwirtschaftlichen Angeboten zeigt zum einen, dass eine Diskrepanz zwischen aus der Forschung (vgl. u.a. [16], [15]) bekannten kundenseitigen Anforderungen und fokussierten Schwerpunkten existiert: Insbesondere geförderte Forschungsprojekte berücksichtigen nur selten explizit die für Kundenakzeptanz relevanten Fragen nach Finanzierungsmöglichkeiten oder nach zusätzlichen Dienstleistungen oder Informationsangeboten, die Elektromobilität erfahrbar und begreifbar machen und in den Kundenalltag integrieren können. Stattdessen zeigt sich ein deutlicher Fokus auf die Untersuchung technologischer Aspekte, welche nur selten mit Dienstleistungsaspekten kombiniert werden (nur 17,4% der geförderten Projekte und privatwirtschaftlichen Angebote in der Kategorie „Technologie“ sind auch unter „Service und Information“ kategorisiert). Durch eine verstärkte Berücksichtigung dieser Kombination, also der Frage, wie neu- oder weiterentwickelte Technologien durch Dienstleistungskonzepte und Geschäftsmodelle auch praktisch für mögliche Kunden nutzbar gemacht werden können, könnte die weitere Etablierung von Elektromobilität unterstützt werden.

Die Gestaltung von intermodalem Verkehr, also Schnittstellen zwischen Elektromobil und weiteren Verkehrssystemen, mit 12,0% in Forschungsprojekten bzw. 4,6% in privatwirtschaftlichen Angeboten, spielt bisher ebenfalls nur eine untergeordnete Rolle. Vor dem

Hintergrund des aktuellen Trends weg von der traditionellen Nutzung von Einzel-PKWs hin zu pragmatisch-multimodalem Mobilitätsverhalten (vgl. [18]) erscheint eine verstärkte Berücksichtigung modaler Schnittstellen und modaler Integration für die weitere Entwicklung bedarfsgerechter Elektromobilitätsdienstleistungen ebenfalls als erstrebenswert.

Schließlich fällt auf, dass nur wenige Projekte explizit den Einsatz von Elektromobilen in ländlichen Räumen adressieren. Die Entwicklung von Konzepten für den besonders vom demografischen und strukturellen Wandel betroffenen ländlichen Raum nimmt in den vergangenen Jahren eine immer größere Rolle auf Bundes- und Landesebene ein (vgl. z. B. den aktuellen Wettbewerb „Innovationen für Kommunen und Regionen im demografischen Wandel (InnovaKomm)“ [19]). Vor diesem Hintergrund erscheint es lohnenswert, die Frage zu stellen, welchen Beitrag gerade Elektromobilität als Zukunftstechnologie zur Förderung des ländlichen Raums (z. B. im Rahmen von Versorgungskonzepten) spielen kann, und diese in zukünftigen Projekten zu verfolgen.

Neben den dargestellten Auswertungen könnten auch weitere Analysen, etwa zur regionalen Verteilung bisheriger öffentlich geförderter und privatwirtschaftlicher Aktivitäten im Themenfeld und zu Marktdaten wie z. B. Nutzerzahlen einzelner Angebote, Erkenntnisse generieren, aus denen Handlungsbedarfe und Trends abgeleitet werden könnten. Dies war in der vorliegenden Studie nicht möglich, da dafür benötigte Angaben aufgrund des variierenden Detailgrades der für den Datenbankaufbau herangezogenen Datenquellen nicht für eine hinreichend große Anzahl an Projekten bzw. Angeboten vorlagen.

Schließlich kann festgestellt werden, dass hinsichtlich einer umfassenderen Integration von Erkenntnissen zu Kundenbedarfen und kundenseitigen Akzeptanzfaktoren in die Entwicklung von Elektromobilitätsdienstleistungen weiterer Forschungs- und Handlungsbedarf besteht: Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden existierende Geschäftsmodell- und Dienstleistungssystematiken aus dem Themenbereich Elektromobilität unter Berücksichtigung der Schnittstelle zwischen Dienstleistung und Kunden in einer Gesamtsystematik zusammengeführt – darüber hinaus könnten Entwickler und Anbieter aber auch von der Integration weiterer inhaltlicher Befunde etwa aus der Technikakzeptanz- und Innovationsadoptions-Forschung in ein Dienstleistungsentwicklungsframework profitieren. Voraussetzung hierfür sind neben dem Einbezug von vorhandenen allgemeinen Erkenntnissen aus den genannten Forschungsbereichen jedoch auch konkrete empirische Befunde zu Merkmalen von Elektromobilitätsangeboten, die zur Schaffung von Nutzerakzeptanz beitragen. Erste Arbeiten zur Gewinnung entsprechender Daten und zur Integration in den Dienstleistungsentwicklungsprozess werden von der Fraunhofer SCS aktuell verfolgt.

5 Literatur

- [1] I. Westphal, J. Nehls und K.-D. Thoben, „Steigerung der Attraktivität von Elektroautomobilen durch neue Produkt-Service-Kombinationen“, *Industrie Management*, vol. 29, pp. 19-24., 2013.
- [2] J. Eschenbaecher, S. Wiesner und K. D. Thoben, „Validation of Innovative Extended Product Concepts for E-Mobility“, in *Evolutionary Paths Towards the Mobility Patterns of the Future* (M. Hülsmann und D. Fornahl, eds.), pp. 131-152, Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [3] J. Krenge, M. Roscher und T. Kox, „Beschreibungsmodell für IKT-Geschäftsmodelle in der Elektromobilität“, in *GI-Jahrestagung*, pp. 1535-1547, 2013.
- [4] R. K. Rezania und W. Prügler, „Bewertung von Geschäftsmodellen für Elektromobilität in der APG-Regelzone“, in *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 129-3, pp. 150-155, 2012.
- [5] Online-Ressource: <http://foerderportal.bund.de/foekat/> (abgerufen am 22.04.2015).
- [6] Online-Ressource: <http://doku.uba.de/> (abgerufen am 22.04.2015).
- [7] Online-Ressource: <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte.html> (abgerufen am 22.04.2015).
- [8] P. Mayring und T. Fenzl, „Qualitative Inhaltsanalyse“, Wiesbaden: Springer, 2014.
- [9] H. Davies, P. Nieuwenhuis, P. Wells, D. Newman und C. Donovan, „ENEVATE Project - Electric Vehicle Market Drivers and E-Mobility Concepts“, in *Paper to EECV European Electric Vehicle Congress*, Brussels, 2012.
- [10] F. Kley, C. Lerch und D. Dallinger, „New business models for electric cars - A holistic approach“, in *Energy Policy*, vol. 39, pp. 3392-3403, 2011.
- [11] C. Weiller und A. Neely, „Business Model Design in an Ecosystem Context“, in *University of Cambridge, Cambridge Service Alliance*, 2013.
- [12] N. Abdelkafi, S. Makhotin und T. Posselt, „Business Model Innovations For Electric Mobility — What Can Be Learned From Existing Business Model Patterns?“, in *International Journal of Innovation Management*, vol. 17-01, pp. 1-41, 2013.
- [13] R. Bohnsack, J. Pinkse und A. Kolk, „Business models for sustainable technologies: Exploring business model evolution in the case of electric vehicles“, in *Research Policy*, vol. 43-2, pp. 284-300, 2014.
- [14] C. Stryja, R. Schüritz, N. Kühl, P. Hottum und G. Satzger, „Entwicklung eines Frameworks zur Beschreibung von Geschäftsmodellen für Elektromobilitätsdienstleistungen“, in *Paper to 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, 2015.
- [15] E. Dütschke, U. Schneider, A. Sauer, M. Wietschel, J. Hoffmann und S. Domke, *Roadmap zur Kundenakzeptanz: Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen*, Berlin, Karlsruhe: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (ed.), 2012.
- [16] C. Hoffmann, A. Graff, S. Kramer, T. Kuttler, M. Hendzlik, C. Scherf und F. Wolter, *Bewertung integrierter Mobilitätsdienste mit Elektrofahrzeugen aus Nutzerperspektive. Ergebnisse der Begleitforschung im Projekt BeMobility - Berlin elektroMobil*, Berlin: Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (Innoz) GmbH (ed.), 2012.
- [17] H. J. Bullinger und P. Schreiner, „Service Engineering: Ein Rahmenkonzept für die systematische Entwicklung von Dienstleistungen“, in *Service Engineering* (H. J. Bullinger und A. W. Scheer, eds.), pp. 53-84, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [18] W. Canzler, „Mobilitätskonzepte der Zukunft und Elektromobilität“, in *Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen* (R. F. Hüttl, B. Pischetsrieder und D. Spath, eds.), pp. 39-62, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [19] Online-Ressource: <http://www.mtidw.de/ueberblick-bekanntmachungen/innovakomm>, (abgerufen am 22.04.2015).

Potentiale der E-Mobilität in Eco-Gewerbeparks: Der eCar-Park Sindelfingen

M. Schmid¹, W. Rid²

¹ Städtebau-Institut, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, Stuttgart,
E-Mail: manfred.schmid@si.uni-stuttgart.de

² Fachgebiet Stadt- und Regionalökonomie, Fachhochschule Erfurt, Schlüterstraße 1,
Erfurt, E-Mail: wolfgang.rid@fh-erfurt.de

Keywords: Elektromobilität, Energiemanagement, Fuhrparkmanagement, gewerbliche Mobilitätsbedarfe, Eco-Gewerbepark

1 Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Der seit mehreren Jahrzehnten anhaltende Nachfragetrend hin zu ökologisch verträglicheren Produkten und Dienstleistungen hat in vielen Branchen große Anstrengungen evoziert, diesen wachsenden Markt auch bedienen zu können. Im Zuge dessen haben sich europa- und weltweit vermehrt sogenannte Eco-Gewerbeparks etabliert, welche sich grundlegend durch ein parkweites, gemeinsames Management bzgl. Umwelt- und Ressourcenfragen auszeichnen [1]. Dies führt in den meisten Fällen zu parkinternen Kooperationen, in denen über Firmengrenzen hinweg die zum Wirtschaften nötigen Ressourcen- und Wertstoffflüsse gebündelt bzw. geschlossen werden und Energieflüsse zum Teil aus erneuerbaren Quellen gespeist bzw. kaskadiert (bspw. durch Abwärmenutzung) werden [2]. Im Fokus steht demnach die Herstellung ökologisch besser verträglicher Produkte durch effektiveres und/oder effizienteres Wirtschaften.

Allerdings bedingen – sowohl in Eco- als auch in herkömmlichen Gewerbeparks – vor allem Transport- und Energiestrukturen fixe Umweltbelastungen (bspw. CO₂-Emissionen). Während Einzelmaßnahmen zur Reduzierung dieser Auswirkungen meist kostenintensiv und häufig ineffizient sind, scheitern umfassende Maßnahmen an ihrem Multi-Stakeholder-Charakter. Es fehlt ein Konzept, welches integrierte, umweltverträgliche Mobilität ökonomisch umsetzbar und standortunabhängig übertragbar macht.

1.2 Ziel des eCar-Parks Sindelfingen

Mit dem eCar-Park Sindelfingen soll genau diese Lücke geschlossen werden. Die energetische Versorgung wird durch einen Mix aus verschiedenen erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung gewährleistet, was in Verbindung mit der zwischenspeichernden Funktion der Elektromobilität einen weitgehend netzautarken Betrieb sicherstellen soll. Zentraler Forschungsgegenstand ist hierbei die Rolle der Elektromobilität, die dem Park mittels der Fahrzeugbatterien einen Pufferspeicher zur Verfügung stellt. Es soll untersucht werden, in welcher Weise die elektrischen Fahrzeuge Stromspeicher- bzw. Regulierungsfunktionen einnehmen können, während sie zugleich die Mobilitätsbedarfe der angesiedelten Unternehmen erfüllen. Hierbei gilt es, die Parameter „Fuhrparkgrößen“ sowie

„Park- bzw. Ladezeiten“ mit den Mobilitätsbedarfen verschiedener Branchen in Einklang zu bringen.

Neben der technischen Umsetzung sind organisatorische, wirtschaftliche und rechtliche Fragestellungen elementar, um einerseits Geschäftsmodelle zu entwickeln und andererseits relevante Erkenntnisse in den legislativen Prozess bzgl. einer benötigten Vehicle-to-Grid Gesetzgebung zu speisen.

Eco-Gewerbeparks durch einen Top-Down Ansatz zu implementieren, scheitert in der Realität in den meisten Fällen [3]. Das Konzept des eCar-Park Sindelfingen wird durch die Überführung der Querschnittsthemen Mobilität und erneuerbare Energien in ein integriertes Geschäftsmodell als Grundlage bei der Entwicklung von Eco-Gewerbeparks dienen können. Fuhrparkbetreiber nennen als größte Hürde für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen fehlende Geschäftsmodelle [4], während Experten gerade in Fuhrparks den Treiber für den Markthochlauf der Elektromobilität in den kommenden Jahren sehen [5].

Das übertragbare Konzept des eCar-Park Sindelfingen wird nachhaltigeres Wirtschaften in Gewerbegebieten ermöglichen, vor dem Hintergrund der Energiewende netzentlastende Wirkung entfalten sowie mehrere Optionen für den Markthochlauf der Elektromobilität aufzeigen. Dabei werden monetäre Anreize integriert, die die Anschaffung von Elektrofahrzeugen fördern: Im Rahmen des Geschäftsmodells des eCar-Park Sindelfingen könnte gewerblichen Nutzern (Unternehmen im eCar-Park) sowie privaten Nutzern (Arbeitnehmer im eCar-Park) die Bereitstellung ihrer Fahrzeugbatterien als Speicher vergütet werden.

1.3 Projektstandort

Bis 2016 soll der Gewerbepark auf einem zehn Hektar großen Gelände in Sindelfingen-Darmsheim mit rund 150.000 Quadratmeter Nutzfläche für Unternehmen entstehen. Ziel ist es, ansiedelnden Firmen besondere und nachhaltige Anreize zu bieten: Die Vorteile liegen vor allem in einer langfristig preisstabilen erneuerbaren Energieversorgung und einer kosteneffizienten, umweltverträglichen Mobilität – beides schlägt sich positiv auf die Produkt-Ökobilanzen der Unternehmen nieder.



Abbildung 1: Die ersten E-Fahrzeuge des eCar-Parks Sindelfingen

Abbildung 1 zeigt die ersten Fahrzeuge, die am Standort beschafft wurden. Im Hintergrund ist ein Container zu sehen, der eine permanente Ausstellung beherbergt, welche das Energiekonzept des eCar-Parks visualisiert und so interessierten Besuchern näherbringt.

2 Umsetzungsaspekte des eCar-Park

2.1 Energiekonzept

Im eCar-Park Sindelfingen werden ansiedelnde Firmen Wärme und Kälte, Strom sowie Mobilität mit deutlich reduziertem CO₂-Emissionsfaktor beziehen. Elektrische Fahrzeuge (BEV – Battery Electric Vehicles) bergen dabei das Potenzial, den fluktuierenden erneuerbaren Energieanlagen als Pufferspeicher zu dienen: Stromüberangebote werden in BEV zwischengespeichert und in Zeiten der Unterversorgung rückgespeist. Ein entsprechendes Management vorausgesetzt, werden geringere Kapazitäten erneuerbarer Energien installiert, was die Investitionskosten senkt. Inwiefern BEV dabei lediglich als kurzfristiges Regelinstrument zum Ausgleich von Lastspitzen dienen oder während längerer Perioden der Unterversorgung sogar die Netzautarkie gewährleisten können, ist Gegenstand der Forschung.

Der Park wird durch Strom aus Photovoltaik, Windkraft und Biomasse versorgt. Die Grundlast wird in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erzeugt. Zusätzliche Wärme wird mittels Wärmepumpen aus Erdwärme gewonnen. Auf Kühlwasser kann im benachbarten Steinbruch zurückgegriffen werden. Eine schematische Darstellung des Energiekonzepts kann Abbildung 2 entnommen werden.

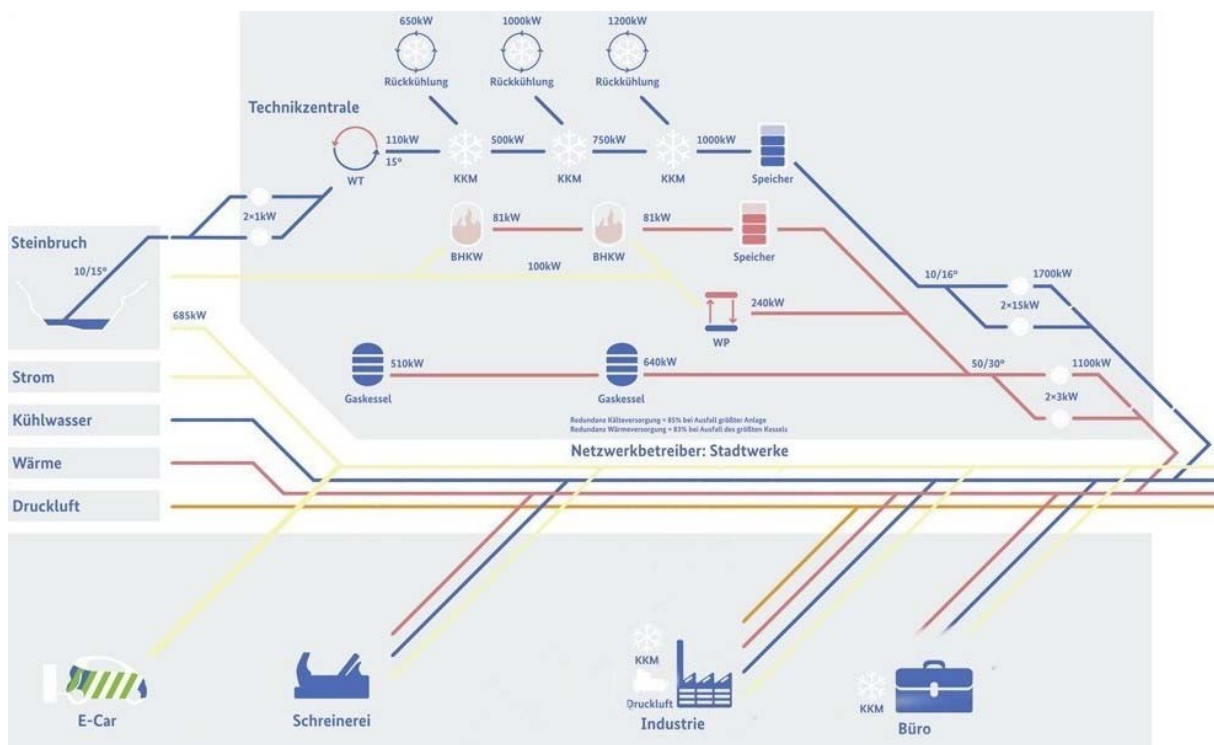


Abbildung 2: eCar-Park Gesamtschema [Quelle: EFG GmbH, Konsortialführer eCar-Park Sindelfingen]

Das Energiekonzept des eCar-Park wird derzeit in Form einer Simulation erstellt, die auf Energieverbräuchen und stundengenauen Lastverläufen diverser Branchen basiert. Demgegenüber wird die Energieerzeugung entsprechend bekannter Parameter simuliert. Die wesentliche Unbekannte für die Erstellung einer realitätsnahen Simulation ist die Größe des zu jeder Stunde eines Jahres verfügbaren, branchenabhängigen und elektromobilen Pufferspeichers und der damit verbundenen Energieverbräuche für Elektromobilität.

2.2 Fuhrparkgrößen und Mobilitätsbedarfe

Bei diesem zentralen Aspekt des Energiekonzepts handelt es sich um die benötigte Größe eines elektrisch betriebenen Gesamt-Fuhrparks in Abhängigkeit vom ansiedelnden Branchenmix. Der Gesamt-Fuhrpark des eCar-Park Sindelfingen besteht aus drei voneinander getrennten Fuhrparks, siehe auch Tabelle 1: (A) Ein zentraler Fahrzeugpool wird den ansiedelnden Unternehmen im Rahmen eines Fahrzeug-Sharing vom Parkbetreiber angeboten. Daneben verfügen sowohl die Unternehmen (B) als auch deren Mitarbeiter (C) zu einem steigenden Anteil über BEV, welche Sie dem Energiemanagement des Parks als Batteriespeicher zur Verfügung stellen. Dies kann in einem gewissen Rahmen vorausgesetzt werden, da einerseits bidirektionales Laden in Mikrozyklen die Lebensdauer von Lithium-Batterien erhöht [6] und andererseits die Batterienutzung vergütet werden kann, weil diese Batterien einen Pufferspeicher frei von Investitionskosten darstellen. In Tabelle 1 werden diese drei Teil-Fuhrparks grob nach zentralen Charakteristika kategorisiert.

Tabelle 1: Charakterisierung der in die Berechnung einfließenden BEV-Fuhrparks

	A. Parkeigener BEV-Fuhrpark	B. Firmeneigene BEV	C. Mitarbeiter-eigene BEV
Fuhrparkgröße	klein	mittel	groß
Erwartete Speicherkapazität	gering	mittel	hoch
Prognostizierbarkeit der Standzeit an der Ladesäule	mittel	gering	hoch
Voraussetzbarkeit der Standzeit an der Ladesäule	nachts (außer Sharing wird geöffnet)	nachts (evtl. Überlassung an Mitarbeiter)	tagsüber (außer Mehrschichtbetrieb)
Erwartete Netzfunktion	offen	Pufferspeicher	Regelinstrument

Fuhrparkgrößen und -zusammensetzungen werden derzeit in Abhängigkeit der Branche, des Unternehmensportfolios, der Unternehmensgröße sowie des Unternehmensstandorts und dessen verkehrlicher Anbindung erhoben. Durch die Verknüpfung dieser Daten mit digitalen Fahrtenbüchern können die Mobilitätsbedarfe von Unternehmen je Fahrzeugkategorie und in Abhängigkeit von Branche und Unternehmensgröße abgeleitet werden.

Hiermit kann der Gewerbepark mit beliebigen Unternehmenszusammensetzungen simuliert werden. Als Ergebnis können die parkweite Gesamtzahl an konventionellen Fahrzeugen (ICV – Internal Combustion Vehicle) jeder relevanten Fahrzeugkategorie, deren jährliche Laufleistung sowie die zu erwartenden Standzeiten (für Ladung bzw. Entladung) abgeleitet werden. Darauf aufbauend sind jene ICV identifizierbar, welche aufgrund ihrer Fahrprofile durch BEV substituiert werden können. Studien zeigen, dass ca. 29% der ICV mittels leichter Anpassungen durch BEV substituierbar sind [7]. Diese werden im Ener-

giekonzept als Pufferspeicher entsprechend der bekannten Fahrtenprofile, Energieverbräuche und Batteriegrößen hinterlegt.

Folgende Formel veranschaulicht, wie sich der Ladestand jedes BEV für jede Stunde des Jahres ermitteln lässt. Fahrzeugabhängig kann aus diesem Wert das Potenzial zur Energieaufnahme bzw. -rückspeisung zu jedem beliebigen Zeitpunkt t abgeleitet werden.

$$SOC_{Fzg}(t) = SOC_{Fzg}(t_0) + \left[\left(\int_{t_0}^t (FV * ZS(t)) dt \right) + \sum_{t_0}^t E_{Laden} - \sum_{t_0}^t E_{Entladen} \right] * \frac{1}{\eta}$$

SOC: Ladestand (State of Charge) [kWh]

FV: Fahrzeugverbrauch [kWh/km]

ZS: Zurückgelegte Strecke [km]

E: Energie [kWh] – *Parkexterne Ladevorgänge bedürfen einer gesonderten Betrachtung, wurden hier vereinfacht aber mit parkinternen Ladevorgängen zusammengefasst.*

η : Wirkungsgrad Gesamtsystem (Ladesäule und Batterie) – *Der Wirkungsgrad des Ladevorgangs unterscheidet sich vom Wirkungsgrad des Entladevorgangs, wurde hier vereinfacht aber als identisch unterstellt.*

Die Anzahl der Branchen, für welche Fuhrparkgrößen und Mobilitätsbedarfe erhoben werden, erhöht die Übertragbarkeit des Konzepts auf andere Gewerbeparks.

2.3 Projektstand

Derzeit wird der Bebauungsplan für das Gebiet fertiggestellt. Erste erneuerbare Energieerzeugungsanlagen sowie eine zentrale Stromtankstelle wurden installiert. Der parkeigene BEV-Fuhrpark wurde mit vier Fahrzeugen ausgerüstet, welche derzeit am Standort genutzt und energetisch ausgewertet werden. Die infrastrukturelle Erschließung soll im Sommer 2015, die Ansiedlung von Unternehmen im Herbst 2015 beginnen.

Im Moment werden die Fuhrparkgrößen und Mobilitätsbedarfe relevanter Branchen analysiert und in die Entwicklung des Energiemanagements eingespeist. Die Parkplanung und -entwicklung wird durch qualitative und quantitative sozialwissenschaftliche Begleitforschung evaluiert um einerseits die Akzeptanz des Konzepts zu erhöhen und andererseits den Aspekt der Übertragbarkeit auf andere Gewerbeparks – in Neubau und Bestand – zu gewährleisten.

2.4 Förderhinweis

Das Projekt eCar-Park Sindelfingen wird gefördert von der Bundesregierung im Rahmen des Förderprogramms Schaufenster Elektromobilität und vom Umweltministerium Baden-Württemberg.

3 Diskussion

Im Rahmen des Projekts ist auch die Quantifizierung des möglichen Kostenvorteils für den Fahrzeughalter ein Ziel. Dieser Aspekt wird als ein zentraler Hebel zur weiteren Verbreitung der Elektromobilität angesehen [5]. Hier stehen derzeit rechtliche bzw. steuerliche Regelungen entgegen, weshalb Handlungsempfehlungen für eine bestmögliche Umsetzung von Vehicle-to-Grid Konzepten erarbeitet werden.

Im eCar-Park Sindelfingen werden elektromobilitätsbedingte ökonomische sowie ökologische Verbesserungen erarbeitet und quantifiziert, welche das Beschaffungswesen von Unternehmen maßgeblich beeinflussen und so den Markthochlauf der Elektromobilität stärken könnten. Zudem könnten auch privaten Nutzern neue Anreize zur Anschaffung von BEV entstehen, indem die fahrzeugspezifischen Kostennachteile durch Speichernutzungsentgelte reduziert und die Batterielebensdauer durch (Ent-)Lademanagement erhöht werden sollen.

Derzeit ist das bidirektionale Laden von Elektrofahrzeugen nicht am Markt etabliert. Erste Großversuche, das Potenzial der Elektromobilität als Pufferspeicher in Smart Grids zu beschreiben, laufen bspw. an der BTU Cottbus-Senftenberg (Projekt "Smart Capital Region"), wo die Rückspeisung mit eigens entwickelten BEV und Ladesäulen verwirklicht wurde. Im eCar-Park Sindelfingen sollen deutlich größere Kapazitäten installiert und in tragfähige ökonomische Strukturen überführt werden. Der Umsetzung in Form eines Gewerbeparks kommt dabei die räumlich klare Abgrenzung zugute. Am Standort selbst ist die Besitzerstruktur zuträglich, die eine ganzheitliche Umsetzung aus einer Hand ermöglicht.

Darüber hinaus ist die Integration von Batteriewechselsystemen denkbar. Erste Unternehmen konnten sich hiermit bereits am Markt etablieren. Nutzfahrzeuge sind dabei mit Batterien ausgestattet, welche an Batteriewechselstationen mit relativ geringem Aufwand gegen volle Batterien ausgetauscht werden können. Satelliten-Wechselstationen in der weiteren Umgebung des eCar-Parks könnten den elektromobilen Radius ideal erweitern. Gleichzeitig hätte das Energiemanagement des eCar-Parks Zugriff auf einen relativ großen, teilweise stationären Speicher.

Integrierte Mobilität bedeutet perspektivisch auch die Substitution von Fahrten, die nicht zwingend mit Pkw vorgenommen werden müssen, durch Fahrten mit Fahrrädern, Pedelecs und Lastenrädern. Diese teilweise elektrischen Mobilitätslösungen können aufgrund der geringen Batteriekapazitäten nicht sinnvoll als Pufferspeicher integriert werden. Ihre Nutzung kann aber dazu führen, dass BEV länger an der Ladesäule stehen, was dem Energiemanagement entgegen kommt.

Literatur

- [1] E.A. Lowe, *Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries*, Oakland: Indigo Development, 2001.
- [2] L. Saikku, *Eco-Industrial Parks – A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi*, University of Tampere: Research Institute of Social Sciences, 2006.
- [3] F. Boons und M.A. Janssen, "The Myth of Kalundborg: Social Dilemmas in stimulating Eco-Industrial Parks", in *Economics of Industrial Ecology: materials, structural change, and spatial change*, (J.C.J.M. van den Berg und M.A. Janssen, eds.), 235-247, 2004
- [4] W. Sierzchula, "Factors influencing fleet manager adoption of electric vehicles", in *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (H.O. Gao, K. Button, eds.), 31, 126-134, 2014
- [5] M. Grausam, W. Rid et al., "Elektromobilität in Flotten. Handlungsleitfaden.", Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, Hrsg.). Berlin, 2015
- [6] B. Lunz et al., "Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs" in *Energy Policy* (S.P.A. Brown ed.), 46, 511-519, 2012
- [7] C. Weiss et al., "Capturing the usage of the German car fleet for a one year period to evaluate the suitability of battery electric vehicles – a model based approach", in *Transportation Research Procedia* 1, 133-141, 2014



regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

„Und wenn das Auto elektrisch wäre?“ Zur prägenden Wirkung von Mobilitätsleitbildern bei Familien

Uta Schneider

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Str. 48,
76139 Karlsruhe, E-Mail: uta.schneider@isi.fraunhofer.de

Keywords: Elektromobilität, Akzeptanz, Mobilitätsverhalten

Ausgangslage und Ziel der Untersuchung

Die Bedeutung von Mobilität nimmt in globalisierten Gesellschaften weiter zu und die Menschen sehen sich gestiegenen Mobilitätsanforderungen gegenüber, was insbesondere auf die Gruppe der Familien zutrifft. Familien stellen insofern eine Gruppe dar, die im Alltag häufig auf das Auto zurückgreift. Aber auch in der Gesamtgesellschaft hat das Auto als Verkehrsmittel eine besondere Stellung erlangt und dominiert die Alltagsmobilität (vgl. infas und DLR 2010). Dies weist auf die hohe Stabilität des automobilen Leitbildes im Sinne des Universalfahrzeugs hin; das heißt, (potentielle) NutzerInnen möchten mit dem Auto verschiedene Arten von Fahrten erledigen können.

Autofahren ist jedoch mit negativen Konsequenzen für die Umwelt verbunden, wie CO₂-Emissionen, Lärm- und Feinstaubbelastungen. Familien könnten anstreben, ihre Autonutzung zu reduzieren, um eine lebenswerte Umwelt für nachfolgende Generationen zu erhalten. Die Technologie Elektromobilität könnte für die Familien hier die Möglichkeit bieten, den Bedarf nach Automobilität mit dem Wunsch nach Umweltfreundlichkeit zu vereinbaren.

Dieser Beitrag untersucht im Rahmen einer empirischen Untersuchung die Frage, wie autobezogene Leitbilder in Familien ausgehandelt und in der Alltagspraxis umgesetzt werden. Zudem wird der Frage nachgegangen, wie die Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen mit den autobezogenen Leitbildern in Familien kompatibel ist.

Forschungsstand und theoretischer Rahmen

Familien haben im Vergleich zu anderen Bevölkerungsgruppen erhöhte Mobilitätsanforderungen zu bewältigen, was u.a. durch eine zunehmende Berufstätigkeit von Müttern (vgl. Bundesministerium für Familie 2012) und gestiegene Wertvorstellungen zur optimalen Förderung und Erziehung der Kinder (vgl. Heine und Mautz 1999) bedingt ist. Infolgedessen legen Familien im Alltag mehr Wege als andere Bevölkerungsgruppen zurück (vgl. Nobis und Lenz 2005). Der Pkw stellt in diesem Kontext ein Verkehrsmittel dar, das für Familien eine wichtige Rolle spielt aufgrund der verschiedenen Zwecke, die es erfüllen kann. Dies resultiert in einer höheren Pkw-Verfügbarkeit und -Nutzung von Familien im Vergleich zu anderen Bevölkerungsgruppen, was auch für Großstädte zutrifft (vgl. Ahrend und Herget 2012; Follmer und Nobis 2009).

Gleichzeitig könnten sich aufgrund der gestiegenen Bedeutung von Nachhaltigkeit in der Gesellschaft Leitbilder und Wertorientierungen zur Reduktion der Autonutzung mehr und mehr verbreiten. Die Umsetzung dieser Leitbilder in der Alltagspraxis kann jedoch für Familien aufgrund ihrer hohen Mobilitätsanforderungen eine Herausforderung darstellen. Zudem stehen diesen autobezogenen Wertorientierungen Vorstellungen einer „guten Mutter“ gegenüber, welche für die alltägliche Autonutzung verantwortlich sein können (vgl. Dowling 2000). Das heißt, Mütter können mit ihrer Autonutzung das Ermöglichen einer guten Bildung und Betreuung für ihre Kinder assoziieren (vgl. ebd.). Zudem stellt sich die Frage nach der familieninternen Aushandlung dieser autobezogenen Wertorientierungen und deren Umsetzung im Alltag. Denn wie die Forschung zeigt, unterliegt die Familienmobilität im Alltag einer Vielzahl von Aushandlungsprozessen, wie bspw. zum Zugang zum Pkw (vgl. Scheiner und Holz-Rau 2012).

Hier könnte die neue Technologie Elektromobilität für Familien die Möglichkeit bieten, den Bedarf nach motorisierter Individualmobilität mit dem Wunsch nach nachhaltiger Alltagsmobilität zu vereinbaren. Denn Elektrofahrzeuge werden in der Bevölkerung als umweltfreundliche Technologie wahrgenommen (vgl. Egbue und Long 2012). Auch die hohe Verfügbarkeit über Pkw in Familienhaushalten kann eine Chance für die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen darstellen; so sind Haushalte mit mehr als einem Pkw offener gegenüber Elektromobilität als solche mit nur einem Auto (vgl. Gärling 2001).

Weil die Mehrheit der VerbraucherInnen noch keine eigenen Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen gesammelt hat, sind die Bewertungen elektrischer Fahrzeuge geprägt vom Leitbild des Autos als Universalfahrzeug (vgl. Zimmer und Rammler 2011). Dieses Leitbild beinhaltet die Vorstellung eines Fahrzeugs, mit dem verschiedenste Transport- bzw. Mobilitätsbedürfnisse befriedigt werden können (vgl. Canzler und Knie 1994). Neben diesen instrumentellen werden auch symbolische Bedürfnisse, wie Unabhängigkeit, Flexibilität oder Selbstdarstellung mit der Autonutzung verbunden (vgl. Burkart 1994). Elektrofahrzeuge sind aus Verbrauchersicht hinsichtlich dieser Aspekte konventionellen Fahrzeugen unterlegen (vgl. Zimmer und Rammler 2011); aus Sicht von Familien stellen vor allem der hohe Anschaffungspreis (vgl. Fornahl et al. 2011) sowie die geringe Reichweite und die zum Teil geringe Transportkapazität Barrieren für den Kauf dar (vgl. Gärling 2001).

Das zuvor beschriebene Leitbild des Automobils ist Bestandteil des theoretischen Rahmens der in diesem Beitrag dargestellten Untersuchung. Dieser stellt das Leitbild-Konzept aus der sozialwissenschaftlichen Technikforschung (vgl. Dierkes et al. 1992) dar. Leitbilder werden als längerfristig geltende kollektive Orientierungsmuster bzgl. wünschbarer und machbarer Techniken oder technischer Zukünfte definiert. Sie können sich auf die Ausgestaltung (technische Leitbilder) oder die Nutzung einer Technik (kulturelle Leitbilder) beziehen und prägen das Denken und Handeln ihrer TrägerInnen (vgl. Giesel 2007).

Forschungsfragen und methodisches Vorgehen

Die in diesem Beitrag präsentierte Studie analysiert die folgenden Forschungsfragen:

1. Welche kulturellen Leitbilder teilen Familien zu Automobilität, wie werden diese praktiziert und in den Familien ausgehandelt?
2. Welche Leitbilder teilen Familien zu Elektromobilität und wie werden diese in den Familien ausgehandelt?

Um diese Forschungsfragen zu beantworten, wurden bei 22 Familien (42 Elternteilen) in drei baden-württembergischen Großstädten (Freiburg, Karlsruhe und Stuttgart) Mobilitätstagebücher über eine Woche erhoben. Damit wird das alltägliche Mobilitätsverhalten der Familien erfasst. Anschließend wurden leitfadengestützte Paar- und Familieninterviews durchgeführt, um Leitbilder zu Autos und Elektroautos bei den Familien zu identifizieren.⁵ Diese kollektive Erhebungsform ermöglicht es, Interaktionen und Aushandlungsprozesse zwischen den Familienmitgliedern zu analysieren. Die Interviews wurden mit einer Kombination aus qualitativer Inhaltsanalyse und Sequenzanalyse ausgewertet.

Je sieben Familien im Sample leben in Freiburg und Stuttgart und acht in Karlsruhe. Bezüglich der Familienformen dominiert die „Normalfamilie“ (Peuckert 2004), d.h. zwei Elternteile leben mit ihren leiblichen Kindern in einem Haushalt. Daneben haben zwei alleinerziehende Mütter und eine Stieffamilie an der Studie teilgenommen. Die Hälfte, elf Familien, hat nur Schulkinder, d.h. keine Kinder unter sechs Jahren, im Haushalt, während die andere Hälfte (auch) jüngere Kinder hat. Das Sample weist ein relativ hohes Bildungsniveau auf (40 der 42 Elternteile haben einen (Fach-)hochschulabschluss) und die meisten Familien verfügen über ein hohes oder mittleres Haushaltseinkommen. Zudem besitzen die meisten Familien einen oder zwei Pkw im Haushalt; demgegenüber bewältigen sechs Familien ihre alltägliche Mobilität ohne ein eigenes Auto. Damit sind autolose Familienhaushalte in der vorliegenden Untersuchung im Vergleich zur Gesamtbevölkerung überrepräsentiert. Dies zeigt der Vergleich mit dem Anteil von Familien ohne Auto in Deutschland, welcher zwischen zwei und drei Prozent liegt (vgl. infas und DLR 2010).

Diese speziellen Samplemerkmale – ein hohes Bildungsniveau und der hohe Anteil autoloser Familien – können möglicherweise mit einem hohen Umweltbewusstsein der teilnehmenden Familien assoziiert sein. Bei der Rekrutierung der UntersuchungsteilnehmerInnen spielte in den dazu bereitgestellten Informationen ein nachhaltiges Mobilitätsverhalten und die Technologie Elektromobilität eine Rolle. Dies kann möglicherweise insbesondere umweltbewusste Familien angesprochen haben. Weil diese Studie nicht das Ziel verfolgt, die Bevölkerung abzubilden, sondern an zukünftigen Mobilitätskonzepten und -technologien Interessierte zu untersuchen, stellen diese Selbstselektionseffekte keinen Nachteil dar.

⁵ Insgesamt wurden 15 Paarinterviews, vier Familieninterviews (Kinder nahmen aktiv am Interview teil) und drei Einzelinterviews durchgeführt. Die Interviews fanden i.d.R. bei den Familien zuhause statt und dauerten zwischen 45 Minuten und 2,09 Stunden.

Ergebnisse: Typen der leitbildorientierten Autonutzung

Das Ergebnis der empirischen Untersuchung stellt eine Typologie dar. Diese wurde mittels eines Merkmalsraums mit zwei Vergleichsdimensionen konstruiert. Die Typenbildung wurde vorgenommen, um einen Überblick über die teilnehmenden Familien zu erhalten sowie um inhaltliche Sinnzusammenhänge aufdecken zu können. Die Vergleichsdimensionen stellen das Ausmaß der Autonutzung bei beiden Elternteilen (Ergebnis der Mobilitätstagebücher) und die Existenz kultureller Leitbilder zur Autonutzung (Ergebnis der Interviews)⁶ dar. Es wurden drei Typen der leitbildorientierten Autonutzung gebildet:

- Typus 1: Die pragmatisch Automobilen
- Typus 2: Die Autovermeider
- Typus 3: Die ambivalenten Autonutzer

Die folgende Abbildung veranschaulicht das Ergebnis der Typenbildung (Abbildung 1).

Typus 1: Die pragmatisch Automobilen (N=6 Familien):		Typus 2: Die Autovermeider (N=7 Familien):		Typus 3: Die ambivalenten Autonutzer (N=8 Familien):	
Tatsächliche Autonutzung	↓	Tatsächliche Autonutzung	↓	Tatsächliche Autonutzung	→
Kein Pkw im Haushalt	3 Familien	Kein Pkw im Haushalt	3 Familien	Kein Pkw im Haushalt	-
Autobezogene Leitbilder	-	Autobezogene Leitbilder	√	Autobezogene Leitbilder	√
Autobezogene Aushandlungen	-	Autobezogene Aushandlungen	-	Autobezogene Aushandlungen	√

Abbildung 1: Typen der leitbildorientierten Autonutzung (tatsächliche Autonutzung: ↓ = durchschnittliche Autonutzung der Familien in diesem Typus liegt unter 20 Prozent, was als niedrige Autonutzung definiert wurde; → = durchschnittliche Autonutzung der Familien in diesem Typus liegt zwischen 20 und 40 Prozent, was als mittelhohe Autonutzung definiert wurde).

Eine der Familien ließ sich nicht den drei Typen zuordnen, weshalb dieser Fall in der weiteren Analyse nicht mehr berücksichtigt wurde.

Typus 1 umfasst Familien, in denen keine Leitbilder zur Autonutzung geteilt werden; gleichzeitig nutzen beide Elternteile das Auto wenig. Drei dieser Familien besitzen kein Auto und sind Mitglied in Carsharing-Organisationen. Leitbilder zur Vermeidung der Autonutzung werden nicht geteilt. Vielmehr wählen diese Familien flexibel und pragmatisch aus dem Angebot verschiedener Verkehrsmittel aus. Insofern sind keine Aushandlungen in Bezug auf die Autonutzung aufgetreten.

⁶ Diese kulturellen Leitbilder zur Autonutzung wurden in den Interviews mit der Sequenzanalyse herausgearbeitet. Einen Zwischenschritt stellte dabei die Identifikation von Werten zur Autonutzung dar. Strenggenommen kann erst von einem Leitbild gesprochen werden, wenn dieses auch in Handlungen sichtbar ist (Dimension der Auswirkungen auf das Denken und Handeln).

In den Familien des Typus 2 „Die Autovermeider“, wird die Wertvorstellung verfolgt, die Autonutzung im Alltag möglichst zu vermeiden. Das Motiv für dieses Leitbild bildet bei vielen Familien der Umweltschutz. Die meisten dieser Familien setzen dieses Leitbild auch in ihrer alltäglichen Mobilität um, d.h. das Auto wird von beiden PartnerInnen im Alltag eher wenig genutzt. Drei Familien in diesem Typus besitzen kein Auto, wovon zwei Car-sharing nutzen. Aushandlungen zur Autonutzung und autobezogenen Werten traten nur bei einer der hier untersuchten Familien auf. In dieser autolosen Familie handelten die Eltern aus, wie eine vorstellbare Autonutzung in der Zukunft, bedingt durch zunehmende Kinderaktivitäten, mit den Wertvorstellungen vereinbart werden könne.

Familien des Typus 3, „Die ambivalenten Autonutzer“, teilen ebenfalls das kulturelle Leitbild, die Autonutzung aus Gründen des Umweltschutzes zu reduzieren. Gleichzeitig ist aber der Umfang der Autonutzung zwischen beiden PartnerInnen unterschiedlich, d.h. ein Elternteil setzt dieses Leitbild im Alltag nicht oder nur teilweise um. Diese höhere Autonutzung ist mit dem Pkw-Besitz assoziiert, d.h. in diesem Typus gibt es keine Familie ohne eigenen Pkw im Haushalt. Aufgrund der Diskrepanz zwischen den Leitbildern und dem tatsächlichen Verhalten ist für diesen Typus ein hohes Potenzial für Aushandlungen festzustellen, die sich auf die Umsetzung autobezogener Werte und Leitbilder beziehen. Dies trifft insbesondere auf Familien zu, welche eine im Vergleich zu den anderen Familien in diesem Typus hohe Autonutzung aufweisen.

Die Typenbildung zeigte, dass die meisten teilnehmenden Familien das kulturelle Leitbild verfolgen, ihre Autonutzung im Alltag zu reduzieren. Die Leitbilder zur Autonutzung entsprechen bei der Mehrheit der Familien auch der Alltagspraxis, denn das Auto wird mit einem Anteil von 23 Prozent an allen Wegen (FahrerIn und MitfahrerIn)⁷ eher wenig genutzt. Dies zeigt die folgende Grafik (Abbildung 2), in der der Modal Split⁸ der Familien dargestellt ist. Das am häufigsten genutzte Verkehrsmittel ist in Freiburg und Karlsruhe das Fahrrad; dies trifft sowohl für Familien mit als auch ohne Auto im Haushalt zu. In Stuttgart wird demgegenüber am häufigsten zu Fuß gegangen, was ebenfalls für beide Haushaltformen zutrifft. Das Auto erreicht Anteile zwischen vier und 35 Prozent an allen in einer Woche zurückgelegten Wegen. Diese niedrige Autonutzung steht im Widerspruch zu Forschungsergebnissen zur Familienmobilität in Deutschland; so legen Haushalte in Kernstädten mit mindestens einem Kind 60 Prozent der Wege mit dem Auto zurück (vgl. Ahrend und Herget 2012).

⁷ Wenn im weiteren Verlauf dieses Papiers von der Autonutzung gesprochen wird, sind damit immer Wege, die als FahrerIn oder als BeifahrerIn zurückgelegt werden, gemeint.

⁸ Bei der Errechnung des Modal Split wird ermittelt, für wie viel Prozent der in der dokumentierten Woche zurückgelegten Wege welches Verkehrsmittel (Hauptverkehrsmittel) genutzt wurde.

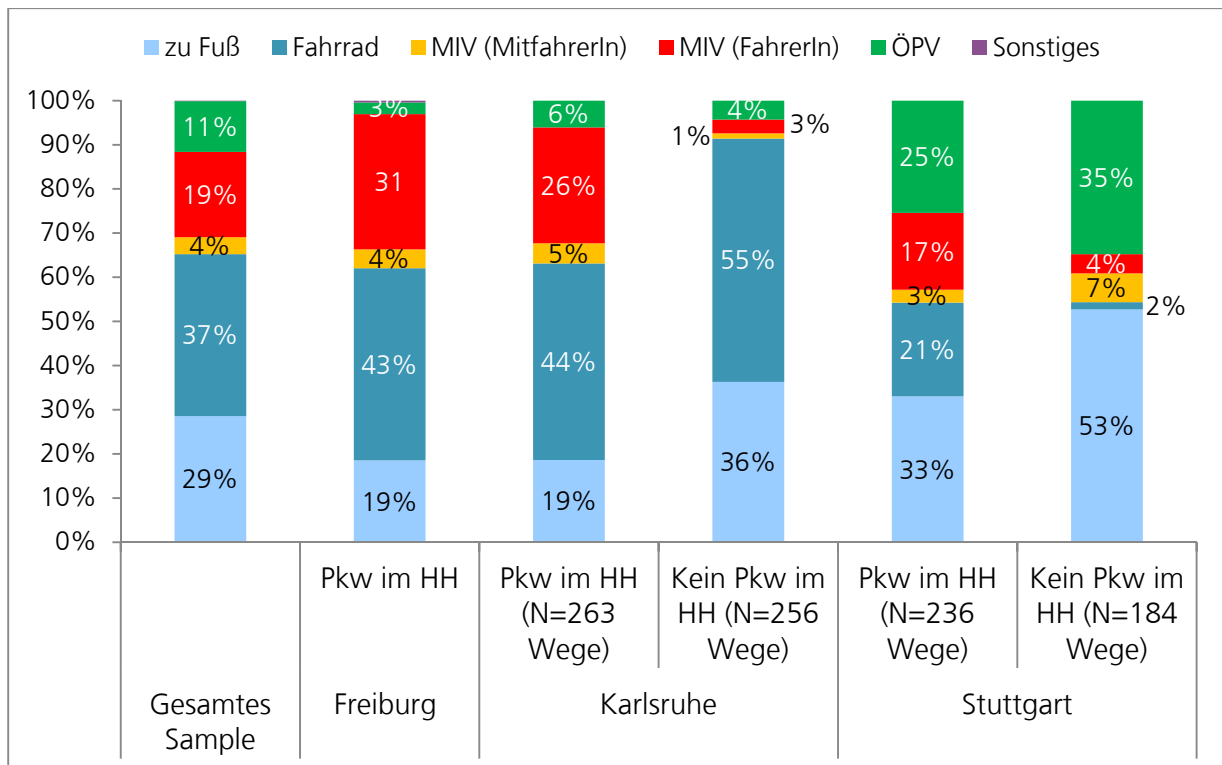


Abbildung 2: Modal Split differenziert nach dem Wohnort und der Pkw-Verfügbarkeit (in Freiburg verfügen alle teilnehmenden Familien über mindestens einen Pkw im Haushalt)

Abbildung 2 weist zudem auf einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Wohnort der Familien und der Autonutzung hin. Dies bestätigen Chi-Quadrat-Unabhängigkeit-Tests⁹: Familien in Freiburg und Karlsruhe nutzen das Auto signifikant häufiger als in Stuttgart (sofern nur Familien mit mindestens einem Pkw im Haushalt betrachtet werden) ($p < 0,00$, $\chi^2 16,013$, $df=2$).

Der Umfang der Autonutzung im Alltag hängt zudem auch von weiteren Personen- bzw. Haushaltsmerkmalen ab, wie dem Alter der Kinder (Haushalte mit ausschließlich Schulkindern nutzen das Auto häufiger als Haushalte, die (auch) jüngere Kinder haben) ($p < 0,05$, $\chi^2 5,502$, $df=1$) und dem Geschlecht (Väter nutzen das Auto häufiger als Mütter) ($p < 0,05$, $\chi^2 6,007$, $df=1$).

Die Autonutzung von Familien ist nicht nur vom Wohnort oder von Personen- bzw. Haushaltsmerkmalen abhängig, sondern diese unterliegt in den Familien einer Reihe von Aushandlungsprozessen. Dies stellt ein weiteres wichtiges Resultat der Typenbildung dar.

⁹ Der Chi-Quadrat-Test wird eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen zwei nominalen bzw. dichotomen Variablen statistisch zu untersuchen (vgl. Bortz und Schuster 2011). Die Null-Hypothese lautet dabei, dass zwei Variablen keinen Zusammenhang aufweisen, d.h. unabhängig voneinander sind. Bei großen Differenzen zwischen erwarteten und tatsächlichen Häufigkeiten, worüber die Prüfgröße χ^2 Auskunft gibt, wird die Nullhypothese verworfen (vgl. ebd.). Dafür muss geprüft werden, ob das Ergebnis signifikant ist. Das Signifikanzniveau α wird hier mit 0,05 ($p=0,05$) angesetzt. Df bezeichnet die Freiheitsgrade, welche die Parameter der Chi-Quadrat-Verteilung darstellen.

Das heißt, die Familien handeln aus, wie sie ihre autobezogenen Werte in der Alltagspraxis der Verkehrsmittelnutzung umsetzen. So sind das Ausmaß und die Art der Aushandlungen u.a. abhängig von den Unterschieden hinsichtlich der Autonutzung zwischen beiden PartnerInnen (größere Unterschiede hängen mit stärkeren Aushandlungen zusammen, wie der Vergleich von Typus 2 und 3 zeigt), vom Vorhandensein von autobezogenen Leitbildern (die Existenz von Leitbildern hängt mit stärkeren Aushandlungen zusammen, wie der Vergleich von Typus 1 mit Typus 2 und 3 zeigt) sowie teilweise vom Umfang der tatsächlichen Autonutzung (eine höhere alltägliche Autonutzung hängt in Typus 3 mit stärkeren Aushandlungen zusammen)

Ergebnisse: Leitbilder zu Elektromobilität

Die hohen Mobilitätsanforderungen von Familien könnten im Alltag eine Herausforderung für den Wunsch, die Autonutzung zu reduzieren, darstellen. Dies kann möglicherweise insbesondere für Typus 3, die ambivalenten Autonutzer, zutreffen. Hier könnte die Technologie Elektromobilität für die Familien eine interessante Alternative bieten, um im Alltag nachhaltig mobil sein zu können. Insofern stellt sich die Frage, welche Leitbilder bzgl. Elektroautos die Familien verfolgen und inwiefern deren Existenz mit den Typen der leitbildorientierten Autonutzung zusammenhängt. Aus den Interviews konnten vier Leitbilder – zwei technische (Ausgestaltung einer Technik) und zwei kulturelle (Nutzung einer Technik) – bei den Familien identifiziert werden:¹⁰

- Technisches Leitbild vom Elektroauto als vollwertiger Ersatz des konventionellen Autos
- Technisches Leitbild vom umweltfreundlichen Elektroauto
- Kulturelles Leitbild vom Elektroauto als Stadtfahrzeug
- Kulturelles Leitbild einer bewussten Autonutzung bzw. Energieverbrauch

Das technische Leitbild vom Elektroauto als vollwertiger Ersatz des konventionellen Autos wird von allen drei Typen der leitbildorientierten Autonutzung geteilt. Die Familien wünschen eine Angleichung der technischen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen an konventionelle, womit die Stabilität des Leitbildes des Automobils als Universalfahrzeug verdeutlicht wird. Das heißt, ein Auto bzw. Elektroauto soll verschiedenste Mobilitätsbedürfnisse befriedigen. Damit bildet das Leitbild des Autos als Universalfahrzeug die Referenz für die Bewertung von Elektrofahrzeugen (vgl. auch Dierkes und Rammler 2001). Dies verdeutlicht das folgende Zitat:¹¹

¹⁰ Die Leitbilder zu Elektrofahrzeugen wurden ebenso wie die Leitbilder zu Autos auf Grundlage der sequenzanalytischen Auswertungen herausgearbeitet. Die Dimension der Wunsch- und Machbarkeit von Leitbildern wurde in den Interviewäußerungen über das Vorhandensein von normativen Elementen im Kontext der Bewertung von Elektroautos operationalisiert sowie über Äußerungen, die eine perspektivische Einschätzung, wann der erwünschte Zustand für erreicht bzw. erreichbar gehalten wird, enthalten. Für die Operationalisierung der Dimension der kollektiv geteilten Vorstellung, ebenfalls Bestandteil des Leitbild-Konzepts, ist es wichtig, dass ein Leitbild bei mehreren Personen identifiziert wird. Die Auswirkungen auf das Denken und Handeln der Leitbild-TrägerInnen können bspw. über das tatsächliche Mobilitätsverhalten analysiert werden.

¹¹ In den wörtlichen Zitaten aus den Interviews stellen kursiv geschriebene Begriffe Wörter dar, die die Interviewten besonders betonten. Drei Punkte stellen kurze Sprechpausen dar.

„Aber ein reines Elektroauto, da würde uns die Reichweite gar net ausreichen. ... [...] damit kommen wir halt dann nicht zu den Großeltern oder so. Von daher... So ein *Hybrid* oder so was würd' uns dann wahrscheinlich eher... ähm eher nutzen. Weil wir dann nicht *nur* ein Auto für die Stadt hätten, einfach.“
(P14, Typus 2, Mutter)

Auch das technische Leitbild vom umweltfreundlichen Elektroauto findet sich bei allen drei Typen. Hier müssen gewisse technische Voraussetzungen erfüllt werden, wie bspw. die Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energien. Momentan scheint die Umweltfreundlichkeit aus Sicht vieler Familien bei Elektrofahrzeugen jedoch nicht gegeben zu sein, weswegen diese abgelehnt werden. Zudem wünschen sich die Familien die Bereitstellung von wahrheitsgemäßen Informationen über die Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen.

Bei den kulturellen Leitbildern, d.h. solchen, die sich auf die Nutzung von Elektrofahrzeugen beziehen, wurde ersichtlich, dass Elektrofahrzeuge von Typus 1 und 3 als ideale Fahrzeuge für die Stadt bewertet wurden. Die kürzeren Wege in der Stadt lassen sich aus Sicht der Familien mit Elektrofahrzeugen gut bewältigen.

Einige Familien sehen Elektromobilität jedoch nicht als wirkliche Lösung der Probleme im Verkehrssektor an, sondern die Lösung liegt aus ihrer Sicht in einer Änderung des individuellen Nutzerverhaltens. Dies stellt das kulturelle Leitbild einer bewussten Autonutzung bzw. eines sorgsamen Energieverbrauchs dar und konnte in Typus 2 und 3 identifiziert werden; d.h. in den Familien, denen Werte zur Vermeidung der Autonutzung wichtig sind. Das folgende Zitat veranschaulicht dieses Leitbild:

„Also *eben*, ich denk letztendlich, ... natürlich macht's Sinn, ... mhhh, Fahrzeuge zu kaufen, die *wenig* verbrauchen, sei es jetzt Strom oder Benzin. Aber am meisten hilft es halt einfach, es *wenig* zu nutzen [...]“ (P4, Typus 2, Mutter)

Bei der Identifikation von Leitbildern zu Elektromobilität zeigte sich ein Zusammenhang mit den drei gebildeten Typen. Insbesondere Typus 2 und 3 teilen kulturelle Leitbilder, die sich auf ein nachhaltiges Mobilitätsverhalten beziehen; technische Leitbilder sind hingegen in allen drei Typen vertreten.

Insgesamt zeigte sich, dass der Großteil der Familien der Elektromobilität noch skeptisch gegenüber steht. Obwohl viele Familien das Leitbild der Vermeidung der Autonutzung teilen, wünschen sie sich von einem Elektroauto doch die gleichen technischen Eigenschaften wie von konventionellen Fahrzeugen. Zusätzlich sollen Elektrofahrzeuge auch umweltfreundlich sein. Da genau diese Eigenschaft aber von vielen angezweifelt wird, kann die These, dass Familien Elektrofahrzeuge als ideale Kombination aus den Vorteilen der Individualmobilität und umweltverträglicher Mobilität ansehen, nicht bestätigt werden. Des Weiteren konnten nur wenige Aushandlungen und Interaktionen in den Familien im Kontext der Bewertung von Elektrofahrzeugen ermittelt werden. Möglicherweise ist die neue Technologie Elektromobilität noch nicht wirklich in der familialen Lebenswelt angekommen.

Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die teilnehmenden Familien im Alltag nachhaltig mobil sind, was möglicherweise auch im Zusammenhang mit den spezifischen Samplemerkmalen (hohes Bildungsniveau und hoher Anteil autoloser Haushalte) steht. Der Wohnort in Großstädten und ein dementsprechend großes Angebot an Alternativen erlaubt es selbst Familien, die hohen Mobilitätsanforderungen ausgesetzt sind, im Alltag häufig auf das Auto zu verzichten. Dieses weitgehend autofreie Mobilitätsverhalten geht bei der Mehrheit der Familien mit kulturellen Leitbildern zur Vermeidung der Autonutzung einher. Das bedeutet, die Familien streben an, ihre bereits geringe Autonutzung weiter zu reduzieren. Die Umsetzung dieses Leitbildes unterliegt im Familienalltag jedoch teilweise Aushandlungsprozessen, insbesondere in Typus 3.

Diesem Leitbild liegt in vielen Fällen der Umweltschutz als Werthaltung zugrunde. Gerade weil viele teilnehmende Familien umweltbewusst sind, hinterfragen sie die propagierten Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen sehr genau. Aus ihrer Sicht sind Elektrofahrzeuge per se nicht umweltfreundlicher als konventionelle Fahrzeuge. Insofern sind viele Familien der Meinung, Elektrofahrzeuge stellen nicht die alleinige Lösung für die Verkehrsprobleme dar. Trotz dieser hohen Nachhaltigkeitsorientierung zeigte sich auch bei diesen Familien eine Dominanz des Leitbildes des Autos als Universalfahrzeug: Elektroautos sollen möglichst die gleichen technischen Eigenschaften wie konventionelle Fahrzeuge aufweisen (und zusätzlich umweltfreundlich sein), damit sie vielseitig einsetzbar sind. Neue Leitbilder im Sinne einer Auswahl von Fahrzeugen je nach Fahrtzweck, wie es bei Carsharing möglich ist, teilen bislang nur wenige Familien. Möglicherweise erwarten die Familien – gerade weil sie das Auto für ihre Alltagsstrecken nur wenig nutzen und eher eine geringe Pkw-Ausstattung aufweisen – eine vielseitige Einsetzbarkeit und hohe Flexibilität von einem Fahrzeug, damit dies für den Einsatz auf nicht-alltäglichen Fahrten geeignet ist.

Literatur

- Ahrend, Christine; Herget, Melanie (Hg.) (2012): Umwelt- und familienfreundliche Mobilität im ländlichen Raum. Handbuch für nachhaltige Regionalentwicklung. Technische Universität Berlin. Berlin.
- Bortz, Jürgen; Schuster, Christof (2011): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Lehrbuch mit Online-Materialien. 7. Aufl.. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bundesministerium für Familie, Senioren Frauen und Jugend (2012): Familienreport 2012. Leistungen, Wirkungen, Trends. 1. Auflage. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bmfsfj.de/RedaktionBMFSFJ/Broschuerenstelle/Pdf-Anlagen/Familienreport-2012,property=pdf,bereich=bmfsfj,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- Burkart, Günter (1994): Individuelle Mobilität und soziale Integration. Zur Soziologie des Automobilität. In: Soziale Welt 45, S. 216–240.
- Canzler, Weert; Knie, Andreas (1994): Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. 1. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller.
- Dierkes, Meinolf; Hoffmann, Ute; Marz, Lutz (1992): Leitbild und Technik. Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen. Berlin: edition sigma.
- Dowling, Robyn (2000): Cultures of mothering and car use in suburban Sydney: a preliminary investigation. In: Geoforum 31, S. 345–353.
- Egbue, Ona; Long, Suzanna (2012): Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. In: Energy Policy 48, S. 717–729. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.06.009.
- Follmer, Robert; Nobis, Claudia (2009): Generation Auto? Aktuelle Ergebnisse zur Kindermobilität. Präsentation auf dem Kinderkongress 2009. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung. Online verfügbar unter http://www.agfs-nrw.de/cipp/agfs/lib/pub/object/downloadfile,lang,1/oid,4479/ticket,guest/~/~Vortrag_Follmer_Kinderkongress_2009.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2013.
- Fornahl, Dirk; Meier-Dörzenbach, Christiane; Santner, Dominik; Werner, Noreen; Kahle, Sarai; Bensler, Alexandra (2011): Mobilitätsstrukturen in der Modellregion Elektromobilität Bremen / Oldenburg. Modul 4: Verkehrskonzepte und Geschäftsmodelle. Arbeitsabschnitt 2.1 Gesellschaftliche und Umfeldanalysen. CRIE Centre for Regional and Innovation Economics. Bremen.
- Gärbling, Anita (2001): Paving the Way for the Electric Vehicle. VINNOVA Rapport 2001: 1. Chalmers University of Technology.
- Heine, Hartwig; Mautz, Rüdiger (1999): Die Mütter und das Auto. PKW-Nutzung im Kontext geschlechtsspezifischer Arbeitsteilung. In: SOFI-Mitteilungen 27, S. 31–47.
- infas; DLR (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Hg. v. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung. Bonn, Berlin.
- Nobis, Claudia; Lenz, Barbara (2005): Gender Differences in Travel Patterns. Role of of Employment Status and Household Structure. In: Transportation Research Board (Hg.): Conference Proceedings 35, Volume 2: Research on Women's Issues in Transportation, S. 114–123.
- Peuckert, Rüdiger (2004): Familienformen im sozialen Wandel. 5., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: VS.
- Zimmer, Rene; Rammler, Stephan (2011): Leitbilder und Zukunftskonzepte der Elektromobilität. Hg. v. Berlin Unabhängiges Institut für Umweltfragen e.V. Institut für Transportation Design der Hochschule für Bildende Künste Braunschweig. Berlin.
- Scheiner, Joachim; Holz-Rau, Christian (2012): Gender structures in car availability in car deficient households. In: Research in Transportation Economics 34 (1), S. 16–26.

Nachhaltige Mobilitätskonzepte – Bausteine für eine Wende

M.-C. Tran¹, E. Frensemeier, J. Garde, S. Hellali-Milani, J. A. Schmidt

¹ Institut für Stadtplanung und Städtebau, Universitätsstr. 15, 45141 Essen,
E-Mail minh-chau.tran@uni-due.de

Keywords: E-Mobilität, Car-Sharing, Walkability, Radverkehr, Mobilstationen

1 Einleitung

Schadstoffbelastungen und eine ausschließlich auf das Automobil ausgerichtete Stadt- und Verkehrsentwicklung machen deutlich, dass neben den verschiedenen Innovationen im Bereich der Hardware und Software auch grundsätzliche systembezogene Veränderungen erforderlich sind. Der Zeitpunkt scheint gekommen, die räumlichen und infrastrukturellen Vorteile von Städten und Stadtregionen zu nutzen. Damit integrierte, innovative und nachhaltige Mobilitätskonzepte entstehen können, müssen vorhandene ÖPNV-Netze ausgebaut und umgestaltet werden. Doch in etlichen Städten ist das ÖPNV-Netz aus Bussen und Stadtbahnen am Rande seiner Leistungsfähigkeit. Das betrifft insbesondere innerstädtische Bereiche. Das ist ohne Zweifel die Aufgabe der Verkehrsunternehmen. Doch damit allein kann das Ziel einer integrierten stadtverträglichen und nachhaltigen Mobilität nicht erreicht werden. Mobilitätsangebote müssen die Vorteile der Stadt und die relativ kurzen urbanen Distanzen nutzen. Diese räumliche Nähe muss bewusst werden und in neue Mobilitätsmuster für die Nahmobilität überführt werden.

Nur mit integrierten Ansätzen, die den Umbau bestehender Infrastrukturen einbeziehen und multimodale Mobilitätsangebote entstehen lassen, vor allem aber in den Köpfen der Zivilgesellschaft ein neues Bild von urbaner Mobilität schaffen, kann der vielerorts immer noch zunehmende motorisierte Individualverkehr reduziert werden. Dazu wird es notwendig sein, bestehende Ansätze zu vernetzen, andere auszubauen und neue zu entwickeln. Durch eine Verknüpfung und Kombination verschiedener Mobilitätsformen können Distanzen in der Regel variabel und schnell überbrückt werden [1]. Grundlage dafür ist ein funktionierendes Netz an multimodalen Haltestellen.

Das ÖPNV-Netz bildet dabei zweifelsohne das Rückgrat eines nachhaltigen Mobilitätssystems, in dem grundsätzlich sämtliche Haltestellen und Bahnhöfe heute schon multimodal sind. Vielen dieser Haltestellen fehlt es jedoch an Qualität und Attraktivität, gerade wenn es um die Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln geht, wozu auch das zu Fuß gehen gehört. Eine repräsentative Studie des Umweltbundesamtes stellte jüngst fest, dass 82 Prozent aller Befragten für eine fahrrad- und fußgängerfreundliche Gestaltung der Städte plädieren und die Nutzung eines Autos nur hin und wieder notwendig ist [2]. Eine weitere Studie, die im Rahmen des Baukulturberichts 2014/15 erstellt wurde, verdeutlicht diesen Wunsch nach mehr Attraktivität und Qualität: 96 % der Bevölkerung in Deutschland wünschen sich eine gute Erreichbarkeit von Infrastruktureinrichtungen und für 92 % der Bevölkerung ist es (sehr) wichtig, dass Gebäude, Straßen und Plätze gut instandgehalten und gepflegt werden [3]. Es ist daher unabdingbar, Mobilitätssysteme sowie –Angebote

auf der einen und Stadtqualitäten auf der anderen Seite, nicht losgelöst voneinander zu betrachten. Mit dem Forschungsprojekt colognE-Mobil wird versucht, diesem Erfordernis gerecht zu werden. Die einzelnen Aspekte werden im Folgenden knapp erläutert.

2 E-Car-Sharing mit doppeltem Nutzen für die Stadt

Insbesondere Sharing-Systeme tragen zum Umweltschutz und zu effizienter Mobilität bei, da sie mit dem ÖPNV vernetzt werden können und auf diese Weise eine kostengünstige und ressourcenschonende Alternative zum konventionellen Pkw anbieten. Die in einigen Großstädten sichtbaren Trends wie Car-Sharing-Konzepte oder Bottom-up-Ansätze des „Teilen-statt-Besitzen“ haben eine nicht zu unterschätzende Wirkung. So konnte beispielsweise der Car-Sharing-Anbieter „Cambio“ für die Stadt Köln feststellen, dass eines ihrer Leihautos bis zu elf private Pkw ersetzen kann [4]. Gewiss ist es nicht möglich, potenziell eingesparte Flächen für den ruhenden und auch fließenden Verkehr für andere Nutzungen umzuwidmen. Doch lässt sich daraus ableiten, welch großes Potenzial dies für unsere noch teils sehr auf das Auto ausgerichteten Städte und Stadträume haben kann.

Doch solange es nur isolierte Lösungsansätze bleiben, sind die Wirkungen beschränkt. Damit eine umweltschonende und effizientere Fortbewegung in der Stadt gewährleistet werden kann, müssen ganzheitliche Ansätze entwickelt werden, die die Formen der Stadtmobilität intelligent miteinander verknüpfen. Hierbei ist es besonders wichtig, dass zum einen der ÖPNV mit den umweltfreundlichen und bewegungsförderlichen Mobilitätsformen wie dem Rad- und Fußverkehr kombiniert werden. Diese Verknüpfungsstelle wird Mobilstation genannt, an der eine möglichst hohe Anzahl von Verkehrsträgern gebündelt werden. Darüber hinaus bieten diese Stationen Raum für Car-Sharing sowie Bike-Sharing-Angebote. Im optimalen Fall können diese Fahrzeuge mit Elektromotoren ausgestattet sein, die an den Stationen aus regenerativen Energien geladen werden. Fahrzeuge, die batterieelektrisch betrieben werden, tragen zwar – sofern sie mit erneuerbaren Energien aufgeladen werden – zu einer Reduktion von Lärm- und Schadstoffemissionen bei. Doch selbst wenn alle Privatfahrzeuge mit Elektroantrieb ausgestattet und mit erneuerbaren Energien betrieben würden, führt dies nicht zu einer Reduzierung der Pkw im Stadtraum und somit auch zu keiner Entlastung der Verkehrssysteme.



Abb. 1: Blick in einen Straßenraum in Köln – E-Autos ersetzen Autos mit konventionellem Antrieb (links), E-Car-Sharing-Angebot und gleichzeitig mehr Raum für die Bewohner (rechts) © ISS

Die Flächeninanspruchnahme durch stehende und fahrende Pkw bleibt also unabhängig von der Antriebsart bestehen (siehe Abb. 1). Durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Car-Sharing können die jeweiligen Potenziale, die sich aus dem Car-Sharing ergeben, mit denen, die sich durch einen elektrischen Antrieb ergeben, sinnvoll miteinander kombiniert werden. Der Einsatz von regenerativer Energie stellt dabei eine notwendige Voraussetzung dar: Nur so kann perspektivisch die Abhängigkeit vom Erdöl und der CO₂-Beitrag des Verkehrssektors gesenkt werden [5].

3 Stadträume für Fußgänger und Radfahrer gestalten

Wie bereits erwähnt: Die große Mehrheit der Bevölkerung wünscht sich Städte, die fußgänger- und radfahrerfreundlich gestaltet sind [6]. Der Weg zur Mobilstation beginnt nicht erst an den genannten Mobilstationen: Erst Fuß- und Radwege schaffen eine lückenlose Mobilitätskette. Um eine modale Verlagerung weg vom MIV zu erzielen, muss ein hohes Maß an sicheren, komfortablen und attraktiven Wegeverbindungen zu den intermodalen Schnittstellen geschaffen werden. Daher ist ein fußgänger- und radfahrerfreundlicher Stadtraum eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren von multi- und/oder intermodalen Mobilitätskonzepten. Dementsprechend ist es wichtig, dass eine gute Anbindung an das Fahrrad- und Fußwegenetz besteht. Das Netz der Mobilstationen sollte auf den unterschiedlichen Maßstabsebenen in ein stadtteilbezogenes, gesamtstädtisches, aber auch in ein regionales Verkehrssystem integriert sein [7]. Schon heute werden ca. 30 bis 50 % aller städtischen Wege zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt [8]. Mobilstationen könnten als Verknüpfungspunkte dazu beitragen, dass sich diese Anteile weiter erhöhen [7]. Werden Wege, die mit dem Auto zurückgelegt werden, auch noch durch aktive Mobilitätsformen ersetzt, spart man zugleich Energie, Kosten, schont die Umwelt und bewegt sich gesund, da Lärm- und Luftbelastung, CO₂-Emissionen und Verkehrsunfallrisiken reduziert werden. Aktive Mobilität erhöht schließlich die Resilienz einer Stadt.



Abb. 2: Straßenraum in Amsterdam (links) und Uferpromenade in Bregenz (rechts)
© ISS

In diesem Zusammenhang spielt das Konzept der 'Walkability' eine wichtige Rolle, da es aus ganzheitlicher Sicht auf eine bewegungsanimierende Umwelt zielt [9]. Dieses kann Lebendigkeit im öffentlichen Raum erzeugen und die lokale Wirtschaft beleben. Erleich-

tert werden darüber hinaus informelle kleinräumige Begegnungen, was die Teilhabe am gesellschaftlichen Leben erhöht und mehr Vertrauen der Menschen in ihre Umwelt schafft – ein erheblicher Gewinn an Sozialkapital und Lebensqualität [10]. Dies ist zugleich ein Baustein der städtebaulichen Kriminalprävention, was einen Einfluss auf die psychische und physische Gesundheit haben kann – insbesondere für die steigende Zahl an älteren Menschen, deren Aktionsradius sich auf das Wohnumfeld beschränkt. Aus Sicht der Stadtplanung müssen Stadträume für Fußgänger und Fahrradfahrer vor allem auch qualitative Merkmale wie Aufenthaltsqualität, Orientierungsfreundlichkeit und Identifikation beinhalten. Diese stehen wiederum in Wechselwirkung zu städtebaulichen Kategorien wie Stadtgestalt, Flächennutzung, Verkehrssystem, Gebäudestruktur.

Die Erkenntnisse zur Planung von „guten“ öffentlichen Räumen beziehen sich zugleich auf klassischen städtebaulichen Grundlagenwerken und sind nicht neu. Einige Kerngedanken beziehen sich beispielsweise auf städtebauliche Qualitäten, die in engem Zusammenhang mit der Wahrnehmung der gebauten Stadt durch den Menschen stehen (vgl. u.a. [11] [12] [13]). Auch die Erkenntnis zur Förderung des Zufußgehens als Verkehrsmittel beispielsweise durch ein durchgängiges Fußgängerwegenetz besteht seit längerem [14] [15].

4 Stadtgestalterische Aufwertungen durch Mobilstationen

Neben verkehrsmittelabhängigen Anforderungen, die es an die unterschiedlichen Größendimensionen der Mobilstationen gibt, bestehen vor allem grundsätzliche Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung [16]. Generell trägt das Charakteristikum "Schönheit" zum Wohlbefinden bei. Deshalb wirkt sich ästhetische Qualität letztendlich auch auf die Funktionalität der Mobilstation positiv aus. Insgesamt ist eine harmonische Ausgestaltung und Integration der Stationen wichtig, welche sich in die Umgebung einfügen sollte [17]. Zu den weiteren funktionalen Gestaltungskriterien gehören unter anderem Barrierefreiheit, gute Erreichbarkeit, gute Sichtbarkeit, räumliche Kompaktheit sowie Informations- und Orientierungshilfen. Die Gestaltung der Mobilstation beschränkt sich dabei nicht nur auf den engeren Bahnhofs- bzw. Haltestellenbereich sondern wertet zugleich auch immer das Umfeld auf. Eine zielführende Entwicklung muss sowohl die Zu- und Abgänge als auch angrenzende Quartiere miteinbeziehen, da sie die Funktion von Mobilstationen maßgeblich mit beeinflussen [18]. Somit kann durch eine fußgängerfreundliche Gestaltung des öffentlichen Raums ein positiver Einfluss auf die Gehgewohnheiten genommen werden, um die Mobilitätsgewohnheiten der Menschen zu verändern.

Damit Mobilstationen von den Benutzern nicht als reine Verkehrsabwicklungsfläche, sondern als öffentlicher Raum zur Verknüpfung intermodaler Mobilitätsangebote betrachtet wird, ist sie ansprechend gestaltet und berücksichtigt die zuvor genannten städtebaulichen Qualitäten (siehe Abb. 3).

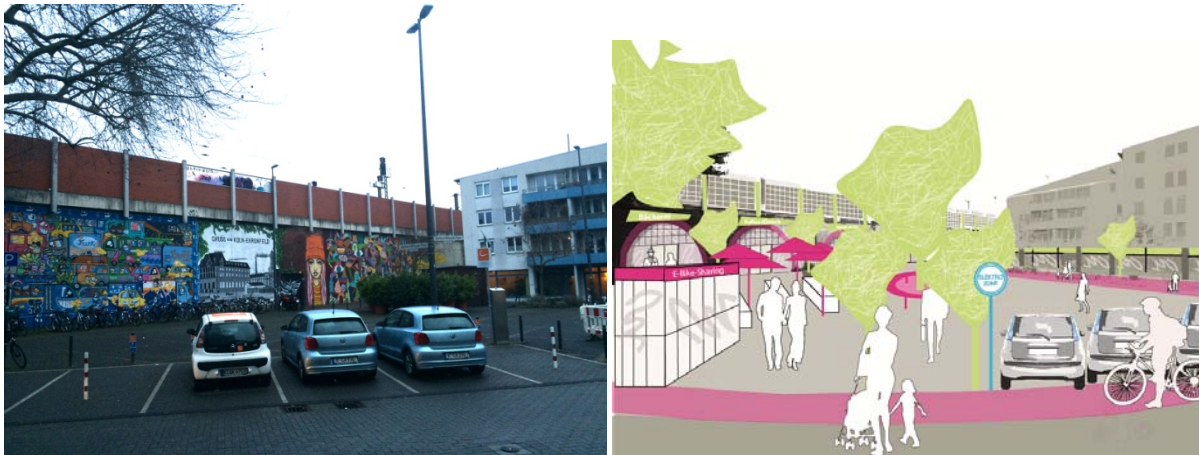


Abb. 3: Bahnhof Ehrenfeld aus heutiger Sicht (links) und die Vision für das Jahr 2030 (rechts) © ISS

Zur Vervollständigung eines nachhaltigen und umweltbewussten Mobilitätskonzepts ist eine regenerative Stromerzeugung mittels Photovoltaik-Anlagen unabdingbar. Diese können nicht immer direkt in eine Mobilstation integriert sein, doch sie sind eine Voraussetzung dafür, dass Fortbewegungsmittel wie die E-Autos sowie E-Bikes regenerativ betrieben werden können. Durch eine gut gestaltete stadträumliche Integration der Elektromobilität besteht die Chance, diese für die Bevölkerung sichtbar und erlebbar zu machen [19].

5 Mit Forschungsprojekt zu innovativen Lösungsansätzen

In einer interdisziplinären Studie im Rahmen des Schaufensterprojekts cologneE-mobil werden die genannten Aspekte in einem größeren Zusammenhang am Beispiel der Stadt Köln empirisch untersucht und diskutiert. Das Forschungsprojekt beschäftigt sich im Grundsatz mit der Frage, welche Rolle in diesem Zusammenhang die Integration von Elektromobilität als Treiber einer umweltfreundlichen Mobilität spielen kann. Außerdem wird der Frage nachgegangen, wie es möglich ist, dass mit der Förderung von Elektromobilität und der Erzeugung regenerativer Energien die Erhöhung der Qualität des öffentlichen Raums einhergeht? Dabei werden u.a. mit der Konzeption von Mobilstationen konkrete Handlungsansätze erforscht und visualisiert, damit Potenziale für verantwortliche kommunale Planer und Verkehrsunternehmen sichtbar gemacht werden. Insbesondere für jene Akteure, die sich mit der Umgestaltung von schon bestehenden multimodalen Verknüpfungsanlagen auseinandersetzen, können durch die Ergebnisse des Projekts wichtige Lösungsansätze aufgezeigt werden.

Das Projekt ist in zwei Phasen aufgeteilt, wobei sich die erste eher mit dem privaten Automobil auseinandergesetzt hat und unter anderem ein Standortkonzept für die Umsetzung einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur entwickelt wurde. In der zweiten Phase wird untersucht, wie Elektromobilität in bestehende, umweltfreundlichere Verkehrssysteme integriert werden kann.

Auch das Kölner ÖPNV-Netz ist stark ausgelastet, der motorisierte Individualverkehr nimmt immer noch zu. Daher liegt ein Schwerpunkt des in Entwicklung befindlichen Mo-

bilitäts- und Verkehrskonzepts der Stadt Köln in der Vernetzung der unterschiedlichen Verkehrsträger. Damit bedarfsgerecht ein neues multimodales Verkehrssystem mit integrierten Elektrofahrzeugen errichtet werden kann, wurden im Rahmen des Projektes colognE-mobil mithilfe einer Stated Preference-Befragung die Bedürfnisse der Stadtbewohner erfasst. Noch wissen große Teile der Bevölkerung zu wenig über die Elektromobilität und das Car-Sharing als Bestandteil einer nahtlosen intermodalen Mobilitätskette – Defizite bestehen vor allem in den Themenfeldern Ladeinfrastruktur, die Kombination von Verkehrsmitteln und die Schaffung von Stadtraumqualitäten durch Car-Sharing. Daher wurden in der zweiten Phase des Projektes mehr als 300 Passanten auch nach ihren (Elektro)-Mobilitätspräferenzen befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass mehr als 75 % der Befragten Ladeinfrastrukturen für Elektroautos und E-Bikes an einer Haltestelle für unabdingbar halten und sich fast 60 % der Befragten eher vorstellen können, eine Kombination von Verkehrsmitteln zu nutzen, wenn die Stationen und deren Umfeld funktional und ansprechend gestaltet sind. Interessant ist darüber hinaus, dass rund 40 % der Befragten nicht wissen, dass durch die Nutzung von Fahrzeugen im Rahmen von Car-Sharing-Angeboten mehr Platz für die Gestaltung und die Qualität des öffentlichen Raums entsteht.

Insgesamt würden sich die Bewohner multimodaler fortbewegen, wenn es ein entsprechendes Angebot in ihrer Umgebung geben würde und dabei der Stadtraum eine hohe Qualität aufweist. Die Befragung macht außerdem deutlich, dass sich die Menschen multimodaler fortbewegen würden, wenn es ein entsprechendes Angebot geben würde. Damit dies realisiert werden kann, ist es zunächst notwendig potenzielle Standorte für Mobilstationen zu identifizieren. In der Praxis werden derzeit zwar vermehrt Ideen für die Umgestaltung zu Mobilstationen entwickelt, ein ganzheitliches Konzept ist bisher jedoch noch nicht bekannt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher eine GIS-gestützte Standortanalyse durchgeführt, bei der unter anderem Kriterien wie Erreichbarkeit, ÖPNV-Angebot, Vorhandensein von Car-Sharing-Stellplätzen mit eingeflossen sind. Mithilfe einer Nutzwertanalyse konnten für die Stadt Köln 33 potenzielle Standorte für Mobilstationen identifiziert werden (siehe Abb. 4). Das Ergebnis zeigt, dass sie die meisten potenziellen Standorte in der Innenstadt zu finden sind. Dies ist durch eine hohe städtebauliche Dichte sowie einer guten Erreichbarkeit dieser zu begründen.

Um ein gesamtstädtisches Netz an multimodalen Mobilstationen zu etablieren, ist es unabdingbar die einzelnen Mobilstationen zu kategorisieren. Hierfür ist es notwendig, ein Hierarchiesystem von Mobilstationen zu entwickeln, sodass ortsspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden können und eine angemessene Größendimensionierung der Mobilstationen möglich ist. Der im Forschungsprojekt colognE-mobil entwickelte Hierarchieansatz folgt dem Größenprinzip „S, M und L“ (siehe Abb. 5). Das Hierarchiesystem ist als Baukastensystem zu verstehen, sodass Eigenschaften aus der nicht ausgewählten Hierarchie nach Belieben ergänzt werden können. Wesentliche Faktoren, die Aufschluss über die Hierarchiestufe der Mobilstation geben, sind unter anderem:

- Städtebauliche Dichte und stadträumliche Lage;
- Lebensstil der Bewohner;
- Einwohner- und Arbeitsplatzdichte;

- Pkw-Dichte und Parkdruck;
- sowie die Erreichbarkeit des Standortes durch den ÖPNV, SPNV zu Fuß und mit dem Rad

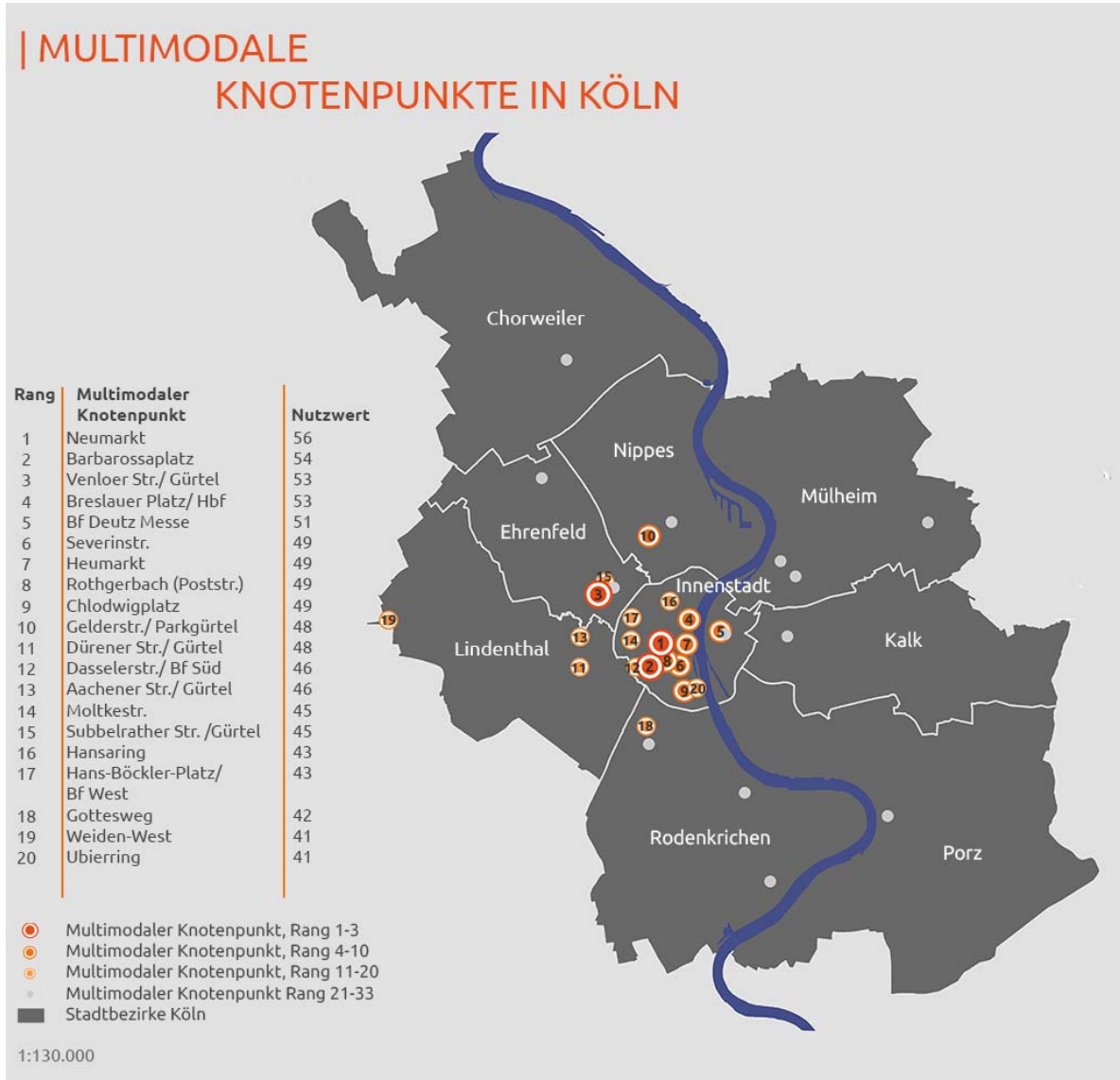


Abb. 4: Ergebnis der Standortanalyse für Mobilstationen in der Stadt Köln © ISS

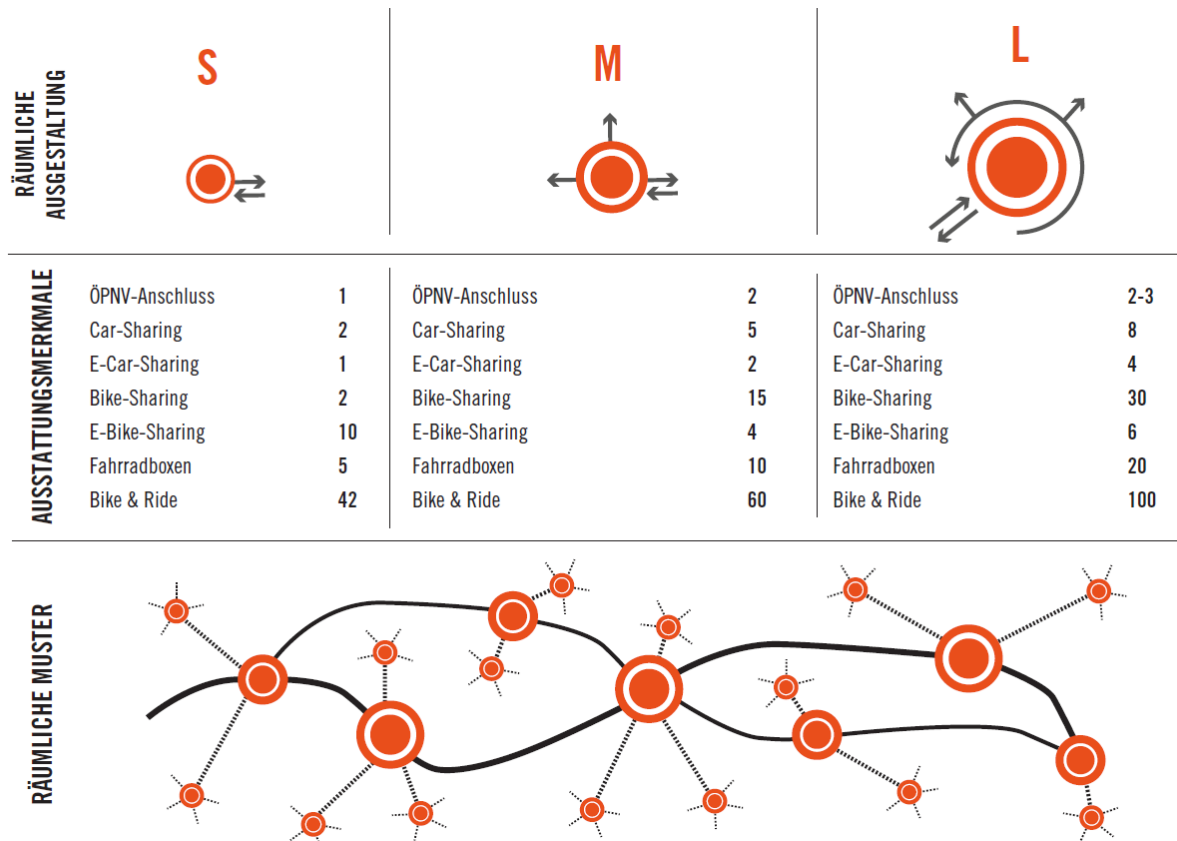


Abb. 5: Hierarchisierung von Mobilstation in der Stadt Köln © ISS

6 Fazit

Damit in Zukunft ein nachhaltiges und effizientes Mobilitätskonzept in den Städten realisiert werden kann, sind in die bestehende Stadtstruktur integrierte Mobilstationen unabdingbar. Sie kombinieren verschiedene Verkehrsmittel effizient miteinander und machen es möglich, sich ressourcenschonend und umweltbewusst fortzubewegen. Mobilstationen sind somit ein wesentlicher Baustein, damit die Verkehrswende gelingt. Sie müssen komplementär ergänzt werden durch verständliche Smartphone-Apps, die die Angebote der einzelnen Mobilstationen hinsichtlich Fahrplan, Stellplätze, Ladeinfrastruktur, Sharing-Angebote übersichtlich und vorausschaubar macht. Erst durch ein ganzheitliches und nachhaltiges Mobilitätskonzept wird es möglich sein, die schon heute in den Großstädten enormen Emissionen der Treibhausgase, die Schadstoffbelastungen sowie die hohe Motorisierungsrate zu reduzieren. Vor allem aber kann auf diese Weise eine neue Mobilitätskultur entstehen, mit deren Hilfe auch wieder urbane Lebensqualität zurückgewonnen werden kann.

7 Literatur

- [1] D. Sigmund, „Multimodaler Knoten Bahnhof“, in VCÖ-Magazin 02/2015, Wien, 2015
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), „Umweltbewusstsein in Deutschland 2014. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage“, Berlin, 2015
- [3] Bundesstiftung Baukultur, „Baukulturbericht 2014/15: Gebaute Lebensräume der Zukunft – Fokus Stadt“, Berlin, 2014
- [4] Website Cambio-Quelle: http://www.cambio-carsharing.de/cms/carsharing/de/1/cms?cms_knuuid=7c1beff0-0a99-4a2d-ad99-a3e9cf992add (zugegriffen am 05.06.2015)
- [5] J. Garde, „E-Carsharing in Köln – Ein intermodales Standortkonzept“, Diplomarbeit an der Fakultät Raumplanung im Rahmen des Forschungsprojektes cologne-mobil (Phase 1), Dortmund, 2013
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) , Umweltbundesamt (UBA) (Hg.), Umweltbewusstsein in Deutschland 2014. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, S. 12, 2015
- [7] Website heuer dialog: <http://www.heuer-dialog.de/insight-3-2011-Hartmut-Topp-Mobilitaetskonzepte> (zugegriffen am 14.03.2015)E-mobil BW GmbH- (Landesagentur für
- [8] Elektromobilität und Brennstofftechnologie Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung e.V.), „Neue Wege für Kommunen. Elektromobilität als Baustein zukunftsfähiger kommunaler Entwicklung in Baden-Württemberg“, Stuttgart, 2011
- [9] M.-C. Tran, J. A. Schmidt, „Walkability aus Sicht der Stadt- und Verkehrsplanung“, in Walkability - Das Handbuch zur Bewegungsförderung in der Kommune, (J. Bucksch und S. Schneider, eds.), Hans Huber Verlag, Bern, pp. 61-72, 2014
- [10] S. H. Rogers, J. M. Halstead, K. H. Gardner, C. H. Carlson, Examining Walkability and Social Capital as Indicators of Quality of Life at the Municipal and Neighborhood Scales. Applied Research in Quality of Life, 2010
- [11] K. Lynch, Das Bild der Stadt. Braunschweig/Wiesbaden, 1991
- [12] C. Alexander et al., A Pattern Language. Towns, Buildings, Construction. New York, 1977
- [13] J. Jacobs, The Death and Life of Great American Cities. Random House, New York, 1961
- [14] K. Uhlig, Die fußgängerfreundliche Stadt. Hatje, Stuttgart, 1979
- [15] D. Garbrecht, Gehen: ein Plädoyer für das Leben in der Stadt. Beltz, Weinheim, Basel, 1981
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), „Hinweise für den Entwurf von Verknüpfungsanlagen des öffentlichen Personennahverkehrs“, Köln, 2009
- [17] N. Bautz und P. Zeile, „+pol – Multimodale Mobilitätsstationen am Beispiel der Stadt Freiburg im Breisgau“, in Proceedings REAL CORP 2011 Tagungsband (M. Schrenk, V.V. Popovich und P. Zeile, eds.), Essen, pp. 727-736, 2011
- [18] S. Zemp, „Vom Bahnhof zum multifunktionalen Raum“, in Collage 4/12, pp. 7-9, 2012
- [19] J. Garde, H. Jansen und D. Bläser, „Mobilstationen – Bausteine für eine zukunftsfähige Mobilität in der Stadt“, in Proceedings REAL CORP 2014 Tagungsband (M. Schrenk, V.V. Popovich, P. Zeile und P. Elisei, eds.), Wien, pp. 903-907, 2014



regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Technische Entwicklungen im elektrischen Antriebsstrang





regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Schaltbare Getriebe für Elektrofahrzeuge am Beispiel urbaner Nutzungsszenarien

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers¹, Dipl.-Ing. Katharina Bause¹,
Dipl.-Ing. Simon Klingler¹, Dipl.-Ing. Rainer Puls², Dr.-Ing. Matthias Behrendt¹

¹ IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

² Spezialgetriebebau Rainer und Oliver Puls GmbH

E-Mail: ¹ {katharina.bause, simon.klingler, matthias.behrendt}@kit.edu,

² info@rainer-oliver-puls.de

Abstract

Im Rahmen des Fraunhofer Innovationsclusters „Regional Eco Mobility – REM2030“ wird ein elektrifiziertes Fahrzeug für den Einsatz im städtischen Großraum konzeptioniert und in einem Demonstratorfahrzeug umgesetzt. Das IPEK konzipiert zusammen mit der Firma Spezialgetriebebau Rainer und Oliver Puls GmbH den Triebstrang und setzt diesen in prototypischer Ausführung um. Auf Basis durchgeführter Analysen wird für das im Projekt definierte urbane Nutzungsprofil ein Zentralantrieb mit schaltbarem Getriebe und integriertem Differenzial als energieeffiziente Lösung realisiert. Die Getriebeentwicklung wird begleitet durch eine durchgängige Validierung, die in Abhängigkeit des Systemreifegrades des sowohl rein virtuell als auch gemischt physisch-virtuell ausgeprägt ist.

1 Einleitung und Motivation

Aktuelle Studien zeigen, dass das Getriebe in Elektrofahrzeugen der Zukunft schaltbar sein wird. Experten gehen davon aus, dass die Getriebe langfristig drei und mehr Gängen anbieten werden. [1] Diese Annahme begründet sich in der Betrachtung verschiedenster Elektrifizierungsgrade und Elektroantriebstopologien unter dem Aspekt der Energieeffizienz. Den durchgeführten Analysen liegen Daten wie Fahrzeugklasse, Fahrmanöver, Fahrer- und Getriebetypen inklusive Verlustmodelle zugrunde.

Der Bedarf für Elektrofahrzeuge mehr als einen Gang zu nutzen, begründet sich in der Zusammensetzung des Wirkungsgrades der Antriebsstrangkomponenten. KÜCÜKAY (2012) unterscheidet zwischen dem inneren und äußeren Wirkungsgrad eines Getriebes. [1] Der innere Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen Abtriebs- und Antriebsleistung, wobei die Abtriebsleistung sich aus der Differenz von Antriebsleistung und der Verlustleistung berechnet. Der innere Wirkungsgrad bilanziert also Leistungsflüsse über die Getriebesystemgrenze. Zu den Getriebeverlusten zählen neben Verzahnungsverlusten, Lager-, Dichtungs-, Schmierungs- und sonstige Verluste. Die Verluste in einem Getriebe sind dabei entweder abhängig oder unabhängig von der Drehzahl oder der Last bzw. Drehmoment. [2] Im Kontext schaltbarer Getriebe addieren sich zu diesen Verlusten alle entstehenden Wirkungsgradeinbußen durch Kupplungssysteme und Aktuatorik. Zudem beeinflusst die Spreizung des Getriebes wesentlich mehr die Effizienz des gesamten Antriebes als die Anzahl der Gänge. [3] Der äußere Wirkungsgrad hingegen ist das Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen Subsysteme und kann somit den kompletten Antriebsstrang bilanzieren.

Ein CVT (Continuously Variable Transmission) ermöglicht der Verbrennungskraftmaschine in konventionellen Antrieben durch die stufenlose Übersetzung einen energieeffizienteren Betrieb. Die flexible Übersetzung führt dazu, dass die VKM öfter im besseren Wirkungsgrad betrieben werden kann als beispielsweise bei einem 6-Gang-Getriebe mit festen Übersetzungsstufen. So trägt das CVT trotz schlechtem inneren Wirkungsgrads zur Verbesserung des äußeren Wirkungsgrades bei. Wie auch konventionelle Antriebe weisen E-Maschinen einen Gradienten im Wirkungsgrad bezogen auf das Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld auf. Ein schaltbares Getriebe ermöglicht so auch bei E-Maschinen einen potenziell effizienteren Betrieb. [4]

Mehrganggetriebe zeichnen sich im Vergleich zu Einganggetrieben gleicher Leistungsklasse zwar durch höheres Gewicht, Kosten und Bauraumbedarf aus, jedoch kann dies trotzdem zu einer Steigerung des äußeren Wirkungsgrades führen und somit zu einer positiveren Gesamtenergiebilanz. [1] Aus den skizzierten Faktoren leiten sich im Rahmen einer Entwicklung teilweise konkurrierende Entwicklungsziele, -anforderungen und -randbedingungen ab.

Dieser Beitrag legt dar, wie im Rahmen des Fraunhofer Innovationsclusters „Regional Eco Mobility – REM 2030“ unter Berücksichtigung der oben genannten Designparameter im Rahmen der Elektrifizierung eines Fahrzeuges diesen Herausforderungen der Effizienzsteigerung begegnet wird.

2 Gestaltentwurf des Getriebes

2.1 Analyse und Parameterdefinition

Ziel des Innovationsclusters ist unter anderem die Entwicklung eines elektrifizierten Fahrzeuges, das die Bedarfe des urbanen Einsatzes erfüllt. Die aus der Anwendung resultierenden Bedarfe des urbanen Einsatzes wurden in Ziele und Anforderungen für die Entwicklung des Elektrofahrzeuges übersetzt und daraus die Anforderungen für die Entwicklung des Antriebsstranges abgeleitet. [5] Neben den im Stadtverkehr häufig auftretenden Geschwindigkeitsänderungen treten auch Fahrsituationen auf, bei denen mit konstanter, mäßig hoher Geschwindigkeit gefahren wird. Hierzu kommt, dass im urbanen Umfeld hauptsächlich Kurzstrecken gefahren werden, sodass der Anteil stationärer Betriebspunkte gering ist. Der Triebstrang hat die Aufgabe, diese unterschiedlichen Betriebsbedingungen durch Anpassung der Betriebspunkte der E-Maschine möglichst wirkungsgradeffizient darzustellen.

Um die verschiedensten für den späteren Anwendungsfall repräsentativen Betriebsbedingungen abzubilden, stehen mehrere im Rahmen des Projekts definierte Fahrmanöver, unter anderem ein erhobener Zyklus, zur Verfügung. [5] Weitere Eingangsgrößen sind der Getriebetyp sowie die Gangzahlen mit zugehörigem, zulässigen Übersetzungsbereich. Zur Ermittlung des Getriebewirkungsgrades sind dabei Verlustberechnungsmodelle für die unterschiedlichen Getriebetypen wie beispielsweise Stirnrad- und Planetengetriebe hinterlegt. Mit diesen Eingangsgrößen arbeitet ein Optimierungsalgorithmus, der unter Berücksichtigung des E-Maschinen-Wirkungsgradkennfeldes im Sinne einer lokalen Optimierung die optimalen Übersetzungen für den jeweiligen Fahrzustand ermittelt. Hierbei wird

für jeden Fahrzustand die Übersetzung innerhalb des vorgegebenen Bereiches solange variiert bis der beste äußere Wirkungsgrad als Produkt von Getriebewirkungsgrad und E-Maschinenwirkungsgrad vom Algorithmus gefunden wurde.

Mit Hilfe des Algorithmus kann also eine Aussage über die Energieeffizienz der jeweiligen betrachteten Konfiguration getroffen werden. Die Werte Energieverbrauch und Wirkungsgrad bilden die Grundlage des Vergleichs und der Bewertung der optimierten Konfigurationen.

So konnte gezeigt werden, dass ein schaltbares Planetengetriebe mit zwei Gängen aus der Betrachtung verschiedener Getriebetopologien kombiniert mit der permanent erregten Synchronmaschine – mit Antriebsdrehzahlen bis 15.000 rpm – für die betrachteten Nutzungsszenarien die energieeffizienteste Umsetzung ermöglichen kann [4], d. h. auf diese Art eine Steigerung des äußeren Wirkungsgrades grundsätzlich möglich ist.

Unter Berücksichtigung der Fahrmanöver und der entwickelten Schaltstrategie wurde die Erfüllung der unterschiedlichen Anforderungen konsequent in der Bestimmung der wirkungsgradeffizientesten Übersetzungskombination umgesetzt. Der erste Gang bedient die Betriebspunkte, die tendenziell ein höheres Moment bei mäßigen Geschwindigkeiten erfordern. Er deckt aber auch den Betrieb mit gemäßigten mittleren Beschleunigungsbedarfen bei Fahrzeuggeschwindigkeiten bis zu 65 kmh^{-1} ab. Der zweite Gang wurde für den Betrieb bei höheren Geschwindigkeiten und mäßigen Beschleunigungen ausgelegt, wodurch die Beschleunigungsreserve im zweiten Gang als gering einzuschätzen ist. Diese Optimierung und Auslegung unter Berücksichtigung des Zyklus und der Schaltstrategie resultiert in einer großen Getriebespreizung.

In einem weiteren Schritt wurde auf Basis der ermittelten Übersetzungsstufen eine Getriebegrobauslegung vorgenommen. Mit den ermittelten Parametern wird in einer 1D-Simulation die Abbildung des inneren Wirkungsgrades verfeinert, hierzu gehören neben den Verzahnungsverlusten auch Kupplungs- und Aktuatorikverluste. Lager-, Dichtungs- und sonstige Verluste bleiben vorerst unberücksichtigt. Die Herausforderung der Entwicklung besteht in der Folge darin, den inneren Wirkungsgrad entsprechend dieser Vorüberlegungen in den anvisierten Bereich zu legen.

2.2 Überführung des Konzepts in eine physische Gestalt

Diese skizzierten Vorüberlegungen zu Getriebetyp, Gangzahl und Getriebeübersetzung werden unter Berücksichtigung gestalterischer Restriktionen in eine physische Gestalt überführt. Die Herausforderung besteht dabei in der wirkungsgradeffizienten Umsetzung eines Schaltgetriebes mit großer Getriebespreizung bei Eingangsdrehzahlen bis 15.000 rpm unter Berücksichtigung der ermittelten Zielwerte des Getriebes. Besondere Anforderungen an die Subsysteme Planetengetriebe und Kupplungen resultieren dabei aus den Eingangsdrehzahlen und der großen Getriebespreizung, die zu hohen Drehzahl- und Drehmomentdifferenzen beim Schaltvorgang und der damit unter Umständen verbundenen Systemanregung führen. Diese Größen beeinflussen in der Feinauslegung bspw. die Stufenanzahl des Planetengetriebes, die Positionierung der Kupplungssysteme sowie die Entscheidung über die Realisierung eines trocken- oder nasslaufenden Kupplungssystems.

Insbesondere im Kontext der Elektrifizierung und somit steigender Drehzahlen spielen Aspekte wie Dichtungs- und Schmierkonzept in dem Verbund von E-Maschine, Getriebe und Kupplungssystem eine immer größer werdende Rolle. Da Dichtungsverluste zwar nicht zu den lastabhängigen jedoch aber zu den drehzahlabhängigen Verlusten gehören [6], ist es unter dem Gesichtspunkt Verlustminimierung vorteilhaft, die Anzahl der Dichtungen insbesondere an den hochdrehenden Komponenten zu reduzieren. Daraus ließe sich die Forderung nach einem einheitlichen Schmier- und Kühlkonzept für E-Maschine, Getriebe und Kupplungssystem ableiten. Dem gegenüber stehen allerdings Aspekte wie die Verteilung des durch Verschleiß verursachten Getriebeabriebs im gesamten System und die Schleppverluste in nasslaufenden Kupplungen. Schleppverluste sind zwar anhängig von der Drehzahl, steigen jedoch nicht proportional mit der Drehzahl an. Vielmehr fallen sie nach einem steilen Anstieg auch auf ein relativ niedriges Niveau – das Plateauniveau – ab, auf das ein weiterer Anstieg folgt. [7] Nach ALBERS (2014) kann eine Stellgröße für die Auslegung eines Kupplungssystems somit das gezielte Betreiben innerhalb des Plateauniveaus sein. Eine weitere Alternative ist das Verschieben des Plateauniveaus durch gezielte Additivierung des Öls. [4] Die Verteilung des Abriebs und die unterschiedlichen Anforderungen der Subsysteme an das Kühl- respektive Schmiermittel führen wiederum zu der Trennung der Subsysteme in Bezug auf das Schmierkonzept. Die in nasslaufenden Kupplungssystemen auftretenden Verluste sprechen in der Wirkungsgradbetrachtung eher für die Verwendung trockenlaufender Systeme. Sowohl die Schmiermitteltrennung als auch die Ausführung von gemischt trockenen und nasslaufenden Systemen erfordern allerdings die Verwendung von Dichtungen. Hier empfiehlt es sich in der Gestaltumsetzung die Dichtstellen an Orten mit geringeren Drehzahlen vorzusehen, an denen dann auch die Trennung der Gehäuse vorzunehmen sein sollte.

Einen weiteren Aspekt stellt die Funktionsübernahme durch alternative Systeme dar, wie die Option, die Funktion „Bremsen“ durch die Kupplungen zu erfüllen. Diese „neue“ Funktion für ein Kupplungssystem ist in der Auslegung des Systems zu berücksichtigen und kann beispielsweise zu der Entwicklung neuer Beläge führen. Aus dem Einsatz des Kupplungssystems zur Verzögerung des Fahrzeugs resultiert die Reduzierung der Belastung des Bremssystems. Durch die Anpassung an die geringere Belastung können die Massen des Bremssystems verringert werden, was zu der Reduzierung der ungefederten Massen des Fahrzeugs beiträgt. Dies trägt zur Sicherheit des Fahrens bei und fördert die Verbesserung des Fahrkomforts. In der Gestaltumsetzung sollte der Aspekt der modularen Austauschbarkeit und Anpassung des Kupplungssystems Rechnung getragen werden.

2.3 Gestaltrealisierung

Um dem Ziel – Konzeption einer innovativen, energieeffizienten und kompakten Antriebseinheit – gerecht zu werden, wurden verschiedene Konfigurationen vor allem unter den Aspekten Wirkungsgrad und Bauraum beurteilt. Unter Berücksichtigung der konzipierten Hochdrehzahl-E-Maschine und des zur Verfügung stehenden Bauraums im Demonstratorfahrzeug [5] folgt ein Front-Quer-Aufbau der Antriebseinheit. Somit ist die Übertragung des Moments von der Antriebswelle auf die Abtriebswelle über z. B. eine Stirnradstufe auf den Differenzialkorb erforderlich.

Aus der ermittelten Zielübersetzung von 17,5 im ersten Gang und 4,5 im zweiten Gang folgt, dass sich bei einer Differenzialübersetzung von 4,5 durch das Planetengetriebe eine

Übersetzung von 3,9 zu realisieren ist. Aufgrund mechanischer Randbedingungen wie bspw. den Umfangsgeschwindigkeiten und den daraus resultierenden Beanspruchungen für das System wird das Planetengetriebe als zweistufiges Planetenkoppelgetriebe ausgeführt. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Getriebes.

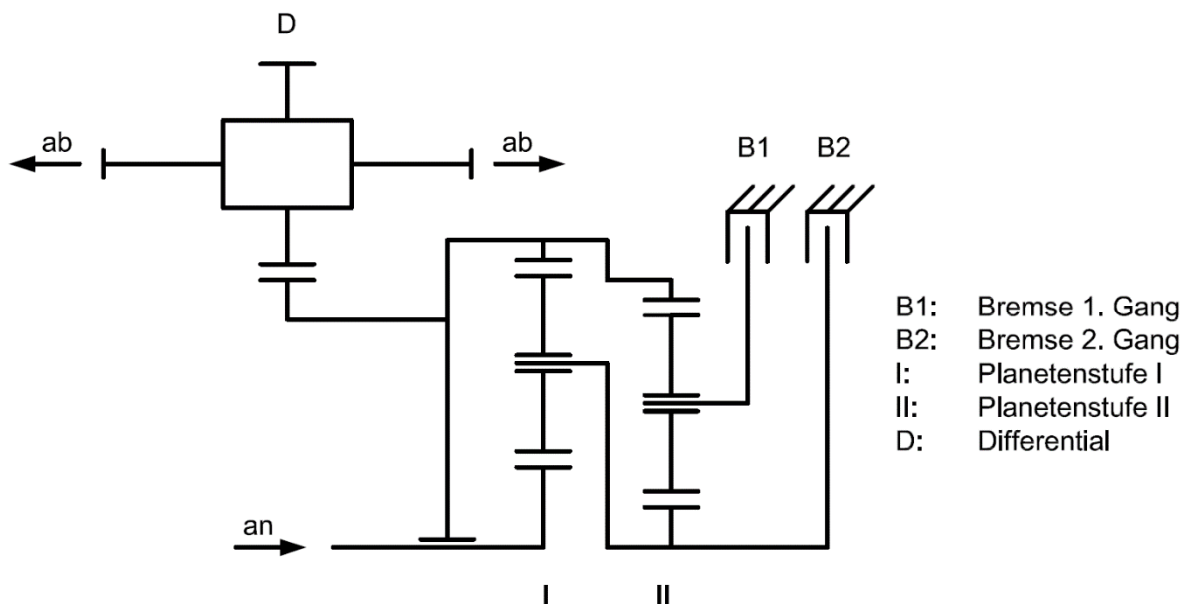


Abbildung 1: Prinzipskizze des Getriebes

Im ersten Gang wird die Leistung von dem Sonnenrad über die Planetenräder und den Steg der ersten Stufe auf das Sonnenrad und Planetenräder der zweiten Stufe übertragen. Das Moment wird über eine Kupplung, hier als Bremse 1 bezeichnet, am Steg der zweiten Stufe abgestützt, was zum Antrieb des Hohlrades führt. Von dort aus wird die Leistung auf das integrierte Differential übertragen. Im zweiten Gang wird der Leistungsfluss über den durch eine zweite Kupplung, hier mit Bremse 2 bezeichnet, blockierten Steg der ersten Planetenstufe gänzlich über diese geleitet.

Diese Art der Gestaltrealisierung ermöglicht neben den reduzierten Umfangsgeschwindigkeiten und Differenzdrehzahlen an den Zahnrädern auch die Reduzierung der Belastungen für die zwei Kupplungs- respektive Bremssysteme. Daneben spielen oben adressierte Überlegungen zur Funktionsübernahme bei der Gestaltung der Kupplungssysteme eine Rolle. Die Separierung des Kupplungs- vom Getriebegehäuse (Abbildung 2) erlaubt einen modularen Aufbau. Zum einen lassen sich so zwei trockenlaufende energieeffiziente Kupplungssysteme inklusive hydraulischer Aktuatorik realisieren. Zum anderen wird so der modulare Austausch skalierbarer Kupplungssysteme ermöglicht. Im weiteren Verlauf ließen sich so bei einem Getriebe konstanter Leistungsklasse die Kupplungen auf das jeweilige Anwendungsszenario anpassen und applizieren.

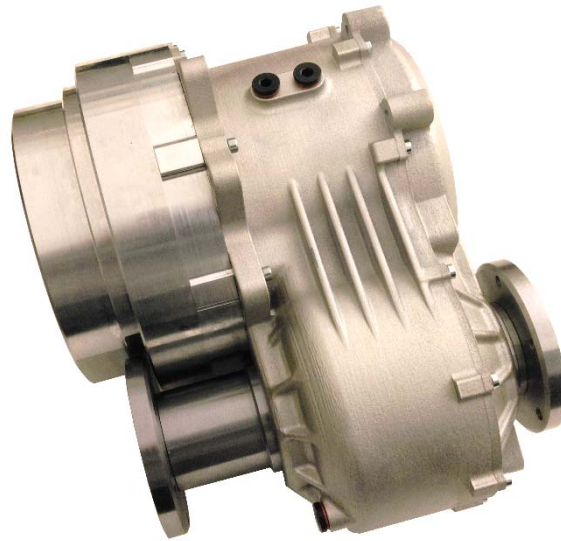


Abbildung 2: Gestaltrealisierung der Getriebe-Differenzial-Einheit

3 Durchgängige Validierung

Die rein virtuelle Validierung wird durch die prototypische Realisierung der Getriebe-Differenzial-Einheit – System-under-Development (SuD) – zu einer gemischt physisch-virtuellen Validierung erweitert. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren verkürzt hierbei die Zeit zwischen der Konzeptionierung und der Gestaltumsetzung und somit den Schritt von rein virtueller Validierung hin zu einer gemischt physisch-virtuellen Validierung. Hierdurch werden die Unsicherheiten z. B. bezüglich der genauen Verluste innerhalb des Getriebes (also des inneren Wirkungsgrads) verringert. Gleichzeitig wird durch die virtuelle Abbildung des Restsystems die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Tests sichergestellt. So wird neben Energieverbrauchs- und Wirkungsgradmessungen auch der Einfluss der Schaltstrategien auf den Energieverbrauch ermittelt. Des Weiteren soll analysiert werden, ob sich in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrermodelle unterschiedliche Schaltstrategien im Betrieb adaptieren lassen und welche Auswirkungen diese auf das Gesamtsystem haben. In Wechselwirkung mit den Simulationsmodellen wird analysiert, unter welchen Bedingungen der Antrieb auf andere Manöver adaptierbar ist bzw. wie performant dieser in anderen Anwendungsfällen ist. Auch hier spielt die gezielte Kopplung von physischen und virtuellen Teilsystemen eine entscheidende Rolle. Je nach Validierungsziel kann situationsspezifisch die Auswahl des Grads der Reproduzierbarkeit und der Modellverkürzung getroffen werden. So ist bspw. bei der Variation der Fahrmanöver die Reproduzierbarkeit des Fahrerverhaltens eine gewünschte Eigenschaft eines virtuellen Fahrermodells, wobei hingegen bei der Untersuchung des Energieverbrauchs durch Verwendung der physischen Getriebeeinheit bewusst die geringe Modellverkürzung und damit Genauigkeit der Ergebnisse im Vordergrund steht. Dementsprechend kann für jede Validierungsaktivität in Abwägung der gewünschten Eigenschaften der Teilmodelle und unter Berücksichtigung von Aufwandsabschätzungen sowie Reifegrad der Teilsysteme eine optimale gemischt physisch-virtuelle Gestalt des betrachteten Gesamtsystems gefunden werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der entwickelten Getriebe-Differenzial-Einheit wird ein kompakter Triebstrang für ein urbanes Elektrofahrzeug bereitgestellt, mit dem der E-Maschine durch das schaltbare Getriebe ein weiterer Freiheitsgrad geboten wird und somit einen energieeffizienteren Betrieb des gesamten Antriebstranges ermöglicht. Bei der Gestaltrealisierung des Aufbaus wurde auf den modularen Austausch der Kupplungspakte geachtet, um in weiteren Arbeiten beispielsweise die Anpassbarkeit der Systeme an den Einsatz zur Fahrzeugverzögerung zu untersuchen. In Bezug auf die Schnittstellengestaltung zur Systemintegration stehen Aspekte wie Modularität und Schwingungsentkopplung im Vordergrund. Die Antriebseinheit – also die Traktionsmaschine und die Getriebe-Differenzial-Einheit – wird über drei Stellen schwingungsentkoppelt mit der Fahrzeugstruktur verbunden, sodass durch die E-Maschine mittels Körperschall induzierten Schwingungen nicht an das restliche System weitergegeben werden.

Die gezielte Kopplung von virtuellen und physischen Teilmodellen zur Darstellung des gesamten Systemverbunds ermöglicht eine effiziente und bedarfsorientierte Validierung nicht nur im Sinne einer Eigenschaftsabsicherung sondern vielmehr einer iterativen Anpassung und Applikation bspw. der Schaltstrategie schon während der Entwicklung.

5 Literaturverzeichnis

- [1] P. Trechow, „Das Getriebe hat auch in Elektrofahrzeugen Zukunft“, *ingenieur.de*, 07-Sep-2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Antriebstechnik/Das-Getriebe-in-Elektrofahrzeugen-Zukunft>. [Zugegriffen: 19-Juli-2014].
- [2] FZG, „Wirkungsgrad bei Stirnradgetrieben“, *Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.fzg.mw.tum.de/?o=17254&l=1>.
- [3] A. Völkert, „Wie viele Gänge dürfen’s denn sein?“, Berlin, Feb. 2013.
- [4] A. Albers, K. Bause, M. Behrendt, und S. Ott, „Einsatz von Simulationswerkzeugen im Entwicklungsprozess elektrifizierter Antriebssysteme“, in *FVA SIMPEP 2014 – 4. Kongress zu Einsatz und Validierung von Simulationmethoden für die Antriebstechnik*, Koblenz, 2014, Bd. II, S. 103–115.
- [5] L. Berg, M. Schiefer, K. Bause, T. Fischer, und F. Hildenbrand, „Innovationscluster REM 2030: Innovative Ansätze und Lösungen für den urbanen Verkehr“, 2014.
- [6] W. Novak, *Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festrudentkopplung*, Online-Ausg. Stuttgart: IMA, 2010.
- [7] W. Funk und C. Oerleke, „Leerlaufverhalten ölgekühlter Lamellenkupplungen“, FVA, 1998.



regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Virtuelle Gesamtsystemoptimierung von E-Bussen im urbanen Verkehr mittels gekoppelter Simulation

Dipl.-Wi.-Ing. Kilian Berthold¹, Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld¹

¹ Institut Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie,
Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe,
E-Mail: Kilian.Berthold@kit.edu, Peter.Gratzfeld@kit.edu

Keywords: E-Stadtbuss, E-Nutzfahrzeuge, Gesamtsystemsimulation, Energiemanagement,
E-Bus-Liniennetzplanung, technologisch-/betriebswirtschaftliche Optimierung

1 Einleitung

In einer Vielzahl von Versuchsprojekten wird deutschlandweit die Elektrifizierung von Stadtbussen erprobt. Es gilt hierbei diejenigen Technologien zu identifizieren, die langfristig am besten geeignet sind, dem standardmäßigen Einsatz von Elektrobussen den Weg zu ebnet [1].

Stadtbusse empfehlen sich besonders dafür sie elektrisch zu betreiben, da ihnen im Vergleich zum Individualverkehr ein weitestgehend fester und planbarer Betriebsablauf zugrunde liegt. Dies vereinfacht und fördert nach dem heutigen technologischen Stand die Elektrifizierung dieser Fahrzeuggattung, da der Bus auf einer ihm fest vorgegebenen Route fährt und so regelmäßig und in kurzen zeitlichen wie räumlichen Abständen die an Haltestellen eingerichteten Ladepunkte tangiert. [2]

Abgesehen von seinem planbaren Einsatzspektrum unterscheidet sich der E-Busbetrieb vom Pkw durch die deutlich größere bewegte Masse, welche durch die unterschiedliche Anzahl an Passagieren Schwankungen von bis zu fünf Tonnen unterliegt. Im Stopp-and-Go-Verkehr des Innenstadtverkehrs hat dies einen bedeutenden Effekt auf die Rekuperationsleistung. Ebenso stellt der Energiebedarf der voll batterieelektrisch betriebenen Nebenverbraucher, allen voran für Heizung und Klimatisierung, eine große Herausforderung dar. So ist bei Konstantfahrt der Leistungsbedarf, der bei niedrigen Temperaturen für das Heizen bereitgestellt werden muss, höher als der Leistungsbedarf des Antriebs [1]. Das kurzzeitige Hochleistungsladen mit bis zu 750 kW Ladeleistung [3] stellt neben dem Energieversorgungsnetz auch die Ladeeinrichtung sowie die Batterie vor bedeutsame technologische Problemstellungen. Für die Auslegung der Ladeinfrastruktur und deren Verteilung über eine Buslinie oder zukünftig über ein gesamtes städtisches Busnetz, ergeben sich neben bau- und genehmigungstechnischen Fragestellungen vor allem Restriktionen in Bezug auf die technologischen Umsetzungsmöglichkeiten (Fahrzeugkonfiguration, Wahl der Akkugröße, Ladetechnologie, Stromnetzbelastung) sowie die Wirtschaftlichkeit. Die Untersuchung all dieser Teilaspekte wirft eine Vielzahl innovativer Forschungsfragen auf, die dazu beitragen werden eine neue urbane Mobilität zu etablieren.

In dem durch das deutsche Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten „Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim“ wird die Mannheimer Dieselbuslinie Nummer 63 in eine E-Buslinie umgewandelt. Das Institut für Fahrzeugsystem-

technik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) begleitet diesen Prozess wissenschaftlich durch den Aufbau eines modularen und validierten Simulationstools. Dies soll die Auslegung sowie Optimierung des Gesamtsystems, bestehend aus Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur, durch virtuelle Testfahrten erlauben.

Die durch das KIT entwickelte Simulationsumgebung zielt darauf ab, die den elektrischen Busbetrieb beeinflussenden Inputgrößen möglichst vielfältig, detailliert, flexibel und realitätsnah abzubilden. Hierbei rückt besonders die Abbildung des Betriebs- und Verkehrseinflusses in den Fokus. Unter Einsatz verschiedener, für den jeweiligen Systembestandteil besonders geeigneter Softwarelösungen, wird ein Gesamtsystem modelliert und als Co-Simulation simuliert. So werden eine große Modularität, Erweiterbarkeit und Parametervariationen ermöglicht, die sich nicht nur auf die Busanwendung beschränken, sondern ebenso eine Basis für die Untersuchung anderer urbaner E-Nutzfahrzeugverkehre darstellt. Diese weisen in Teilen dem Busbetrieb ähnliche Betriebsbedingungen auf und könnten zukünftig die gleiche (Lade-) Infrastruktur wie der E-Bus mitnutzen.

2 E-Bus Praxistest: Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim

Im Förderprojekt PRIMOVE Mannheim sind neben dem KIT die Verkehrsbetriebe Rhein-Neckar-Verkehr GmbH, die Stadt Mannheim sowie Bombardier Transportation GmbH Projektpartner. Die Mannheimer Buslinie 63 wurde als Erprobungslinie ausgewählt, da diese durch den zentralen Innenstadtverkehr Mannheims führt und gemäß der standardisierten Testzyklen für Busse SORT (Standardised On-Road Tests cycles) als SORT 1-Zyklus für anspruchsvollen Stadtverkehr eingeordnet werden kann [4]. Aufgrund der Routenführung durch die Innenstadt ist eine besonders öffentlichkeitswirksame Erprobung und Präsentation der Einsatzmöglichkeiten von Elektromobilität gegeben.

Festgelegtes Ziel ist es, den für den Dieselmotorbetrieb ausgelegten Fahrplan ohne Änderungen ab Mitte 2015 mit zwei E-Bussen im regulären Fahrgast-Dauerbetrieb weiterzuführen. Diese 12-Meter-Niederflurfahrzeuge des Herstellers Hess fahren rein batterieelektrisch. Für die Ladung der Busse kommt an ausgewählten Haltestellen das induktive Hochleistungs-Ladesystem PRIMOVE von Bombardier zum Einsatz. Das Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim soll die Praxistauglichkeit eines derart konfigurierten E-Busbetriebs beweisen und dadurch wesentliche Pionierarbeit leisten, dass zukünftig die Elektrifizierung von Stadtbussen zum Standard wird und sich gemäß den Förderabsichten des Ministeriums weiter verbreitet [5].

Die Möglichkeit der mehrfachen Energieaufnahme pro Umlauf erlaubt einerseits eine kleine, leichtere und somit kostengünstige Dimensionierung des Akkus. Andererseits wirken sich die hierdurch geringen Lade- und Entladehuber positiv auf die Lebensdauer der Batterie aus. Die Komplexität der Auslegung des Gesamtsystems liegt in der optimalen Auswahl der Haltepunkte auf einem Umlauf, die zu Ladepunkten umgerüstet werden, im Zusammenspiel mit der zu wählenden Akkugröße. Dies hat unter den Nebenbedingungen der Aufrechterhaltung des fahrplanmäßigen Busbetriebs bei Stau, Streckensperrungen oder beispielsweise zu fahrenden Umwegen sowie der Minimierung der Gesamtkosten zu erfolgen.

Basierend auf der durch das KIT erarbeiteten virtuellen Abbildung des E-Busbetriebs, sollen in der Folge Untersuchungen zu Wirkungsgraden und Energiemanagement, Worst-Case-Szenarien im Betrieb oder auch Wirtschaftlichkeits- sowie Emissionsbetrachtungen durchgeführt werden. Hieraus lässt sich, neben technischen Optimierungen, ein Handlungsleitfaden zur Elektrifizierung weiterer Buslinien und eines gesamten städtischen Busnetzes erstellen.

3 Simulationsumgebung für das E-Bus-Gesamtsystem

Der wesentliche Grundsatz der Struktur des Gesamtmodells liegt darin das Fahrzeug E-Bus nicht isoliert zu betrachten. Wie bereits dargelegt wurde, hängt der Betrieb eines Stadtbusses direkt von den ihm vorgegebenen Umweltbedingungen ab, innerhalb derer er sich bewegt. Entsprechend lassen sich die technischen Teilsysteme sowie das Gesamtfahrzeug nur dann detailliert untersuchen und optimieren, wenn es gelingt, die sie von außen beeinflussenden Faktoren möglichst realitätsnah abzubilden. Daher erfolgt neben der Modellierung des Fahrzeugs auch eine tiefgreifende Modellierung des dazugehörigen Betriebs und der Infrastruktur. Hierbei wird das Ziel verfolgt, für die Modellbildung eines jeden der drei Teilsysteme, die jeweils am besten geeignete Softwarelösung zu wählen und das Gesamtsystem als Co-Simulation zu simulieren.

Die Modellierung des Fahrzeugs wird aufgeteilt in ein physikalisches Modell des Antriebsstrangs und in das dieses umfassende Gesamtfahrzeugmodell, welches auch das Fahrermodell integriert. Dabei erfolgt die Beschränkung auf eine rein längsdynamische Betrachtung mit Fokus auf die elektrischen Energieflüsse. Für den Antriebsstrang wird die Software Dymola von Dassault Systèmes verwendet, die, basierend auf der Modellierungssprache Modelica, die virtuelle Abbildung detailgetreuer physikalischer Bauteile und Zusammenhänge erlaubt. Zur Abbildung des Gesamtfahrzeug- sowie des Fahrermodells wird auf das Softwaretool TruckMaker der IPG Automotive GmbH zurückgegriffen. Zur Modellbildung der Infrastruktur, vor allem zum virtuellen Aufbau der Strecke, wird ebenfalls TruckMaker eingesetzt, ergänzt durch Karteninformationen des OpenSource-Kartendienstes OpenStreetMap.

Um die Rahmenbedingungen des Betriebs abzubilden, wird sich der Funktionalitäten der Software Matlab in Verbindung mit dem Tool Simulink von The MathWorks bedient. Die Simulink-Umgebung stellt auch die zentrale Bedienebene der Co-Simulation dar, von welcher aus auf die anderen Softwaretools zugegriffen wird. Durch eine darauf aufbauende Co-Simulation zwischen den Programmen IPG TruckMaker und der Verkehrssimulationssoftware Vissim der PTV Group besteht zudem die Möglichkeit, unabhängig von gemessenen Fahrzyklen und basierend auf Verkehrszählungen, einen frei konfigurierbaren Verkehrsfluss in die Simulation zu integrieren.

Zur vereinfachten und zentralen Bedienung der gesamten Simulationsumgebung wird, basierend auf Excel VBA, eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt. Die Visualisierung der Simulation erfolgt durch eine 3D-Animation der Busfahrt mit der Software IPG TruckMaker.

Die Fahrzyklen als wesentliche Inputgröße der Simulation müssen aufgrund der genannten, dem Busbetrieb zugrunde liegenden Rahmenbedingungen wie Fahrplanvorgaben,

Streckenführung, Halteorte, Ladepunkte, momentane Ladeleistungen oder Passagieraufkommen anpassbar sein. Nur dadurch wird es möglich, verschiedene Betriebsszenarien wie Stau, Streckensperrungen, Verspätungen, die Verlegung von Ladepunkten oder reduzierten Ladeleistungen im Rahmen einer Parametervariation auszutesten.

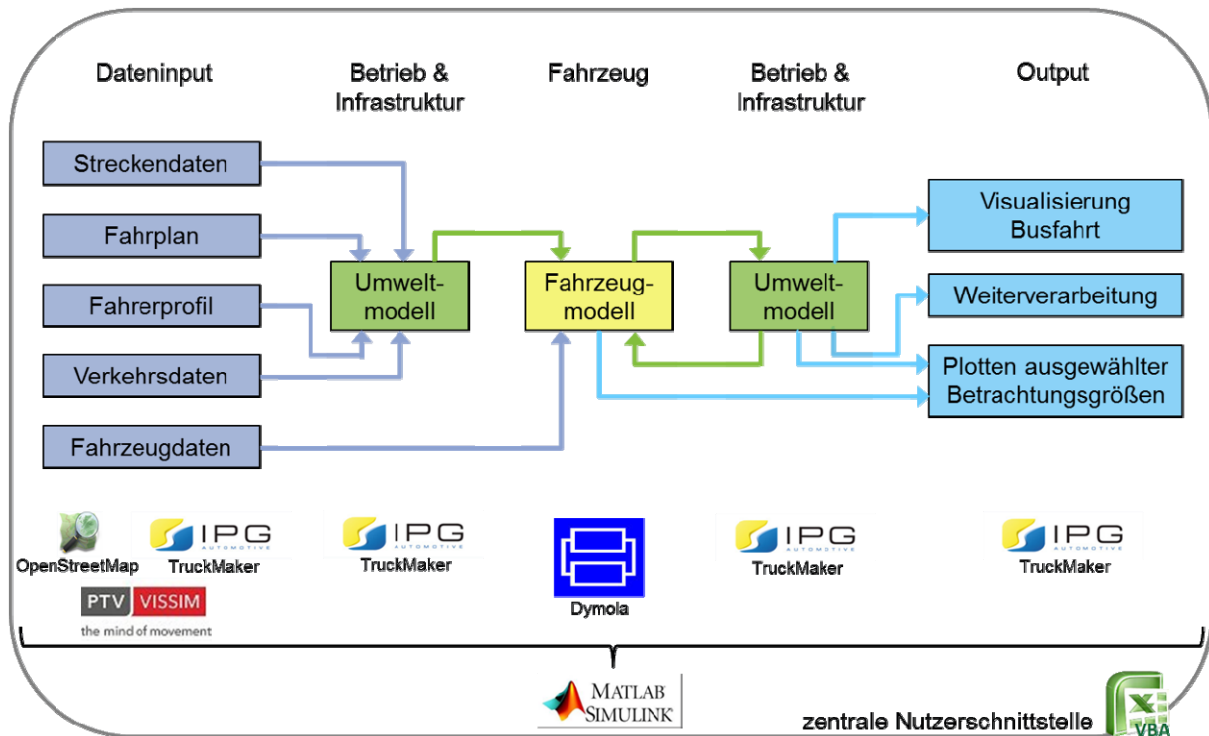


Abb. 3-1: Struktur der Gesamtsystemsimulation und entsprechender Softwareeinsatz

Zur simulativen Umsetzung dieser Anforderungen an die Generierung von Fahrzyklen bestehen zwei unterschiedliche Herangehensweisen:

1) Messdatenbasierter Fahrzyklenbaukasten:

Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist das Vermessen einer Buslinie mit einem GPS-Datenlogger. Hieraus erhält man, neben den GPS-Koordinaten der gefahrenen Strecke, die Geschwindigkeit über der Zeit. Aus diesen Informationen lassen sich die Haltewahrscheinlichkeiten, Haltezeiten, gefahrene Umwege, Einhaltung der Fahrplanvorgaben sowie Informationen über den Verkehrsfluss oder z. B. auch Ampelstandzeiten einer Buslinie ablesen bzw. errechnen.

Ein Algorithmus gleicht daraufhin den GPS-Datensatz jeder beliebigen Messfahrt mit dem Koordinatendatensatz der sich auf jeder beliebigen Linie befindlichen möglichen Haltepunkten ab. Sind alle Halteorte (Haltestellen und Ampeln) eines Umlaufes gefunden und deren Koordinaten markiert, lassen sich die einzelnen Haltezeiten des spezifischen Umlaufs ablesen und dieser sich in Haltephasen und Fahrabschnitte unterteilen.

Gemäß dem Baukastenprinzip kann nun durch Benutzereingabe der gemessene Originalfahrzyklus entsprechend eines zu konstruierenden Testszenarios abgeändert werden. So ist es möglich, einzelne Halteperioden aus dem Originalzyklus zu löschen, zu verlängern, sie als Ladepunkte mit unterschiedlichen Rüstzeiten für die Ladeschnitt-

stelle, Leistungsabgaben des Versorgungsnetzes oder den Typus des angeschlossenen Versorgungsnetzes zu deklarieren sowie die Anzahl der zu- und aussteigenden Fahrgäste vorzugeben.

Zusätzlich lassen sich auch Fahrabschnitte eines Zyklus durch Messdaten von Umwegfahrten oder mit einer erhöhten Verkehrsdichte auf dem gleichen Abschnitt ersetzen. Über diese beiden Pfade kann die Modellierung des Verkehrsgeschehens, von welchem der Bus bei der Fahrt durch den Innenstadtverkehr im wesentlichen Maße anhängig ist, an verschiedene Intensitäten angepasst werden.

2) Fahrzyklengenerierung mit Verkehrsmodellintegration:

Möchte man das Verkehrsgeschehen zwischen den Haltestellen nicht nur auf Basis von vorliegenden GPS-Messungen von Busfahrten abbilden, sondern den Verkehrsfluss auf jedem beliebigen Streckenabschnitt der Gesamtsystemsimulation frei konfigurierbar vorgeben können, so kann man sich entweder auf vorliegende Werte von Verkehrszählungen stützen, oder man gibt, z. B. im Rahmen einer Parametervariation, die Verkehrsintensität einer Teilstrecke gänzlich unabhängig von Messwerten vor.

Zur Realisierung dieses Ansatzes wurde eine Kopplung der bereits vorgestellten Fahrzeugsimulationssoftware TruckMaker mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationssoftware Vissim implementiert. Vissim ist in der Lage, neben dem motorisierten Individualverkehr auch eine Vielzahl weiterer Verkehrsteilnehmer des städtischen Verkehrsgeschehens, wie zum Beispiel Radfahrer, Fußgänger oder den ÖPNV und deren Verhalten zu simulieren. Kern der Verkehrssimulation ist hierbei ein Fahrzeugfolgemo-
dell, welches auf einen zufällig durch das stochastische Einfügen von Verkehrsobjekten generierten Verkehr reagiert. Hierdurch lässt sich ein realistischer Verkehrsfluss darstellen, welcher in die Fahrzeugsimulationsumgebung TruckMaker übermittelt wird, damit das Fahrermodell des Busses hierauf reagiert. Ebenso können umfangreich Steuerungen für Lichtsignalanlagen in die Verkehrssimulation eingebunden werden.

Ob sich für die Generierung von Fahrzyklen der Einsatz des Fahrzyklenbaukastens oder die Co-Simulation Vissim – TruckMaker empfiehlt, hängt vom Untersuchungsgegenstand ab. Für Analysen zur Auslegung einer mit E-Bussen betriebenen Linie oder eines Netzes sind reale Messdaten der Busfahrten unabdingbar. Nur diese können Auskunft über Haltewahrscheinlichkeiten, Haltedauern oder Umwegfahrten geben. Ist es hingegen von Interesse, zukünftige Verkehrsdichten oder -einflüsse, ggf. unter Berücksichtigung zukünftiger Technologien wie autonomes Fahren, Car-to-X-Kommunikation oder Verkehrsleitsystemen in die Analyse mit aufzunehmen, so bietet der Ansatz der Kopplung der Fahrzeugsimulation mit der Verkehrssimulation neue und messdatenunabhängige Analysemethoden.

4 Vorläufige Untersuchungsergebnisse

Die nachfolgend gezeigten Simulationsergebnisse der Entlade- und Ladekurven des Akkus eines E-Busses in Abhängigkeit des gefahrenen Fahrzyklus sollen einen ersten Eindruck der Potenziale der vorgestellten Simulationsumgebung erlauben. Da bisher außer GPS-Messdaten noch keine Fahrzeugmesswerte der Mannheimer E-Busse vorliegen, basieren die für die Simulation verwendeten Inputdaten in Teilen auf Annahmen. Dies hat

zur Folge, dass die damit generierten Ergebnisse als nicht validiert einzustufen sind. Vorrangiges Ziel der gezeigten Graphen ist es daher Größenordnungen und Tendenzen aufzuzeigen.

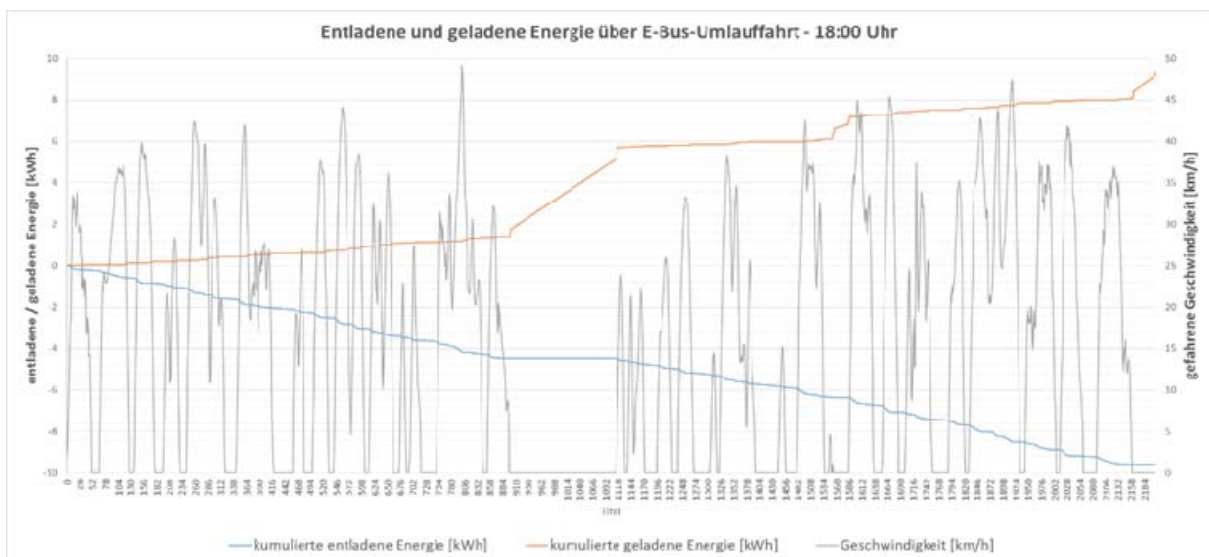
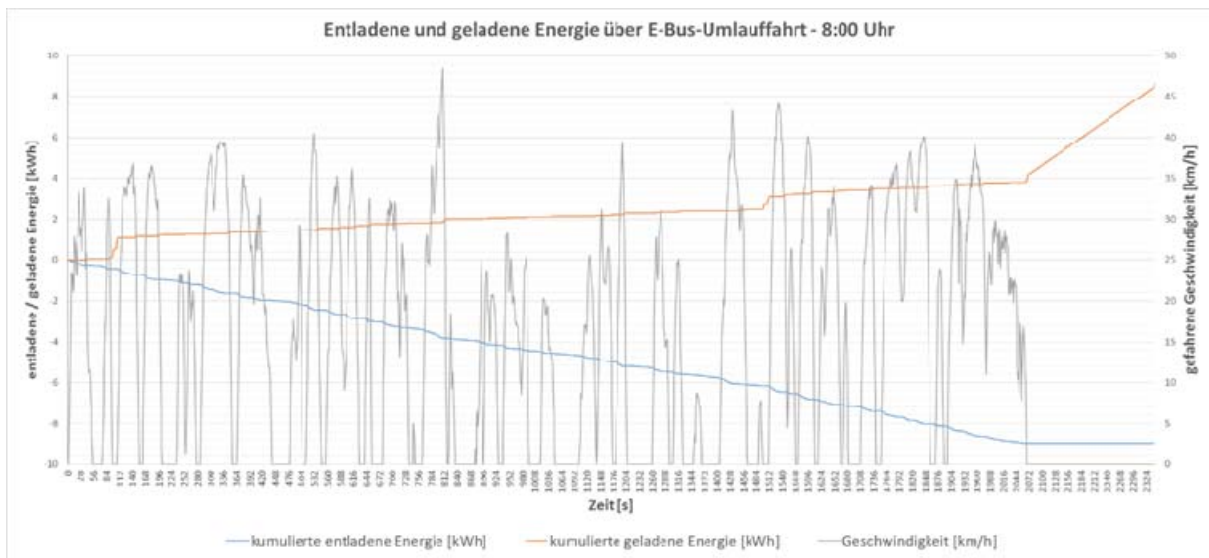


Abb. 4-1: Vergleich verschiedener Fahrzyklen, Entlade- und Ladekurven auf einer E-Buslinie zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten während eines Tages

Den gezeigten Diagrammen liegen GPS-Messungen auf der Mannheimer Buslinie 63 zugrunde, mit Hilfe derer sich die Geschwindigkeit über der Zeit veranschaulichen lässt. Alle GPS-Messdaten wurden am gleichen Tag aufgenommen, jeweils zu unterschiedlichen Uhrzeiten. Dies gibt Aufschluss über die Bandbreite der über den Tag variierenden Umlaufzeiten, Verkehrsdichten und vor allem über die Haltezeiten des Busses an der Wendebzw. Endhaltestelle.

Anhand der Intervalle, innerhalb derer die Ladekurve über einen längeren Zeitabschnitt linear stark ansteigt, lässt sich feststellen, wo sich auf dem betrachteten Umlauf Ladepunkte befinden. An den Stellen, an welchen längere Ladephasen auftreten, sind die

Wendehaltestelle und die Endhaltestelle auszumachen, die aufgrund einer im Fahrplan enthaltenen mehrminütigen Pufferzeit für das Nachladen eine besondere Relevanz aufweisen. Ebenso wird deutlich, dass die über den Umlauf bei jedem Bremsvorgang rekuperierte Energie in Summe eine höhere Nachladung ermöglicht, als dies die auf Unterwegshaltestellen befindlichen Ladepunkte erlauben. Hierdurch wird die Bedeutung der Rekuperation bei elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen im Stadtverkehr offensichtlich.

Wenn, wie beispielsweise im 8-Uhr-Zyklus, kein längerer Halt an der Wendehaltestelle möglich ist, dann wird ein möglichst langer Halt an der Endhaltestelle umso bedeutsamer, damit die für den folgenden Umlauf benötigte Energie wieder nachgeladen werden kann.

Es wird deutlich, dass die Länge der Ladephasen in Abhängigkeit von der Tageszeit stark variiert. Dies verdeutlicht die technologische Herausforderung das Gesamtsystem bestehend aus Fahrzeug, Betrieb und Infrastruktur so zu konfigurieren, dass der E-Bus auch im Worst-Case-Fall seinen regulären Fahrplanvorgaben zuverlässig gerecht werden kann. Besonders die Abwägung der Dimensionierung der Akkukapazität im Verhältnis zur Anzahl der auf einer Linie zu errichtenden Ladepunkte, bei variierenden Haltedauern, gerät hierbei in den Fokus des Interesses [6]. Das anzustrebende Ziel besteht darin, eine kostenoptimale Konfiguration zu finden, die den Grad der Entladung während eines Umlaufes mit der während des gleichen Umlaufes nachgeladenen Energie ins Gleichgewicht bringt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die vorgestellte Co-Simulation wird am Beispiel des E-Busbetriebs ein systemübergreifender sowie interdisziplinärer Ansatz zur Entwicklung, Analyse und Optimierung urbaner E-Nutzfahrzeugverkehre möglich. Die geschaffene Softwareumgebung stellt verschiedenen Interessensgruppen (Betreiber, Fahrzeugentwickler, Komponentenhersteller, Forschern diverser Fachrichtungen) eine modular beliebig erweiter- sowie detaillierbare Entwicklungs- und Simulationsumgebung für ihre jeweiligen speziellen Fragestellungen im Rahmen eines Model- oder Hardware-in-the-Loop Ansatzes zur Verfügung. Hierdurch können unter realitätsnahen, reproduzierbaren und im großen Umfang frei parametrisierbaren Bedingungen diverse Fragestellungen unterschiedlicher Fachbereiche (z. B. Entwicklungsingenieure, Verkehrsplaner, Betriebswirtschaftler) eingehend untersucht werden.

Im Rahmen virtueller Dauertests lassen sich verschiedene Topologien, variierende Temperaturen, Ladedauern, Lastkurven des Energieversorgungsnetzes, Alterungseffekte der Batterie, Regelungsstrategien für Nebenverbraucher, Auswirkungen von Streckenänderungen, unterschiedlichen Verkehrszuständen oder Fahreigenschaften testen. Mit den hieraus gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich vielfältige Optimierungsansätze auf Komponenten-, Fahrzeug-, Infrastruktur- oder Betriebsebene mit dem Ziel eines verbesserten Energiemanagements. So lassen sich die Treiber des Energiebedarfs identifizieren und daraus abgeleitet zukünftig etwa Nebenverbraucher energieeffizienter konfigurieren und ansteuern. Auch wird die Dimensionierung des Akkus vereinfacht. Ermöglicht werden des Weiteren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Energiefluss- und Emissionsvergleiche verschiedener Antriebskonzepte (verbrennungsmotorisch, elektrisch, hybrid). Im Kontext

der Einbindung einer Verkehrssimulationssoftware, lässt sich die Interaktion des Busses und dessen Fahrer mit dem Straßenverkehr sowie der Verkehrsleittechnik, im Sinne der Energie- und Zeiteffizienz, durch Ansätze wie Bus-to-X-Kommunikation oder aktives Fahrercoaching optimieren.

Von grundlegendem Interesse ist darüber hinaus die Verwendung der ermittelten Simulationsergebnisse zur Auslegung einer Buslinie oder eines gesamten städtischen Busnetzes für elektrisches Fahren. Der in verschiedenen Szenarien ermittelte durchschnittliche Energiebedarf auf der Fahrt zwischen den einzelnen Haltestellen stellt hierbei eine wesentliche Inputgröße für den kostenminimalen Aufbau einer stadtweiten Ladeinfrastruktur im ÖPNV-Netz sowie für die E-Fahrzeugauslegung dar. Zur Durchführung einer solchen Liniennetzuntersuchung wurde eine Methodik entwickelt, die mithilfe eines Optimierungsansatzes aus der Standortplanung (Operations Research) die gewünschte energie- und kostenoptimale Liniennetz- und Fahrzeugkonfiguration errechnet [7]. Durch die Übertragbarkeit der Simulation auf diverse Ladetechnologien und andere Fahrzeuggattungen, lässt sich beispielsweise auch die Mitnutzung der Bus-Ladeinfrastruktur durch weitere urbane Nutzfahrzeuge wie Kehrmaschinen, Lieferlastwagen oder Müllfahrzeuge analysieren. So wird mithilfe der entwickelten Softwareumgebung ein umfassender Beitrag dazu geleistet, der lärm- und schadstoffreduzierten urbanen ÖPNV- und Nutzfahrzeug-Mobilität der Zukunft den Weg zu ebnen.

Zur Kenntnisnahme:

Die Autoren weisen darauf hin, dass die Forschungsarbeiten zum vorgestellten Projekt im Rahmen des durch das deutsche Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderten Leuchtturmprojektes „PRIMOVE Mannheim“ entstanden sind und von diesem finanziell gefördert werden.

6 Literatur

- [1] BMVI: Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus, „Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland“, Statusbericht 2014, 2015
- [2] Müller-Hellmann, A.: „Batteriebusse im ÖPNV – Strategien, Konzepte, Realisierungen“ 6. ZVEI Handbuch Elektromobilität, 2015
- [3] Staubach, T.: Schunk Smart Charging – SEB, 6. VDV-Akademie Konferenz Elektrobuss, Berlin, 2015
- [4] UITP: UITP-Projekt „SORT“, Standardisierte Zyklen für Straßentests, 2. Auflage, 2009
- [5] Schlosser, A.: „Schwerpunkte der BMVI-Förderrichtlinie zur Elektromobilität ab 2015“, 2. Fachkonferenz des BMVI, Offenbach, 2015
- [6] Berthold, K.; Gratzfeld, P.; Donn, C.: Virtuelle Gesamtsystemoptimierung von E-Nutzfahrzeugen im urbanen Verkehr mittels gekoppelter Simulation am Beispiel des E-Busses, 8. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, Graz, 2015
- [7] Rohrbeck, B.; Berthold, K.; Förster, P.: Location Planning of Charging Stations for Electric City Buses, OR2015, Wien, 2015

Gesamtsystemintegration eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Brennstoffzellen Range Extender

Dipl.-Ing. Akin Simsek, Dr.-Ing. Lars-Fredrik Berg, Dr.-Ing. Hans-Peter Kollmeier

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme -
NAS, Institut für Chemische Technologie ICT

I Kurzfassung

Im Fraunhofer Innovationscluster REM 2030 [1] werden Lösungsansätze für die zukünftige, urbane Mobilität erarbeitet. Das Kernthema Hardware befasste sich dabei mit der Entwicklung innovativer Antriebstechnologien. Das Ziel im Rahmen des Projektes war es, die entwickelten Technologien in ein funktionsfähiges Demonstrationsfahrzeug zu integrieren. Hierzu befasste man sich in der Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme des Fraunhofer Institutes für Chemische Technologie ICT unter anderem mit dem Gesamtsystem Fahrzeug und dem Gesamtfahrzeugpackaging. In enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern des KIT sowie Industrieunternehmen, zu verschiedenen Disziplinen, konnten Anforderungen und Randbedingung zu allen Fahrzeugrelevanten Komponenten und Systemen geklärt und auf Basis dessen erste Bauraumstudien sowie Kollisionsprüfungen durchgeführt werden. Darauf aufbauend folgte eine kontinuierliche Verfeinerung und Optimierung des Fahrzeugpackaging. In den folgenden Abschnitten sollen der gesamte Fahrzeugpackagingprozess sowie die dafür benötigten Vorarbeiten erläutert werden.

II Einleitung

Der Klimaschutz und begrenzte Ressourcen erfordern neue Lösungen für die Mobilität. Diese müssen dem demographischen Wandel, dem weiter anhaltenden Trend zur Urbanisierung und dem Wertewandel gerecht werden. Neben Innovationen in der Antriebstechnologie ermöglichen besonders Informations- und Kommunikationstechnologien eine neue Form der Mobilität. Es wird notwendig, Mobilität als Gesamtzusammenhang von Fahrzeugen, technischen Infrastrukturen, organisatorischen Konzepten, intermodalen Verkehrsansätzen und Betreibermodellen zu begreifen und entsprechend zu konzipieren. Im Rahmen des Fraunhofer Innovationsclusters REM 2030 werden Lösungen für diese Herausforderungen erarbeitet. Die Projektbeteiligten arbeiten hierzu in den Kernthemen Hardware, Software, Orgware und der Mobilitätsakademie eng zusammen. Im Kernthema Hardware werden unter anderem Zukunftstechnologien für Fahrzeuge entwickelt und demonstriert. Der Fokus liegt des Weiteren nicht bei der Darstellung eines Fahrzeugkonzeptes sondern bei der Antriebstechnologieentwicklung. Daher wurde zu Beginn des Projektes ein geeignetes Fahrzeug für den urbanen Raum als Technologieträger und Demonstrationsbasis analysiert und definiert. Am Anfang eines Fahrzeugentwicklungsprozesses sind die Vorstellungen und die Ziele für den Gesamtentwurf festzuhalten. Um den Entwicklungsstand kontinuierlich im Blick zu haben und um frühzeitig Bauraumbegrenzungen und mögliche Kollisionen von Baugruppen und Komponenten zu erkennen ist ein systematischer Gesamtfahrzeugpackagingprozess unabdingbar. In den folgenden Ab-

schnitten wird auf diese Fahrzeugpackagingaktivitäten des Kernthemas Hardware eingegangen. Zunächst werden die Fahrzeugtopologie sowie der Technologieträger vorgestellt. Ein entscheidender Anteil der Aktivitäten im Packagingprozess stellen die Konzeptionierung und Gestaltung von Teilsystemen dar. Daher werden im Abschnitt Teilsystempackaging diese Arbeiten erläutert. Der Gesamtfahrzeugentwurf sowie die Integrationsaktivitäten aller Komponenten und Systeme werden im Abschnitt Gesamtfahrzeugpackaging dargestellt.

III Arbeiten im Kernthema Hardware

Im Rahmen des Innovationsclusters REM 2030 ist das Ziel des Kernthemas Hardware die Entwicklung von innovativen Antriebstechnologien für die zukünftige Mobilität sowie die Integration dieser in einen Technologieträger. Als Technologieträger dient hierbei eine Karosserie des Audi A1 Sportback. (vgl. Abbildung 1)



Abbildung 1: Technologieträger, Audi A1 Sportback

Die Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme beschäftigte sich unter anderem mit dem Gesamtfahrzeugpackaging und somit mit der kontinuierlichen Ausarbeitung des Fahrzeugentwurfs im Hinblick auf die technische Machbarkeit sowie das Zusammenspiel aller Baugruppen und Komponenten. Im Verlauf dieses Prozesses waren sowohl Gesamtsystemverständnis sowie ein Teilsystemverständnis gefordert. Die Klärung der Wechselwirkungen wie Stoff-, Informations- und Energieflüsse zwischen den Teilsystemen war dabei unabdingbar. Mit Hilfe eines 3D-CAD Systems konnten dann erste Modelle zu den Teilsystemen erstellt und Bauraumuntersuchungen sowie Kollisionsprüfungen durchgeführt werden. Ein flexibles Produktdatenmanagementsystem sorgte dabei für eine OEM-gerechte Teile- und Baugruppenstruktur. Diese Modelle wurden im Verlauf des Entwicklungsprozesses kontinuierlich verfeinert und optimiert, um die konstruktiv bestmögliche Gesamtfahrzeuglösung zu erreichen.

IV Fahrzeugtopologie und Systemmatrix

Für eine Gesamtübersicht und ein Gesamtsystemverständnis, insbesondere bei der Komplexität heutiger Fahrzeugtopologien, ist eine analytische und strukturierte Lösungsfindungsmethodik notwendig. Im Rahmen des vorliegenden Packagingprozesses wurde zum besseren Verständnis des Gesamtsystems eine Systemmatrix mit allen Wechselwirkungen und Schnittstellen zwischen den Teilsystemen generiert. Darüber hinaus wurde die Funktionsweise und somit die Stoff-, Informations-, und Energieflüsse der Teilsysteme in

dem für das Teilsystemverständnis erforderlichen Detaillierungsgrad dargestellt. Die Abbildung 2 stellt dies exemplarisch am Beispiel der reformed methanol fuel cell (RMFC) Brennstoffzelle dar. Im oberen Bereich der Abbildung sind die Stoff, Informations- und Energieflüsse des Teilsystems erfasst. Eine höhere Detaillierungsstufe des Systems ist im unteren Bereich der Abbildung zu erkennen. Nach dem dieser Prozess für alle Teilsysteme durchgeführt wurde, konnten alle Teilsysteme zum Gesamtsystem mit allen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten in einer Gesamtmatrix dargestellt werden.

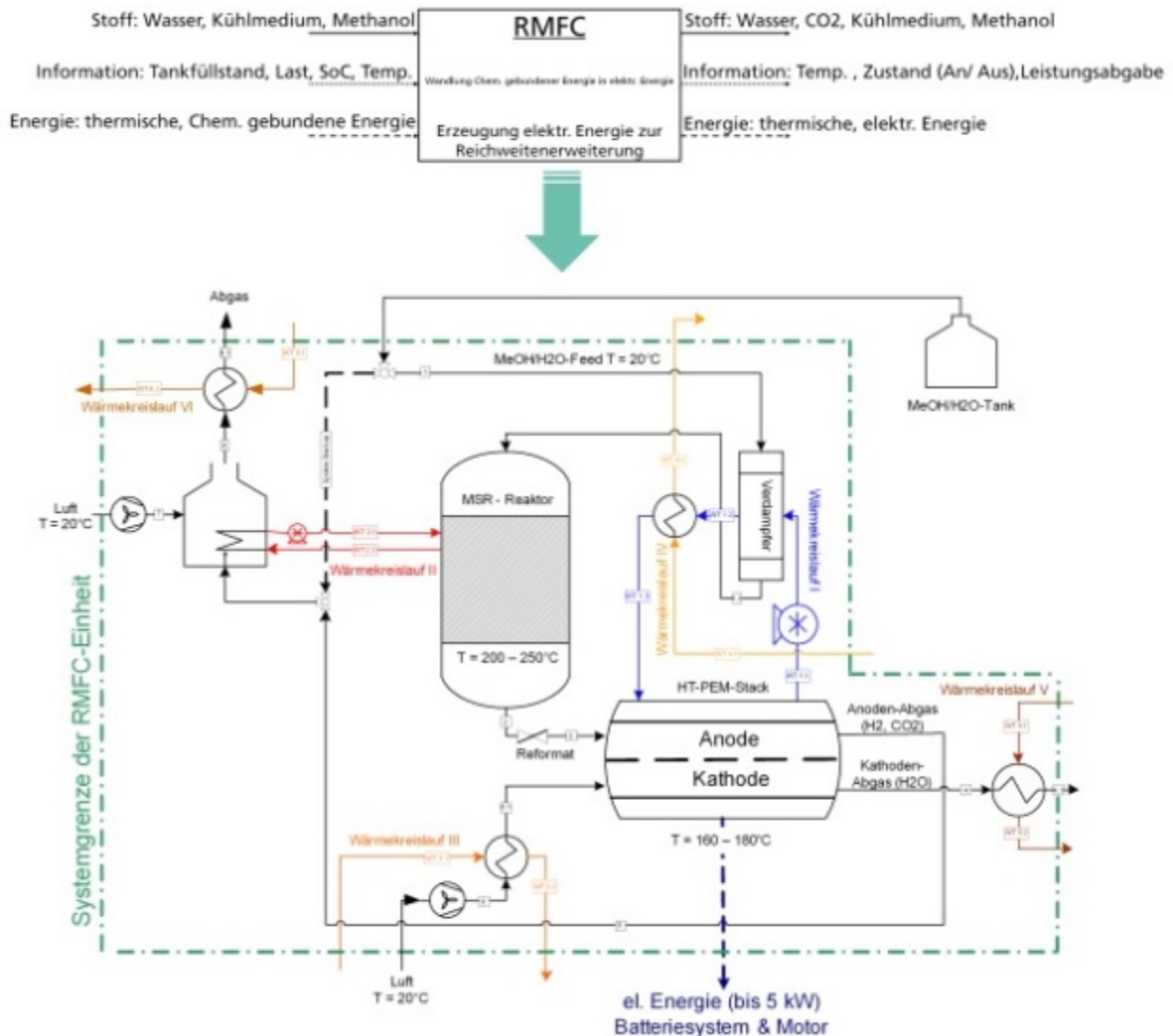


Abbildung 2: Auszug aus der Systemmatrix, RMFC

V Technologieträger

Als Technologieträger dient eine Kleinwagenkarosserie, welche eine Fahrzeuggrundform in der 2-Box [2] Ausführung aufweist. Dies bedeutet eine Einteilung des Fahrzeuggrundkörpers in zwei Bereiche. Diese sind zum einen der Motorraum und zum anderen der Insassen-/ Gepäckraum. (vgl. Abbildung 3)

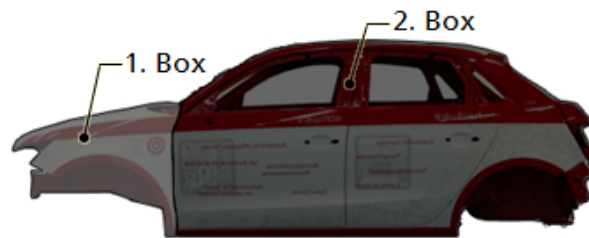


Abbildung 3: Karosserie mit 2-Box Grundform

Da das Fahrzeug in der ursprünglichen Ausführung als konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine ausgeführt war, ergeben sich durch den Wegfall aller für den verbrennungsmotorischen Antrieb benötigten Komponenten, potentielle Bauräume für den batterieelektrischen Antriebsstrang. Es stehen Bauräume im Motorraum, im Mitteltunnel, unter der Rücksitzbank und im Heckbereich des Fahrzeugs zur Verfügung. (vgl. Abbildung 4)



Abbildung 4: Verfügbare Bauräume, dargestellt an einer Draufsicht auf den Karosserieboden

Das Fahrwerk des Fahrzeugs inklusive des Bremssystems, die Lenkung, das Interieur sowie alle crashrelevanten Karosseriestrukturen sollten beibehalten werden. Die Raumabgrenzungen ergeben sich insbesondere durch diese unveränderlichen Bereiche der Karosserie sowie der zu beibehaltenden Komponenten.

VI Teilsystempackaging

Die zu integrierenden und teilweise neu entwickelten Komponenten sind ein Elektromotor mit Getriebe, eine Traktionsbatterie, eine HT-PEM Brennstoffzelle mit vorgeschaltetem Methanol-Dampfreformer, eine Leistungselektronikeinheit mit zugehöriger Peripherie um eine DC/DC-Wandlung darstellen zu können, ein Thermomodul, ein Tank für Methanol-Wassergemisch, eine geeignete Aggregatelagerung sowie entsprechend konfektionierte Verkabelungen und Verschlauchungen. Ein Teil dieser Systeme wurde im Rahmen des Projektes von Grund auf neu entwickelt, beim anderen Teil konnte man auf bereits bestehende Systeme aufbauen. Im Folgenden wird am Beispiel der Brennstoffzelle sowie der Leistungselektronik der Prozess für das Teilsystempackaging für jeden dieser zwei Fälle erläutert. Als Range Extender kommt die HT-PEM Brennstoffzelle mit vorgeschaltetem Methanol-Dampfreformer der dänischen Firma SerEnergy [3] zum Einsatz. Diese

wurde bisher ausschließlich in stationären Anwendungen eingesetzt. (vgl. Abbildung 5) Aufgrund dessen war eine Integration in das Fahrzeug ohne vorherige Anpassung des Systems, für eine mobile Anwendung, nicht möglich.

Für den Einsatz im Fahrzeug musste das Modul in einem geeigneten Gehäuse möglichst schwingungsentkoppelt und crashtsicher im Fahrzeug untergebracht werden. Des Weiteren mussten zur Sicherstellung der Funktion eine bestimmte Lage und Orientierung des Systems eingehalten werden. In der Abbildung 6 ist das Ergebnis des zur Integration bereiten Brennstoffzellenmoduls dargestellt. Dieses wurde in ein crashtsicheres Gehäuse, bestehend aus einem langfaserverstärktem Thermoplast (LFT), integriert. Die Schwingungsentkopplung erfolgt durch Elastomer-Rundlager, welche speziell für die Geräteentkopplung ausgelegt sind. Des Weiteren bietet diese Lösung alle erforderlichen Medien- und Versorgungsanschlüsse. Eine abnehmbare Gehäuseabdeckung dichtet das System zur Umgebung ab. Das fertiggestellte System hat dann ein Gesamtgewicht von ca. 60 kg und kann in einen geeigneten Bauraum des Fahrzeugs integriert werden.

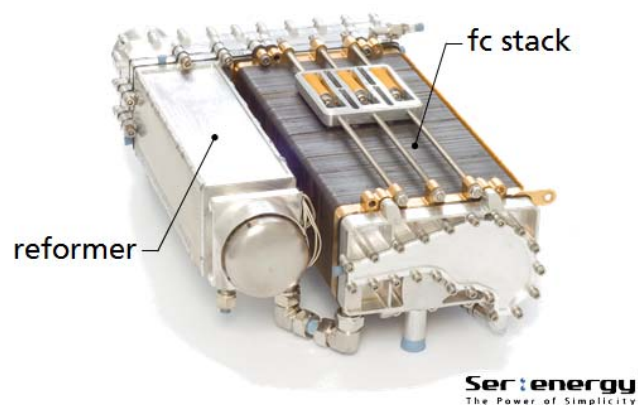


Abbildung 5: Brennstoffzellenstack mit Reformer

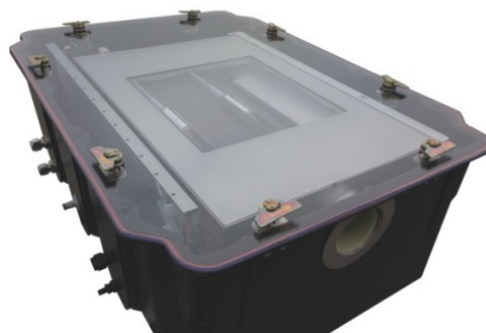


Abbildung 6: HT-PEM Brennstoffzellensystem in LFT-Box

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern UniTek Industrieelektronik GmbH und dem Elektrotechnischen Institut ETI des KIT wurde eine für den geforderten Leistungsbereich geeignete Leitungselektronik (AC/DC – DC/DC-Wandlereinheit) von Grund auf neu entwickelt. Der Fokus bei der Entwicklung lag neben den Leistungsdaten, insbesondere im Hinblick auf die Fahrzeugintegration, bei der Gestaltung einer möglichst hochintegrierten, kompakten und leichten Einheit. In der Abbildung 7 ist die Grundidee hierfür dargestellt.

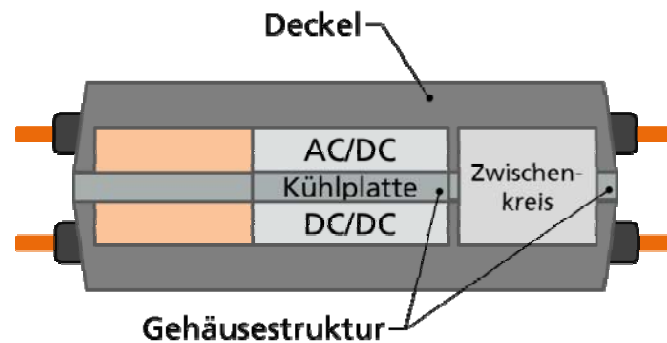
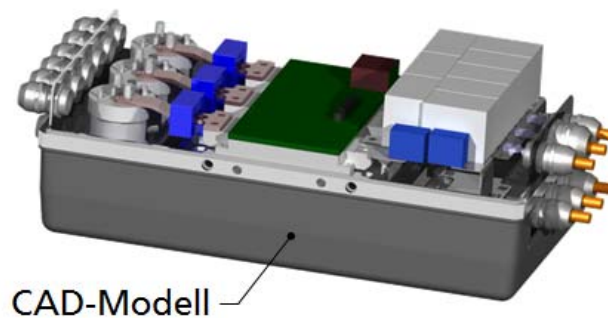
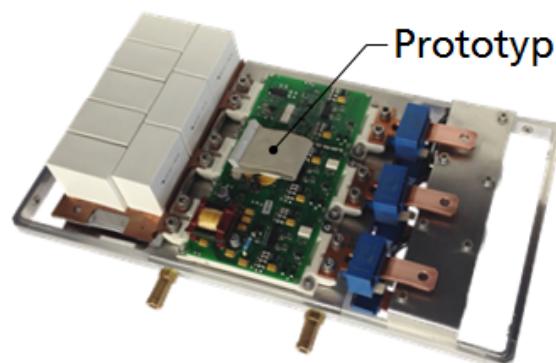


Abbildung 7: Skizze zum Grundaufbau der Leistungselektronik

Die Idee war dabei DC/DC-Wandler und AC/DC-Anordnung in ein gemeinsames Gehäuse zu integrieren. Der DC/DC-Wandler kommt hierbei zum Einsatz um einem Abfall der Spannung im Wechselrichter, bei sinkendem Ladezustand der Batterie, entgegenzuwirken. Die elektrische Maschine kann somit auch bei sinkendem Ladezustand der Batterie bei maximaler Leistung betrieben werden. Eine Kühlplatte, die gleichzeitig als Gehäusestruktur dient, ist zentral angeordnet. Auf der einen Seite der Kühlplatte befindet sich die DC/DC-Anordnung und auf der anderen Seite die AC/DC Anordnung. Durch zwei Deckel, einer oben der andere unten auf der Gehäusestruktur, wird das System zur Umgebung abgeschirmt sowie gedichtet. Die Integration und Montage ins Fahrzeug erfolgt durch eine Anbindung an der Kühlplatte. In Abbildung 8 ist das halbseitig offene CAD-Modell und ein erster Prototyp zu sehen.



CAD-Modell



Prototyp

Abbildung 8: CAD-Modell (oben), Prototyp (unten) der Leistungselektronik

Insgesamt konnte hierdurch eine kompakte Einheit mit den Abmessungen (490mmx 230mm x190mm) realisiert werden. Das Gesamtgewicht beträgt dabei ca. 10 kg.

VII Gesamtfahrzeugpackaging

Bevor eine Integration der Komponenten erfolgen konnte mussten geeignete Bauräume für jede der Komponenten definiert werden. Hierbei waren Kriterien wie notwendige räumliche Nähe von Komponenten zueinander, crashgefährdete Bereiche, Massenverteilung sowie die Schnittstellen zum Fahrwerk und zur Karosserie von großer Bedeutung. Wie zuvor beschrieben wurden im Packagingprozess zunächst einfache Bauraummodelle zu den einzelnen Systemen erstellt und eine Bauraumstudie durchgeführt. Hierbei konnten erste Aussagen darüber getroffen werden, welche Bauräume grundsätzlich für die Komponenten in Frage kommen und ob bereits in einem frühen Stadium mögliche Kollisionen zu erkennen sind. Da das Antriebskonzept eine zentrale Antriebseinheit aus Elektromotor und Getriebe und eine Anbindung an das bestehende Fahrwerk vorsieht, war eine Platzierung der Antriebseinheit im Motorraum naheliegend. Das Elektromotorkonzept [4] stammt vom Elektrotechnischen Institut ETI des KIT und beruht auf einer permanentenregten Synchronmaschine. Das Zusammenspiel der Zahnspulenwicklung mit Hochkantflachdrahtwicklung, innovativem innenliegenden Kühlkonzept und einem Lagerschild aus Thermoplast führt zu einer kompakten, leichten und leistungsstarken elektrischen Maschine. (vgl. Abbildung 9)



Abbildung 9: Schnittbild zum Elektromotor

Die Getriebeeinheit besteht aus einem zweistufigen Getriebe mit Differenzial. Dieses wurde von den Partnern Spezialgetriebebau Rainer & Oliver Puls GmbH und dem Institut für Produktentwicklung IPEK des KIT entwickelt. (vgl. Abbildung 10)

In starker Wechselwirkung mit dem Elektromotor stehen die Leistungselektronik sowie die Traktionsbatterie mit ihrem Batteriemanagementsystem. Aufgrund dessen war eine räumliche Nähe dieser Komponenten gefordert. Die Integration der Leistungselektronik, ebenfalls im Motorraum, war aufgrund der kompakten Gestalt möglich. Ein geeigneter Bauraum für die Traktionsbatterie sollte nicht nur eine räumliche Nähe zu Elektromotor und Leistungselektronik aufweisen sondern gleichzeitig nicht im direkten Crashbereich des Fahrzeugs liegen. Der Mittelunnel sowie der Bereich unter der Rücksitzbank bieten sich daher als möglichen Bauraum für die Traktionsbatterie an. Im Motorraum und im Heckbereich ist für das Batteriekonzept kein ausreichender Platz. Des Weiteren liegen diese Bauräume im direkten Crashbereich des Fahrzeugs. Der Bauraum im Mittelunnel

bietet zudem die geforderte Nähe zu den beiden Komponenten Leistungselektronik und Elektromotor. Aufgebaut ist die Batterie aus sieben quaderförmigen Modulen bestehend aus 24 Pouch-Zellen, wobei je 12 Zellen in Reihe und 2x12 Zellen parallel geschaltet sind. Im Mitteltunnel können durch diesen Aufbau der Batterie fünf der sieben Module hintereinander angeordnet werden. Eine Integration ist jedoch, ohne Einfluss auf die Karosserie in diesem Bereich, nicht möglich. (vgl. Abbildung 11) Weitere zwei Module können unter der Rücksitzbank platziert werden.



Abbildung 10: CAD-Modell zur Getriebeeinheit



Abbildung 11: Anordnung der Batteriemodule, Karosserieunterboden

Die Konditionierung der Batterie erfolgt über Luft, die je nach Bedarf in einem Kreislauf aufgeheizt oder gekühlt wird. Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik des KIT entwickelte ein geeignetes Leichtbaugehäuse aus einem Faserverbundwerkstoff, indem die fünf Module für den Mitteltunnel verbaut sind. (vgl. Abbildung 12) Für die zwei Module unter der Rücksitzbank ist eine weitere Gehäusekonstruktion vorgesehen. Diese besteht aus einer Aluminium Grundplatte auf der die Module verschraubt sind. Zur Abdichtung ist ein Deckel aus einem Sandwichmaterial vorgesehen, welches im T-RTM Verfahren hergestellt wird. Die Anbindung zur Karosserie erfolgt über Aluminiumprofile, die an der Grundplatte verschraubt sind. (vgl. Abbildung 13)

Ein weiteres Thema stellt die Klimatisierung sowie das Kühlen bzw. Heizen der Komponenten dar. Ein Thermomodul [5] (vgl. Abbildung 14), welches mit dem Partner KSPG Automotive AG entwickelt wurde, ermöglicht das intelligente Verschalten der Wärmequellen und der Wärmesenken des Gesamtsystems. Hierdurch kann der Fahrgastraum je nach Bedarf aufgeheizt oder gekühlt werden. Die Abwärme des Elektromotors, der Leis-

tungselektronik, der Traktionsbatterie sowie der Brennstoffzelle fließen hierbei in den Kreislauf ein. Bei der Suche nach einem geeigneten Bauraum für das Thermomodul waren verschiedene Kriterien entscheidend. Zum einen besteht das System aus einer Wärmepumpe, die über die Leistungselektronik angesteuert werden muss. Zum anderen gibt es im System zwei Wärmetauscher, welche mit den zuvor genannten Komponenten über zwei Kreisläufe verschaltet werden müssen. Darüber hinaus ist eine Einbindung des Fahrzeugfrontkühlers und des Innenraumwärmetauschers gefordert. Aufgrund dessen war eine Integration im Motorraum die beste Lösung für all diese Randbedingungen.

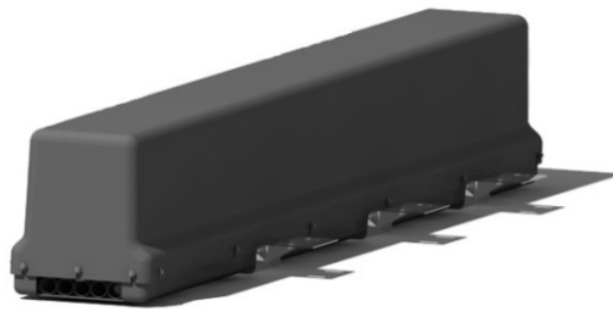


Abbildung 12: Batteriegehäuse für fünf Module im Mitteltunnel

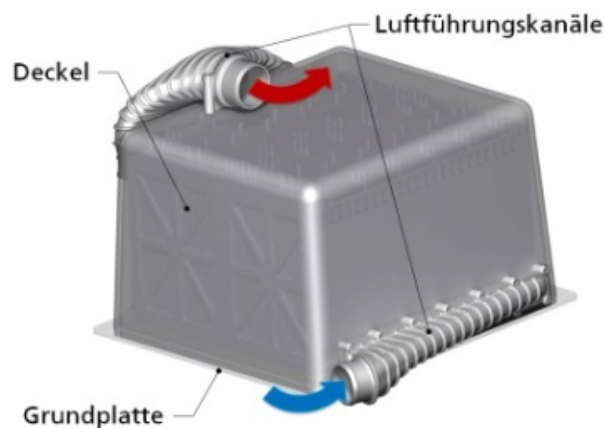


Abbildung 13: Batteriegehäuse für 2 Module unter der Rücksitzbank

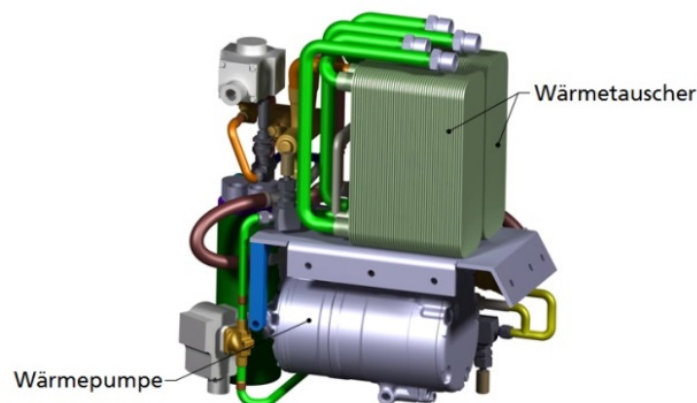


Abbildung 14: CAD-Modell zum Thermomodul, KSPG AG

Bei der Integration des bereits beschriebenen Range Extenders auf Brennstoffzellenbasis musste, insbesondere im Hinblick auf einen Crash, eine Kompromisslösung gefunden werden. Ein geeigneter Bauraum stand aufgrund der Gesamtabmessungen des Systems nur im Heckbereich des Fahrzeugs zur Verfügung. Da der Heckbereich direkt im Crashbereich des Fahrzeugs liegt, musste eine Gefahr für Insassen ausgeschlossen werden. Es konnte eine Lösung gefunden werden, die im Crashfall das Eindringen der LFT-Box samt Brennstoffzellensystem verhindert. Zum Betreiben der Brennstoffzelle ist außerdem ein Tank für das Methanol-Wasser-gemisch nötig. In Zusammenarbeit mit dem Partner Plastic Omnium Group konnte auf Basis des Original Fahrzeugtankstutzens ein geeigneter Tank mit dem Volumen von 11 l generiert werden. Ein passender Bauraum für den Tank ist der Bereich unter der Rücksitzbank, da einerseits der Tankdeckel samt Einfüllstutzen genutzt werden kann und andererseits die Nähe zur Brennstoffzelle gewährleistet ist. (vgl. Abbildung 15)



Abbildung 15: CAD-Modell zum Heckbereich mit integriertem Range Extender und Tank

Die Anbindung aller Aggregate und Komponenten an die Karosseriestruktur war eine weitere Herausforderung. Eine individuelle Schwingungsentkopplung der einzelnen Systeme sowie eine hohe Modularität der Anbindungen lagen hierbei im Fokus. Am Beispiel der Anbindungen im Motorraum soll dieser Prozess im Folgenden erläutert werden. Die Lagerung der Antriebseinheit stand bei der Ideenentwicklung einer geeigneten Aggregate-lagerung im Mittelpunkt. Das Antriebsmoment, die Belastungen aufgrund der Beschleunigungen durch die Unebenheit der Fahrbahn sowie die dynamischen Lastwechsel waren entscheidend für die Auslegung von Halterungen und Schwingungsdämpfern. Eine starr mit der Karosserie verbundene Rohrkonstruktion sollte als Basis für die Antriebslagerung dienen. (vgl. Abbildung 16) An dieser Rohrkonstruktion sollen darüber hinaus möglichst viele weitere Komponenten im Motorraum angebinden werden. Dies würde eine einfache Montage bzw. Demontage mehrerer Komponenten gleichzeitig ins Fahrzeug ermöglichen. Des Weiteren ermöglicht dieser Aufbau die Übertragung des Moduls durch geringe Anpassungen in andere konventionelle Frontantriebsfahrzeugkonzepte mit modularer Querbaukastenform.

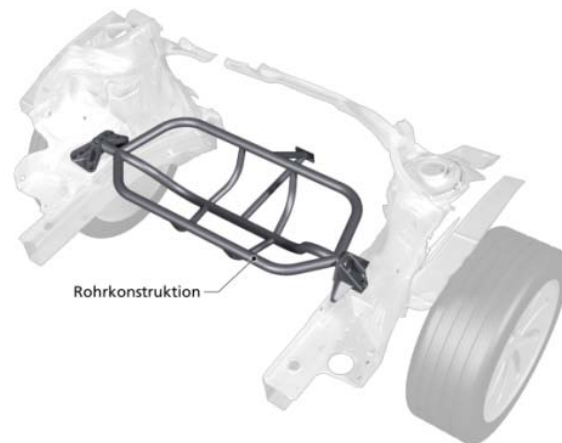


Abbildung 16: Rohrkonstruktion im Motorraum des Fahrzeugs

Zur starren Anbindung an die Karosserie konnten die ursprünglichen Motorlageranbindungspunkte verwendet werden. Die Auslegung der Motorlager erfolgte mit Unterstützung des Projektpartners TrelleborgVibracoustics TBVC. Auf Basis mehrerer Simulationsiterationen konnten die Lagerpositionen und die Lagerbauform ausgewählt werden. In der Abbildung 17 sind die Lagerpunkte zu sehen. Die Hauptlagerungspunkte befinden sich dabei in der yz-Ebene des Antriebsschwerpunktes und werden über mit der Rohkonstruktion verschweißte Konsolen an dieser Position gehalten. Das dritte Lager stellt die Pendelstütze dar. Diese befindet sich am ursprünglichen Anbindungspunkt am Fahrschemel des Fahrzeuges und nimmt die auftretenden Torsionsschwingungen auf.

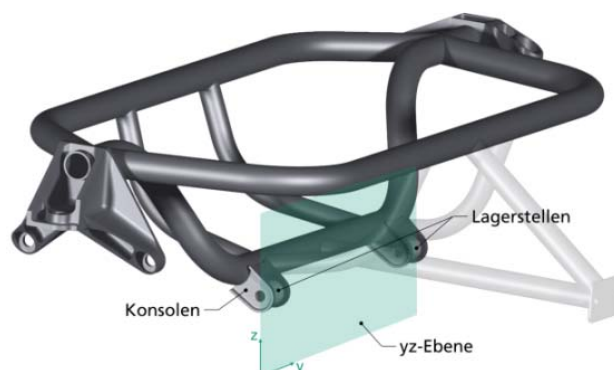


Abbildung 17: Hauptlagerstellen der Antriebseinheit an der Rohrkonstruktion

Durch eine entsprechende Gestaltung der Rohrkonstruktion konnte die Leistungselektronik ebenfalls entkoppelt an den Rahmen angebunden werden. Zur Entkopplung kommen auch hier Rundlager für die Geräteentkopplung zum Einsatz. Die zur Leistungselektronik zugehörige Peripherie ist eine weitere Komponente, die an der Rohrkonstruktion analog zur Leistungselektronik, angebracht werden konnte. In der Abbildung 18 ist der Gesamtaufbau dieses Aggregatmoduls zu sehen.

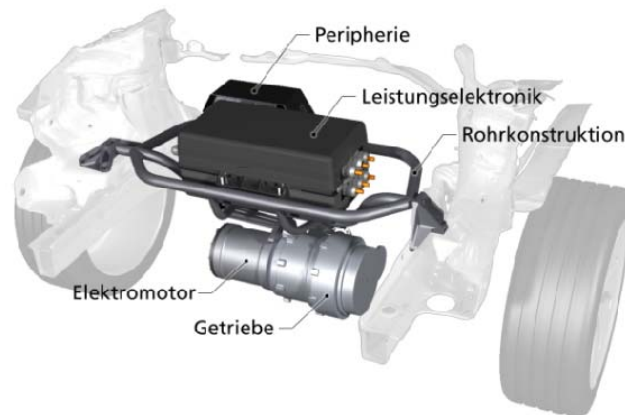


Abbildung 18: Gesamtes Aggregatmodul im Motorraum des Fahrzeugs

Nach einmaligem Aufbau kann dieses Modul, nach Lösen der Anbindungsschrauben sowie dem Trennen von Verschlauchung und Verkabelung, als vollständiges Antriebsmodul aus- und eingebaut werden.

Als Gesamtergebnis des Fahrzeugpackagings ergeben sich dadurch die Anordnungen und Lagen aller Systeme, wie sie in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. Im Motorraum sind das beschriebene Antriebsmodul sowie das Thermomodul integriert zu sehen. Im Mitteltunnelbereich und im Bereich unter der Rücksitzbank sind Teilbereiche der Batteriegehäuse zu erkennen. Der Range Extender konnte nach Umbau der Karosserie im Heckbereich platziert werden. In der Ansicht auf den Karosserieboden kann man des Weiteren die Antriebseinheit erkennen. Die Mitteltunnelbatterie wird über einen Profil-Halterahmen an der Karosserie befestigt. Der Tank für das Methanol-Wassergemisch ist im Bereich unter der Rücksitzbank integriert und mit dem originalen Einfüllstutzen des Fahrzeugs verbunden. Insgesamt ergibt sich nach der Adaption und der Integration aller E-Antriebstechnologien ein stimmiges Gesamtfahrzeugpackaging.

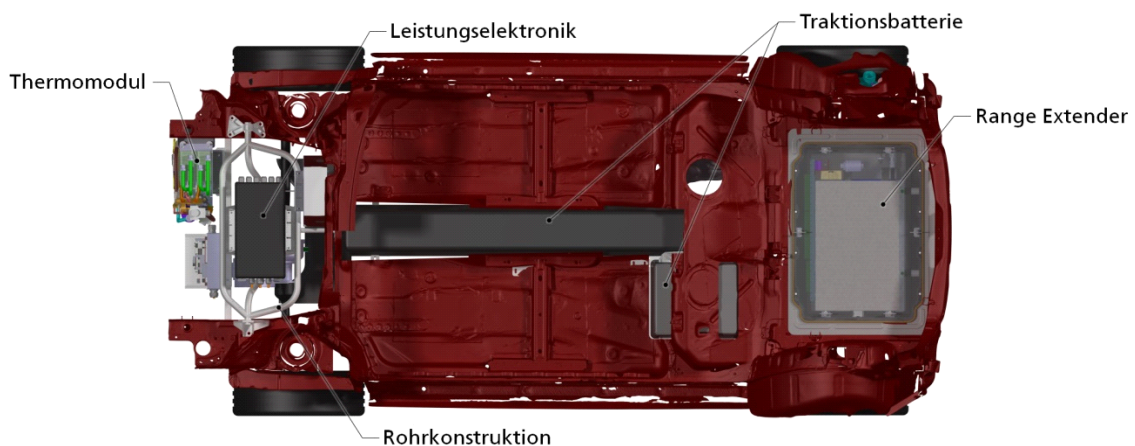


Abbildung 1: Draufsicht auf das Gesamtfahrzeugpackagingmodell mit allen integrierten Komponenten

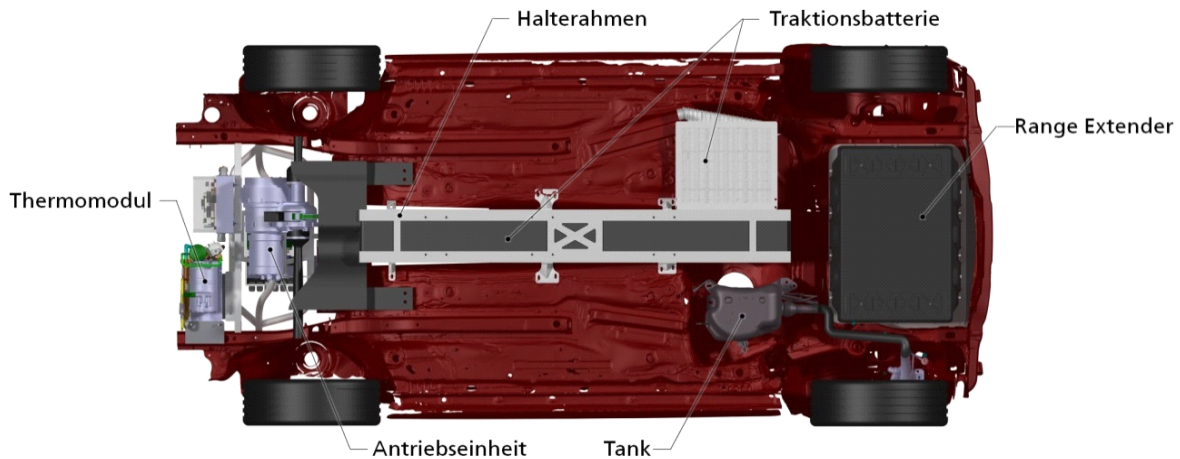


Abbildung 20: Ansicht auf den Unterboden mit allen integrierten Komponenten

VIII Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wird der Packagingprozess eines batterieelektrischen Fahrzeugs mit Brennstoffzellen Range Extender erläutert. Die Integration verschiedener Antriebstechnologien in eine konventionelle Kleinwagenkarosserie stand dabei im Mittelpunkt. Zunächst wurde mit Hilfe einer Systemmatrix das Teil- und Gesamtsystemverständnis erarbeitet. Nach Klärung der Fahrzeugtopologie sowie der verfügbaren Bauräume konnten erste Bauraumstudien mit einfachen Modellen zu den Komponenten erstellt werden. Im Verlauf des Entwicklungsprozesses erfolgte eine kontinuierliche Verfeinerung und Optimierung der Komponenten. Hierdurch konnte die konstruktiv bestmögliche Gesamtlösung für das Fahrzeugpackaging generiert werden.

Quellenangaben

- [1] „regional eco mobility 2030 (REM 2030),“ [Online]. Available: <http://www.rem2030.de>. [Zugriff am 2015].
- [2] H. H. Braess und U. S. (Hrsg.), Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [3] „Fuel cell today; Methanol and Fuel Cells: Range Extenders for BEV,“ [Online]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/analyst-views/2013/13-12-04-methanol-and-fuel-cells-range-extenders-for-bev>.
- [4] „Autokon; Antrieb für die urbane Mobilität der Zukunft,“ [Online]. Available: http://www.autokon.de/home/-/article/33673047/40629759/Antrieb-f%C3%BCr-die-urbane-Mobilit%C3%A4t-der-Zukunft/art_co_INSTANCE_0000/maximized/.
- [5] „Pressemitteilung zum Thermomodul, KSPG AG,“ [Online]. Available: <http://www.kspg.com/presse/pressemappen/pressemappe-detail/news/detail/News/reichweitenverlaengerung-fuer-batterieelektrische-shuttlebusse/>.



regional
eco
mobility
2030

Symposium
Urbane Mobilität der Zukunft
17./18. Juni 2015

Velocité

Die (R-)Evolution des E-Bikes

H. Wittig¹, S. Thanner², E. Dressler³, F. Bussinger⁴

¹ Fraunhofer Institut Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Zeunerstr. 38, Dresden,
E-Mail: h.wittig@ivi.fraunhofer.de

² CarboFibretec GmbH, Otto-Lilienthal-Str. 15, 88046 Friedrichshafen,
E-Mail: simon.thanner@carbofibretec.de

³ TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, Waterloohain 5, 22769 Hamburg,
E-Mail: dressler@trinamic.de

⁴ driveXpert GmbH, Ehrenbergstr. 11, 98693 Ilmenau, E-Mail: fbu@drivexpert.de

Keywords: e-Bike, Systemleichtbau, Linearmotor, Batteriemanagement

1 Einleitung

Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit ist das Fahrrad unbestritten das mit Abstand attraktivste Verkehrsmittel. Fahrradverkehr ist bis auf den minimalen Flächenverbrauch der Radwege frei von ökologischen Rückwirkungen, ermöglicht in Ballungszentren eine kostengünstige Mobilität bei hoher Flexibilität und wirkt gleichzeitig dem zunehmenden Bewegungsmangel in der Gesellschaft entgegen. Fahrradverkehr spielt somit neben dem ÖPV eine immer größere Rolle bei der verkehrstechnischen Entlastung und dem Schutz von Klima und Umwelt. Auch im Kontext der Mikroelektromobilität stellen innovative, oftmals mit Muskelkraft unterstützte elektrische Antriebssysteme für Zweiräder entscheidende Migrationspfade künftiger Mobilitätskonzepte dar. Dieser Entwicklung wird in Deutschland auch durch das BMVI mit dem Nationalen Radverkehrsplan 2020 [1] Rechnung getragen, dessen Schwerpunkt in der Förderperiode 2016 unter anderem die Elektromobilität ist. Die enorme Resonanz auf Kampagnen und Aktionen wie das „Stadtradeln“ aber auch die stetig steigenden Absatzzahlen insbesondere im e-Bike-Segment zeigen, dass der Fahrradverkehr einen festen Bestandteil des Themas Elektromobilität darstellt.

Im Rahmen der Förderinitiative „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ des BMBF wurde durch ein Konsortium aus klein- und mittelständischen Firmen, Ingenieurunternehmen sowie universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen ein neuartiges Elektrozweirad in Leichtbauweise entwickelt, das sich gegenüber e-Bike und Pedelec durch die Synergie mehrerer technischer Innovationen in den Bereichen Rahmen und Laufrad, Antrieb, Leistungssteuerung und Batterie auszeichnet und als Folge der Funktionsintegration auch hinsichtlich Formgestaltung und Design neuartige Akzente setzt.

2 E-Bike Konzept der Zukunft: Batterie und Antrieb unsichtbar integriert

Das Projekt VeloCité vereint drei Hauptziele:

- einen neuartigen, felgennahen elektrischen Antrieb,
- formoptimierte Leichtbaustrukturen für Rahmen und Laufräder mit direkt integrierten Antriebskomponenten,
- sowie ein langlebiges, sicheres und robustes Batteriespeichersystem mit integriertem Batterie- und Energiemanagement.

Der ganzheitliche Entwicklungsansatz ermöglicht das, was konventionellen e-Bikes und Pedelecs fehlt: eine neue, moderne Formensprache und ein Systemgewicht, welches bislang nur Fahrrädern ohne Antriebshilfe vorbehalten war. Im Rahmen der dreijährigen Zusammenarbeit ist es den Projektpartnern gelungen, die Antriebskomponenten E-Motor, Leistungselektronik, Energiespeicher und Batterie- bzw. Energiemanagementsystem nahezu unsichtbar in einen leichten und steifen Carbonrahmen und die Laufräder zu integrieren. VeloCité adaptiert damit das Prinzip der Transrapid-Technik.



Abbildung 1: VeloCité Prototyp [2]

2.1 Der Motor

Das Herzstück des VeloCité ist der EVO2 Antrieb der DriveXpert GmbH. Die Spulenkörper des BLDC-Motors befinden sich im Fahrradrahmen, wobei die Felge des Hinterrades den Rotor darstellt. Auf jeder Felgenseite wurden 180 Permanentmagnete in das Laufrad integriert. Diese Konstruktion ermöglicht einen direkten Antrieb des Hinterrades und kommt somit ohne ein zusätzliches Getriebe aus. Der Motor ist mit 500 W auf 2 mm Luftspalt ausgelegt und hat ein Gewicht von 2950 g.

In der Entwicklungsphase des Antriebs wurden zwei verschiedene Varianten untersucht:

- Eine Realisierung als Klauenpolmotor, welcher entlang eines Kreissegmentes der Felge verläuft. Der Motor besteht aus hintereinander angeordneten Einzelzahnelementen (Klauen), welche von einer gemeinsamen Spule umschlossen werden.
- Die Umsetzung eines BLDC-Motors als Linearmotor in Form eines Kreissegmentes.

Letztere weist deutliche Vorteile auf. So führt die gleichmäßige Verteilung der einzelnen elektrischen Phasen dazu, dass Luftspalttoleranzen gleichmäßigen Einfluss auf die Phasen ausüben. Die verursachten elektrischen Asymmetrien sind deutlich geringer als bei einer Anordnung mit drei konzentrierten elektrischen Phasen, wodurch der Rotor (Felge) weniger zum „Ankleben“ an eine der Statorseiten neigt. Nur so ließ sich der Luftspalt zwischen Stator und Rotor derart verringern, dass relevante Drehmomente erreicht wurden.

Des Weiteren lässt sich der Stator als einteiliger Blechschnitt ausführen, wodurch alle anderen mechanischen Toleranzen der Einzelherstellung und der Einzelmontage umgangen werden. Die Flussführung im Stator wird deutlich verkürzt. Die Statorpole sind in ihrer radialen Höhe genauso hoch wie die Magnete, so dass alles Magnetmaterial im Einflussbereich des Stators bestmöglich nutzbar wird. Die Einzelzahnbewicklung ist aufwendiger aber bezüglich der Herstellbarkeit allgemeiner Stand der Technik.

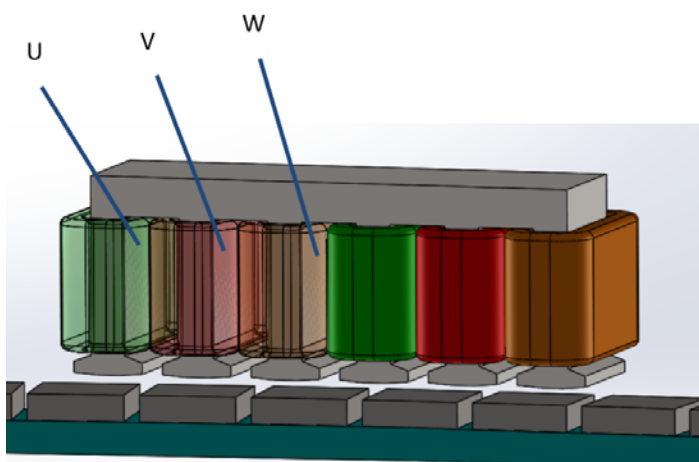


Abbildung 2: Entwurf der Linearmotorstruktur

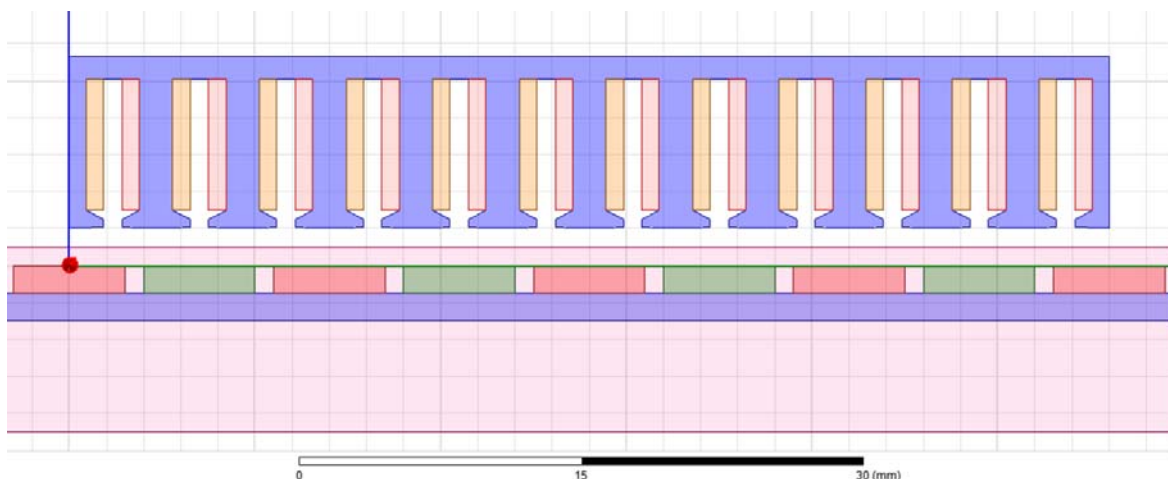


Abbildung 3: FEM-Modell der EVO2-Struktur

Dieser Entwurf wurde in Form einer Parameterstudie hinsichtlich Polpaarzahl, Nutzahl und Luftspalt untersucht. Mit Hilfe der Kennziffer Leistungsdichte konnte ein deutliches Optimum erkannt und eine gesteigerte Leistungsfähigkeit gegenüber dem Klauenpolmotor erreicht werden. Anschließend wurde der umzusetzende Bereich des Luftspalts auf 2-

3 mm festgelegt. In diesem entschärfen sich die instabilen Kraftverhältnisse der hohen Anzugkräfte zwischen Stator und Felge, der Aufbau wird gegenüber Toleranzeinflüssen robuster.



Abbildung 4: Im Prüfstand montierter EVO2-Antrieb

Der von der Firma Trinamic Motion Control GmbH & Co. KG entwickelte Motorcontroller ist für 3-Phasen-BLDC-/PMSM-Motoren bis zu einer Versorgungsspannung von 36 V und einer Dauerleistung von 500 W ausgelegt. Die Größe des Controllers wurde auf 12 cm x 5,5 cm x 2,5 cm optimiert. Dadurch kann der Controller direkt in den Bauraum des Rahmens integriert werden. Die Kühlung des Leistungsteils wird über eine direkte mechanische Rahmenkontaktierung realisiert. Für einen effizienten und ruhigen Antrieb wurde der im Projekt entwickelte Motor für Sinus-Kommutierung optimiert. Dies unterstützt der Motorcontroller durch eine sinusförmige Kommutierung des Motors in Form einer Field Oriented Control (FOC)-Stromregelung, die im 20 kHz-Takt durchgeführt wird. Als Lage-sensor zur Motorregelung werden digitale Hall-Sensoren mit geringer Auflösung eingesetzt, wobei der daraus berechnete Rotorlagewinkel beim Motorlauf auf eine höhere Auflösung interpoliert wird. Durch die Art des Stromreglers und des Motors als Direktantrieb wird ein sogenannter 4-Quadranten-Betrieb und damit die Rekuperation ermöglicht.

Weiterhin verfügt der Motorcontroller über mehrere Schnittstellen zur Kommunikation mit den Komponenten des Antriebsstranges sowie beliebig erweiterbaren Peripheriegeräten. Dazu gehören

- CAN-Schnittstelle zum Datenaustausch mit dem Batteriemanagementsystem (BMS)
- Debug-Interface per UART
- ANT-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Smartphone (1. Kanal: Profil: „Light Electric Vehicle“), um Messwerte des Tretlagersensors, Motorcontrollers und des BMS zu visualisieren sowie zur Konfiguration des Motorcontrollers
- Analog-Eingänge zur Einbindung eines Tretlagersensors, der die aktuell vom Fahrer aufgebrauchte Kraft misst und als Analogwert durch den Motorcontroller für den Grad

der Unterstützung verwendet (12 V/5 V wird vom Motorcontroller für den Sensor bereitgestellt)

- Analog-/Digital-Eingänge (bisher ungenutzt)

Alternativ ist die Einbindung eines ANT+ Tretlagersensors möglich (2. Kanal: Profil: „Bike power“), welcher dem Motorcontroller die aktuelle Trittgeschwindigkeit und die vom Fahrer eingesetzte Trittleistung drahtlos übermittelt. Die Einbindung eines ANT+ Funktasters (3. Kanal: Profil: „Controls“) ermöglicht die Navigation und Bedienung der im Projekt entwickelten Smartphone-App.

2.2 Systemleichtbau und Design

Zum geringen Gesamtgewicht des VeloCité von weniger als 13 kg tragen sowohl die werkstoffspezifischen Vorteile von Carbon als auch der intelligente Systemleichtbau bei. Obwohl die Herstellung von Carbon energieintensiv ist, können gerade im innerstädtischen Verkehr Schadstoffe und CO₂-Emission reduziert werden, wenn durch ein ansprechendes Design und Kundennutzen der Umstieg vom PKW auf ein Pedelec erleichtert wird. Laut Achternbosch et al. [3] weist die Herstellung von Carbon- gegenüber Aluminiumbauteilen ökologisch weder Vor- noch Nachteile auf. Im vorliegenden Projekt eröffnet gerade die Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften von Carbon die Erschließung einer neuen Antriebstechnologie und hat daher aus Sicht der Nachhaltigkeit Vorteile gegenüber der Verwendung von Aluminiumfahrradrahmen vorzuweisen.

Ein wichtiges Projektziel war die Entwicklung eines ansprechenden, alltagstauglichen Designs. Im Ergebnis ist es der CarboFibretec GmbH gelungen, ein e-Bike zu entwickeln, welches sich von der Masse der Pedelecs dadurch abhebt, dass ihm die elektrische Antriebsunterstützung nicht anzusehen ist. Dabei wurde „um den Motor herum“ designt. Durch die Integration des Motors in die tragende Struktur des Rahmens und der Laufräder kann auf zusätzliche Anbauteile verzichtet werden. Der Motor wird damit zu einem Bestandteil des Leichtbaukonzepts und verschwindet optisch im Gesamtbild des e-Bikes. Gleiches gilt für die Batterie und die Elektronik, welche in den Rahmen integriert wurden und durch eine Wartungsöffnung zugänglich sind. Damit entfallen zusätzliche Batteriegehäuse sowie eine außenliegende Verkabelung.

Die Herstellung der Carbon-Leichtbaufelge des Hinterrades erfolgte in einem kombinierten Sandwich-/Hohlblasverfahren. Für die Magnetintegration wurde ein eigenes Felgenprofil entwickelt, das es ermöglicht die Rotormagnete in einer nur 20 mm breiten Hochprofilfelge aufzunehmen. Durch den speziellen Lagenaufbau der Felge konnte eine sehr hohe Felgensteifigkeit von 120 N/mm erreicht werden, die notwendig ist, um die seitlichen Motorkräfte aufzunehmen. Die speziell konstruierte Nabe sorgt für ein geringes Lagerspiel. Das betriebsbereite Laufrad wiegt ca. 1.800 g.

2.3 Energiespeicher und Batteriemanagementsystem (BMS)

Der erwartete Durchbruch bei allen Elektromobilitätskonzepten, sei es im Pkw- bzw. Nutzfahrzeugbereich oder wie beim hier verfolgten Elektroleichtfahrrad ist eng gekoppelt an die Lösung der Energiespeicherproblematik. Nur wenn es gelingt, derzeitige Schwachpunkte wie die

- geringe Leistungs- und Energiedichte,
- hohen Kosten,
- unzureichende Sicherheit und
- verminderte Lebensdauer

erheblich zu verbessern, werden sich Elektrofahrzeuge am Markt durchsetzen.

2.3.1 Energiespeicher

Das vom Fraunhofer IVI entwickelte Batteriespeichersystem basiert auf einem Energiespeicher bestehend aus Lithiumeisenphosphat-Zellen (LiFePO₄) im Standardformat 26650, der sowohl eine Schnelllade- als auch Rekuperationsfähigkeit bietet. Die gewählte Zellchemie adressiert insbesondere die beiden letztgenannten Schwachpunkte und zeichnet sich aus durch

- ihre thermische Stabilität und die damit verbundene intrinsische Sicherheit sowie
- eine hohe Zyklenstabilität und gutes Alterungsverhalten.

Um bei einer mittleren Zellspannung von 3,2 V die erforderliche Systemspannung von $20V \leq U \leq 30V$ zu erreichen, wurden acht Zellen in Reihe verschaltet. Unter Berücksichtigung der geforderten Leistung sowie des verfügbaren Bauraums wird die bestmögliche Kapazität durch eine 8s3p-Verschaltung der Zellen erreicht. Die Parallelschaltung erfolgt dabei auf Zellebene, wodurch die Auswirkungen fertigungsbedingter Abweichungen der elektrischen Eigenschaften zwischen den Zellen bereits durch den Batterieaufbau gemindert werden können. Im Hinblick auf niedrige Kontaktwiderstände sowie eine gleichmäßige Verteilung des Gesamtstroms in der Parallelschaltung wurden die Zellverbinder und Batteriekontakte mittels Laserstrahlschweißen sowohl untereinander als auch mit den zylindrischen Zellgehäusen direkt verschweißt.

Tabelle 1: Spezifikation des Energiespeichers

Typ	26650 High Capacity Cell
Kapazität @ C/5 (Ah)	7,8
Mittlere Spannung @ C/5 (V)	25,6
Entladestrom (A)	30
Entladestrom 30s Puls (A)	78
Ladestrom (A)	15
Ladeschlussspannung (V)	29,2
Entladeschlussspannung (V)	20,0
Betriebstemperatur (°C)	$-20 \leq \vartheta \leq 60$

2.3.2 BMS-Hardware

Um einen weitgehend modularen Aufbau des e-Bikes zu gewährleisten, wurde auf ein zentrales Steuergerät verzichtet. Sämtliche Algorithmen der Zellüberwachung sowie des Batterie- und Energiemanagements sind auf einer batterienahen Elektronik (BMS) untergebracht.

Das BMS verfügt über eine Überwachung des Batteriestroms sowie der Spannung und Temperatur auf Zellebene. Letztere ist durch ihre digitale Ausführung unanfällig für Störungen und kommt mit einem geringen Applikationsaufwand aus.

Bedingt durch den geringen Bauraum und die dadurch eingeschränkten Möglichkeiten einer gezielten Wärmeableitung wurde besonderer Wert auf ein geeignetes Platinenüberwachungskonzept gelegt, um beispielsweise die bei der Balancierung der Zellen auftretenden Temperaturspitzen in den Balancierungswiderständen sicher zu erkennen und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen. In Batterieanwendungen ist weiterhin darauf zu achten, dass der Energiespeicher galvanisch von der eingesetzten Elektronik getrennt ist. Nur so kann in Fehlerfällen wie Kurzschluss oder Kabelbruch eine Beschädigung der Elektronik verhindert und ein sicherer Betrieb des Gesamtsystems gewährleistet werden.

Da ein möglichst großer Anteil des im Energiespeicher enthaltenen Energieinhalts für die Antriebsunterstützung des Fahrers bereitgestellt werden soll, wurde bereits bei der Hardwaregestaltung auf Energieeffizienz geachtet. Um die Energieaufnahme der BMS-Hardware zu minimieren und einen Standbybetrieb zu vermeiden, schaltet sich der Mikrocontroller in Ruhephasen automatisch ab. Die Zuschaltung der Versorgung der BMS-Platine erfolgt durch die extern bereitgestellten 5 V auf dem CAN-Bus.

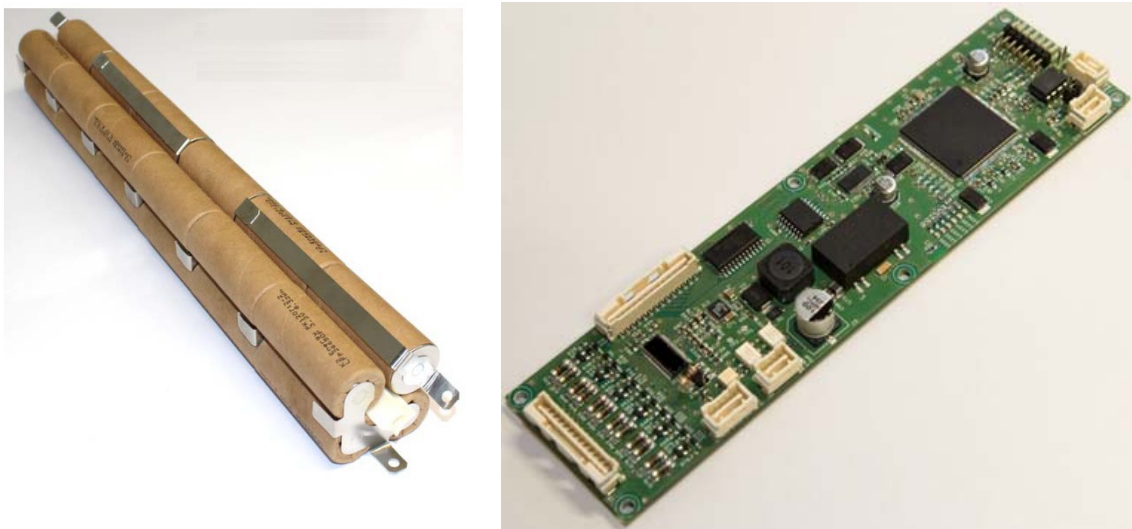


Abbildung 5: Verschweißter Zellstapel und BMS-Hardware

Die Kommunikation zwischen Motorcontrollerplatine und BMS-Platine erfolgt über den CAN-Bus. Für die Umsetzung wurde der offene Standard EnergyBus gewählt, der bereits in diversen Pedelecs und Leicht-Elektrofahrzeugen Verwendung findet. Dieser beinhaltet einen Kommunikations- sowie einen Energieübertragungs-Bus. Dies ermöglicht zusätzlich den Datenaustausch mit einem externen Ladegerät und damit weitere Funktionen wie die

Schnellladung des Energiespeichers durch Steuerung des Ladestroms in Abhängigkeit der Zelltemperatur.

2.3.3 BMS-Software

Bei den entwickelten Algorithmen stand insbesondere die präzise Zellzustandsschätzung im Fokus der Arbeiten. Diese Algorithmen basieren auf einem elektrischen Modell der Zelle gemäß Abbildung 6, welches zunächst anhand umfangreicher Messungen am Prüfstand parametrisiert wurde. Es besteht aus einem Kondensator C_0 zur Speicherung der Ladung sowie dem Widerstand R_0 und den RC-Gliedern $R_1||C_1$, $R_2||C_2$, $R_3||C_3$ und $R_4||C_4$ (Zeitkonstanten τ_1 bis τ_4 in aufsteigender Reihenfolge) zur Beschreibung der Überspannung $\eta := \eta_0 + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4$.

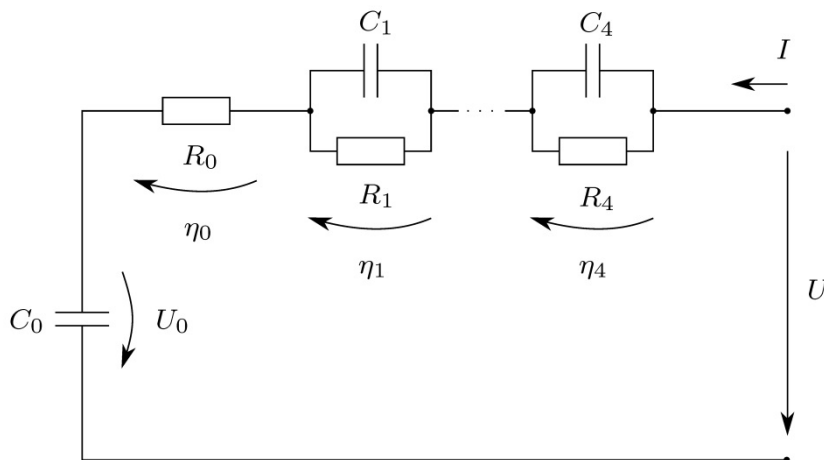


Abbildung 6: Ersatzschaltbild der Li-Ionen-Zelle [4]

Die Messungen gliedern sich in zwei Messreihen. Sie dienen zum einen der Ermittlung der Ruhespannungskennlinie, die den Zusammenhang zwischen relaxierter Klemmspannung (OCV) und Ladezustand (SOC) der Zelle wiedergibt. Hierbei wird der Ladezustand der Zelle in einem Vollzyklus schrittweise um 5 % SOC erhöht bzw. abgesenkt. Jedem Lade- bzw. Entladeschritt folgt eine Pause von wenigen Stunden, innerhalb der die Zelle annähernd einen Ruhezustand einnimmt und folglich Stützstellen für die Ruhespannung ermittelt werden können.

Zum anderen werden der Zelle zur Parametrierung des Überspannungsmodells Fahrzyklen eingeprägt, um eine hohe Modellgenauigkeit unter realitätsnahen Belastungen zu erreichen. Um den gesamten Betriebsbereich hinsichtlich SOC und Temperatur abzudecken, werden die Versuche an verschiedenen Temperaturstützstellen $\vartheta = [-20\text{ °C}, 5\text{ °C}, 20\text{ °C}, 40\text{ °C}]$ durchgeführt.

Anhand der Messdaten wurden die Modellparameter geschätzt und validiert. Dies erfolgt trotz der großen Datenmengen gleichzeitig für den gesamten Betriebsbereich der Zelle. Daraus resultiert eine, im Rahmen der vorliegenden Modellstruktur, hohe Modellgenauigkeit, da beispielsweise Änderungen der Zelltemperatur, die insbesondere bei niedrigen Versuchstemperaturen unvermeidlich eintreten, in der Schätzung berücksichtigt werden.

Die elektrischen Eigenschaften der LiFePO₄-Zelle sind durch folgende Abhängigkeiten gekennzeichnet:

- R_0 ist von SOC, ϑ und dem Vorzeichen von I abhängig
- die RC-Glieder mit den Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 sind von SOC, ϑ und dem Vorzeichen von I abhängig
- die RC-Glieder mit den Zeitkonstanten τ_3 und τ_4 sind von ϑ und dem Vorzeichen von I abhängig

Das elektrische Verhalten der Zelle im Bereich $SOC < 20\%$ und $SOC > 90\%$ bedarf einer gesonderten Betrachtung und ist nur bedingt mit der beschriebenen Modellstruktur abzubilden. Für eine weitere Verbesserung der Modellqualität wird darüber hinaus für die Modellparameter $R_0 \dots R_4$ die Einführung einer Abhängigkeit von der Stromstärke I untersucht.

Die ermittelten Modellparameter dienen der Parametrierung der Algorithmen der Zell- bzw. Batteriezustandsschätzung.

Bisher im Einsatz befindliche Batteriemanagementsysteme berechnen den Ladezustand der Batterie zumeist auf Basis der Ruhespannung U_0 und/oder durch Integration des Stroms. Diese Verfahren weisen jedoch aus folgenden zwei Gründen große Ungenauigkeiten auf:

- Hochdynamischen Anwendungen, vor allem im Traktionsbereich, enthalten häufig keine ausreichend langen Pausen zum Erreichen eines Ruhezustands.
- Unvermeidbare Messfehler, insbesondere beim Zellstrom, akkumulieren sich im Verlauf langer Belastungsphasen.

Die Empfindlichkeit der Ladezustandsbestimmung gegenüber derartigen Problemen ist besonders groß, wenn die verwendete Zellchemie wie im vorliegenden Fall (LiFePO₄) eine sehr flache Ruhespannungskennlinie aufweist. Folglich müssen in herkömmlichen Systemen oft Reserven zu den Betriebsgrenzen der Batterie vorgehalten werden, was den nutzbaren Energieinhalt einschränkt. Lösungsansätze bieten komplexere Algorithmen wie Erweiterte Kalman Filter ([5], [6]) oder Unscented Kalman Filter [7], wobei auch hier abweichende Systemeigenschaften (Modellabweichungen, Prozess- und Messrauschen nicht weiß und gauß'sch) zu signifikanten Fehlern führen können [8].

Im vorgestellten Projekt wurde auf der Grundlage beobachterbasierter Algorithmen eine Methode entwickelt, die eine Online-Bestimmung des internen Zellzustands aus den verfügbaren Messgrößen ermöglicht. Diese nutzt neben den Informationen zur Genauigkeit der Messgrößen

- Zellstrom I_{mess} (Berechnung des SOC mittels Stromintegration $SOC = \int I_{mess} dt$) und
- Zellspannung U_{mess} (Berechnung des SOC via Ruhespannungskennlinie $SOC = OCV^{-1}(U_{mess} - \sum_k \eta_k)$)

insbesondere eine dynamische Berechnung der Modellgenauigkeit. Dadurch können zuverlässig Schranken für die Klemmspannung der Zelle vorhergesagt und folglich Aussagen über die Genauigkeit des geschätzten SOC getroffen werden. Das Ergebnis ist eine robustere SOC-Schätzung, die mehrere Vorteile vereint:

- Korrektur des auf Basis der Stromintegration bestimmten Ladezustands auch in Belastungsphasen
- Angabe von zuverlässigen Schranken des Ladezustands
- Erhöhung der Genauigkeit, da Messdaten entsprechend ihres Informationsgehalts gewichtet werden
- Rechen- und Speicherbedarf nur geringfügig höher als bei den auf einem Kalman Filter basierenden Ansätzen

Darüber hinaus dient der Ansatz als Basis für weitere Algorithmen des Batterie- und Energiemanagements wie beispielsweise der Schätzung des SOH.

3 Diskussion

Das Resultat der intensiven dreijährigen Zusammenarbeit aller Projektpartner ist ein in sämtlichen Belangen innovatives e-Bike, welches sich im Bereich der sogenannten S-Pedelecs mit einer elektrischen Antriebsunterstützung bis 45 km/h einordnet. Die Verbindung aus geringem Gewicht, höchster Rahmen- und Laufradsteifigkeiten und dem leistungsstarken Antrieb ermöglicht ein agiles und sicheres Fahrverhalten. Der geringe aerodynamische Widerstand der Hochprofil-Rennradfelgen trägt zu einer schnellen Beschleunigung bei. Gebremst werden kann über die Rekuperationsfunktion des Motors sowie über zusätzliche Scheibenbremsen. Durch konsequente Funktionsintegration aller Antriebskomponenten, den Einsatz moderner Akkutechnologie und systematischen Leichtbau ist ein einzigartiges Design entstanden, wobei das S-Pedelec mit einem Gewicht von unter 15 kg wohl zu einem der leichtesten in seiner Klasse zählt.

4 Literatur

- [1] „Weiterentwicklung des Nationalen Radverkehrsplans - Die Schritte zum Nationalen Radverkehrsplan 2020“, www.nationaler-radverkehrsplan.de/nrvp2020/index.phtml, abgerufen 10.06.2015
- [2] CarboFibretec, „Die (R-)Evolution des E-Bikes“, www.carbofibretec.de/images/download/Pressemitteilung_Lightweight_Technologie_projekt_Velocite_ger.pdf, 2014, abgerufen 10.06.2015
- [3] M. Achternbosch, K.-R. Bräutigam, C. Kupsch, B. Reßler, G. Sardemann, „Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponten“, FZKA 6879, Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2003
- [4] R. Bartholomäus, C. Klauke und H. Wittig, „Control-oriented dynamic li-ion battery models for high power applications“, EVS 24, 2009
- [5] G. L. Plett, „Extended kalman filtering for battery management systems of lipb-based hev battery packs, part 1, background“, *Journal of Power Sources*, vol. 134 (2), pp. 252–261, 2004
- [6] S. Santhanagopalan und R. E. White, „Online estimation of the state of charge of lithium ion cell“, *Journal of Power Sources*, vol. 161, pp. 1346–1355, 2006
- [7] G. L. Plett, „Sigma-point kalman filtering for battery management systems of lipb-based hev battery packs, part 1, Introduction and state estimation“, *Journal of Power Sources*, vol. 161, pp. 1356–1368, 2004
- [8] M. S. Grewal and A. P. Andrews, „Kalman Filtering – Theory and Practice Using MATLAB“, in Wiley-Interscience Publication, 2001

