

PORTFOLIO ASSESSMENT OF SUSTAINABILITY INTERVENTIONS FOR MOBILITY USING AN ENERGETIC MODEL OF THE SWISS TRANSPORTATION SECTOR

Lukas KÜNG (*), Gil GEORGES, Konstantinos BOULOCHOS

ETH Zürich, Sonneggstrasse 3 8092 Zürich, +41 44 633 85 66,
lukas.kueng@lav.mavt.ethz.ch, www.lav.ethz.ch

Kurzfassung: In diesem Text wird ein gesamtsystemisches Mobilitätsmodell vorgestellt, welches durch Betrachtungen von Einzelbewegungen gekoppelt mit technischen Modellen zur Abschätzung von Reduktionspotentialen bezüglich CO₂ verwendet werden kann. Es soll diese Fragen durch maximale Reduktionspotentialen behandeln und als Werkzeug zur strategischen Ausrichtungen dienen.

Keywords: Mobilität, CO₂ Emissionen, Potentialanalyse, Energiesystem

1. Hintergrund zum Mobilitätssystem in der Schweiz

Um die Energiewende in der Schweiz zu realisieren ist es eminent, dass auch der Transportsektor seinen Beitrag leistet, da gemäss dem Bundesamt für Statistik rund ein Drittel der nationalen Gesamtemissionen auf Mobilitätsanwendungen zurück geht. Hauptursache dafür ist die zentrale Rolle fossiler Treibstoffe, die 96% des Endenergiebedarfs des Sektors ausmachen [6]. Darüber hinaus ist die Nachfrage nach Mobilitätsdienstleistungen stark wachsend – und das quasi ungebrochen seit 30 Jahren [7].

Unter Anbetracht der hohen Anteile an Wasserkraft (60%) und Atomkraft (35%) im Schweizer Durchschnittsstrommix scheint die flächendeckende Antriebselektrifizierung eine interessante Option. Dem gegenüber steht aber eine grosse Unsicherheit über den Zeitplan und die Konsequenzen des wenigstens formal beschlossenen Atomausstiegs. Die Nachhaltigkeit der Elektromobilität (im weitesten Sinne, also inklusive Brennstoffzellenfahrzeuge und Plug-in Hybride) ist aber an eine tiefe CO₂-Intensität der Stromproduktion geknüpft. Deshalb ist es fraglich ob die Substitution der Antriebstechnologie alleine ausreicht um die ambitionierten Ziele der schweizerischen Energiegesetzgebung zu erreichen.

Aus planerischer Sicht bieten sich diverse Alternativen: von der Detailoptimierung bestehender Technologien über fördernde oder lenkende Umstrukturierung der Nachfrage bis hin zur kompletten Neudefinition der Verkehrswirtschaft (z.B. mobility as a service). Solcher Eingriffe, im folgenden Intervention genannt, unterscheiden sich vor allem in Bezug auf ihr zu erwartendes CO₂- und Energiemitigationspotential, die damit verbundenen Kosten / Nutzen, sowie den Grad der Unschärfe mit der sich diese Erwartungswerte bestimmen lassen.

2. Methodik

Die Analyse eines solchen Interventionsportfolios erfordert eine gesamtsystemische Betrachtung. In der Gruppe Energiesysteme am ETHZ-LAV entwickeln wir dazu einen für die Mobilität geeigneten methodischen Ansatz, der den gesamten Mobilitätssektor und das damit verbundene Energiesystem abdeckt. Das Modell hat das Ziel, die Energieflüsse im Gesamtsystem, ausgehend von Bewegungen von Einzelpersonen, -waren und -fahrzeugen auf individueller Basis abzubilden. Dabei werden die Konversions- und Austauschprozesse zwischen einzelnen Antriebskomponenten sowie der Energieinfrastruktur örtlich und zeitlich aufgelöst. Damit lässt sich der Einfluss von Interventionen sowohl auf die Nachfrage, die Fahrzeug- und Antriebstechnologie sowie das Energiesystem selbst gegenüber dem aktuellen System beziffern.

In Bezug auf die nationalen Energieziele kann ein Portfolio an Interventionen mögliche Pfade aufzeigen. Abbildung 1 zeigt schematisch eine Transition vom Referenzszenario „Business As Usual“ auf einen wünschenswerten Zielzustand, beschrieben durch das Szenario „Neue Energiepolitik“.

Bei der Modellierung unterteilen wir den Mobilitätssektor in drei Bereiche: die Mobilitätsnachfrage, Fahrzeugaufbau (alle Fahrzeugeigenschaften welche den Energieverbrauch beeinflussen, aber nicht zum Antriebsstrang gehören, z.B.: Klimaanlage oder Fahrzeugmasse) und Antriebstechnologie. Der verwendete Energieträger des einzelnen Fahrzeugs bildet die Schnittstell zwischen dem Mobilitäts- und dem Energiesektor.

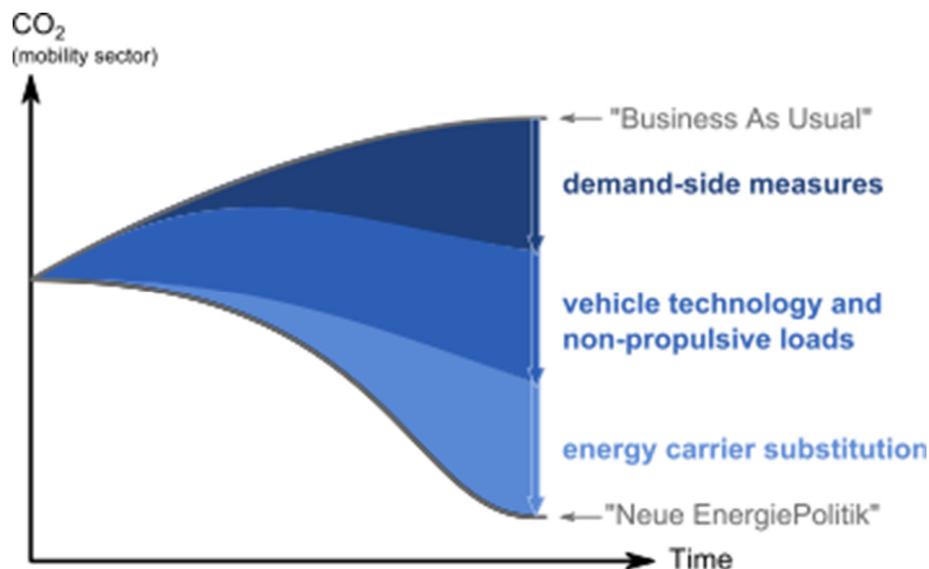


Abbildung 1: Schematische Darstellung der nationalen Mobilitätsszenarien in Bezug auf CO₂ Emissionen. In drei Bereichen können Interventionen angreifen, um vom „Business As Usual“ Szenario auf das erwünschte „Neue Energiepolitik“ Szenario zu gelangen.

Die Nachfrage an Mobilität, im Sinne einer Transportleistung wird ausgedrückt durch eine nicht energetische Grösse, nämlich Personenkilometer. Das gewählte Fahrzeug in Kombination mit der verwendeten Antriebstechnologie (und dem Energieträger) übersetzt diesen Menge in benötigte Primärenergie und eine CO₂ Emission.

Interventionen können auf Ebene Nachfrage, Fahrzeugaufbau oder Antriebstechnology appliziert und deren Einfluss auf systemischer Ebene quantifiziert werden. Eine Intervention ist dabei eine was-wäre-wenn Betrachtung einer möglichen Modifikation des aktuellen Zustands.

Die Untersuchung beschränkt sich auf die Schweiz, wobei das Reiseverhalten der einzelnen Bürger disaggregiert die Nachfrage an privater Mobilität darstellt. Ihre Verkehrsmittelwahl und Bewegungsmuster werden aus dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) abgeleitet. Dabei handelt es sich um eine nationale Stichprobenerhebung mit über 60'000 Befragten. Es ist eine detaillierte Erfassung von Tagesmobilität einzelner Individuen, aber auch zum Beispiel zu Besitzstruktur von Fahrzeugen und Qualität der Anbindung an den öffentlichen Verkehr des Wohnortes. Diese Datenbank bildet die optimale Grundlage die private Mobilitätsnachfrage auf der Ebene von Privatpersonen abbilden zu können. Sie wird verwendet um eine exogene Nachfrage in einzelne Fahrzeugbewegungen zu übersetzen. Diese Bewegungen bilden aggregiert und skaliert die Mobilitätsnachfrage (in Personen- und Fahrzeugkilometer) der ganzen Schweiz ab.

Für die Modellierung der kommerziellen Mobilitätsnachfrage, d.h. Frachtverkehr, werden ebenfalls nationale Erhebungen verwendet. Es handelt sich hierbei um zwei Erhebungen, nämlich für schwere und leichte Nutzfahrzeuge (GTE und LWE). Diese werden verwendet um einzelne Fahrzeugbewegungen abzubilden, unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Zuladung.

Die Fahrzeugbewegungen privater wie auch kommerzieller Nutzer werden durch das verwendete Fahrzeug in eine Energienachfrage übersetzt. Technische Fahrzeuginformationen zu den in den Erhebungen verwendeten Fahrzeugen werden durch Auswertungen des schweizerischen Fahrzeughalterregister MOFIS modelliert. Leergewicht, Hubraum und Erstinverkehrssetzung des Fahrzeugs sind relevante Faktoren für dessen technische Simulation.

Die Modellierung der Antriebskomponenten basiert auf thermodynamischen Betrachtungen. Sie muss effizient in der Ausführung der Simulation sein, gültig für unterschiedliche Leistungsklassen sein und auch für unterschiedliche Energiekonverter, d.h. Verbrennungsmotor, Elektromotor und Brennstoffzelle, akkurate Ergebnisse generieren. Das Konzept der Modellierung ist ähnlich zu [4] und [5], wird zurzeit jedoch in einem laufenden Projekt weiter entwickelt. Das Ziel besteht in der Nachbildung des realen Energieverbrauchs eines Fahrzeugs. Dazu müssen aber auch bestehende Modelle der Nichtantriebslasten, vor allem des Heiz-, Kühl- und Lüftungssystems, integriert werden. Daran wird zurzeit gearbeitet.

Obwohl die Entwicklung des Modells des Mobilitätssystem nicht abgeschlossen ist, besteht bereits die Möglichkeit gewisse Interventionen zu rechnen. Eine Auswahl solcher Beispielinterventionen wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

3. Beispielinterventionen

Die unten aufgeführten und in Abbildung 2 dargestellten Beispielinterventionen zeigen die Verwendbarkeit dieses Modellierungsansatzes. Es sind drei Interventionen auf der Nachfrageseite und eine technische Intervention dargestellt. Die Resultate sind die individuellen CO₂ Einsparungspotentiale in Abhängigkeit der nötigen zu investierender

elektrischer Energie ins Gesamtsystem. Sie werden in den untenstehenden Abschnitten genauer ausgeführt.

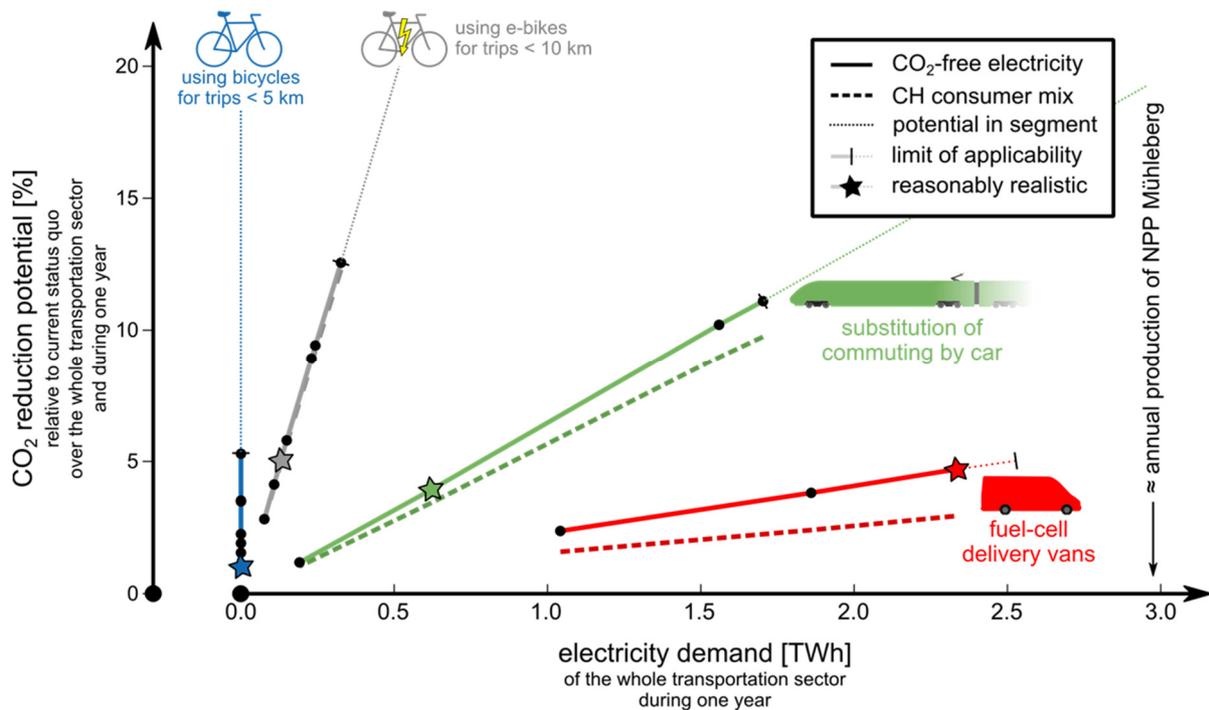


Abbildung 2: Zusammenstellung von vier Interventionen; Grafik stellt CO₂ Reduktionspotential als Funktion der zu investierender elektrischer Energie dar. Verwendete Daten: [3], [4]

3.1. Fahrrad für Kurzstrecken

Die erste Intervention (blau) zeigt das mögliche CO₂ Reduktionspotential, wenn man die Bevölkerung überzeugt alle Strecken kürzer als 5 km anstelle des PKWs mit dem Fahrrad zurückzulegen. Es handelt sich um eine Intervention auf der Nachfrageseite, da sie direkt das Mobilitätsverhalten der einzelnen Reisenden beeinflusst. Die 5 km Streckenlänge ist dabei arbiträr gewählt, entspricht aber etwa einer vernünftigen Fahrradstrecke die man an einem Stück fahren kann. Einen zusätzlichen elektrischen Energieaufwand gibt es nicht. Das maximale CO₂ Reduktionspotential unter diesen Randbedingungen beträgt ungefähr 5 Prozent des gesamten CO₂ Austosses des Mobilitätssektors. Führt man zusätzliche Hürden für diese Intervention ein, wie z.B.: die Berücksichtigung des Wetter oder die Fitness der einzelnen Personen (ausgedrückt über Altersklassen) verringert sich dieses Potential. Die Punkte auf der blauen Linie in der Abbildung entsprechen einzelnen Rechnungen unter Mitberücksichtigung weitere solcher Hürden. Dabei geht das CO₂ Reduktionspotential deutlich zurück und bewegt sich in der Größenordnung um 1 Prozent. Das mit dem Stern gekennzeichnete realistische Potential beschreibt ein Potential welches mit vernünftigem Aufwand realisiert werden könnte. Im Falle einer nachfrageseitigen Intervention bedeutet das, das Potential jener Personen die unter den berücksichtigten Hürden keinen Grund haben ihr Verhalten nicht zu ändern.

Einige Nachteile des konventionellen Fahrrads lassen sich durch die Kombination mit einem Elektromotor verringern. Verwendet man e-bikes anstelle von konventionellen Fahrrädern (grau), lassen sich nicht nur längere PKW Strecken ersetzen (hier z.B.: 10 km), sondern auch die individuelle Fitness und Topologie spielen eine untergeordnete Rolle. Die Verdoppelung der zu substituierenden Streckenlänge führt zu einem Überproportionalen Anstieg im Reduktionspotential (vgl. Graue Linie). Dieser Mehrwert der e-bikes kommt jedoch nur durch Verwendung von elektrischer Energie zustande. Die graue Linie ist relative steil, was bedeutet, dass mit relativ wenig zusätzlicher elektrischer Energie viel CO₂ eingespart werden kann.

3.2. Die Bahn zum Pendeln in die Schweizer Kernstädte

Eine weitere Intervention auf der Nachfrageseite wurde in Bezug auf Pendelverkehr in Städte realisiert. Überzeugt man die Pendler welche mit dem Auto in die fünf Kernstädte der Schweiz unterwegs sind auf die Bahn umzusteigen, erhält man die grüne Linie. Sie ist deutlich flacher, man benötigt somit mehr elektrische Energie um dieselbe CO₂ Reduktion zu erhalten wie mit den beiden vorherigen Interventionen. Dies resultiert in erster Linie aus dem spezifischen Fahrzeuggewicht pro transportierter Person, welches für das Fahrrad sehr vorteilhaft ist. Der Zug bietet aber deutliche Vorteile wenn es um Reisekomfort geht. Aber auch hier gibt es Hürden, bzw. Gründe wieso gewisse Personen ein Auto dem Zug vorziehen. Die in dieser Intervention betrachteten Hürden sind einerseits die benötigte Reisezeit und andererseits das Reisen zu Stosszeiten.

3.3. Brennstoffzellenantrieb für Lieferwagen

Die rote Linie beschreibt das Potential der Umrüstung aller Lieferwagen (nicht schwerer als 3500 kg) mit Brennstoffzellen-Antrieben. Das maximale CO₂ Reduktionspotential ist auf 5 etwa 5 Prozent limitiert, da dies der Anteil der Lieferwagenemissionen an der Gesamtmobilität darstellt. Die Umrüstung des Antriebs basiert auf Basis von kommerziellen Produkten, d.h. einem Wasserstofftank an 150 Litern mit einer Füllmenge von ca. 3.5 kg Wasserstoff und einem Brennstoffzellenstapel mit einer Nominalleistung von 33kW. Jedes betrachtete Fahrzeug im Model wurde mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgerüstet und anschliessend simuliert, ob sie ihre tägliche Fahrleistung unter Berücksichtigung ihrer Zuladung erfüllen können. Als limitierende Faktoren wurden Leistung der Brennstoffzelle und Reichweite des Fahrzeugs identifiziert. Durch die Verwendung eines zusätzlichen Brennstoffzellenstapels und einer einmaligen Betankung bei den kritischen Fahrzeugen kann man über 90 Prozent des maximalen Reduktionspotentials ausschöpfen. Da dies eine technische Intervention ist, befindet sich das realistisch realisierbare Potential am oberen (rechten) Ende der Gerade, da es keine Frage von Akzeptanz oder Verhalten sondern von Wirtschaftlichkeit bzw. Rentabilität ist. Durch die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger ist die rote Linie flacher als jene der anderen Interventionen, bedingt durch die Herstellung.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Abbildung 2 zeigt vorläufige Resultate aus unseren Bestrebungen hin zu einer gesamtsystemischen Modellierung. Diese Betrachtung ausgehend von technischen

Fahrzeugmodellen funktioniert und gewährleistet eine gewisse Flexibilität für Eingriffe am System. Das Model erlaubt ausgehend vom abbildbaren Status-Quo des Mobilitätssektors Interventionen zu rechnen. Es können sowohl soziale wie auch technische Interventionen sein. Das langfristige Ziel besteht in der Kopplung von mehreren Interventionen um so einen möglichen Pfad für politische Ziele aufzeigen zu können.

Rückwirkungen einer Intervention auf das Systems, z.B.: leerere Strassen im Fall der Bahnintervention wodurch das Auto wieder attraktiver wird, könne jedoch nicht abgebildet oder quantifiziert werden.

Die Modellierung wird im Rahmen von laufenden Projekten und mit der Unterstützung des Swiss Competence Center for Energy Research Mobility (SCCER-Mobility) weiter entwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil bildet hier die Realverbrauchsmodellierung der Fahrzeuge welche im Projekt ESMOBIL-RED genauer untersucht wird. Aber auch die Erweiterung der zeitlichen Auflösung der Nachfrageseite ist ein Ziel und ermöglicht eine detailliertere Anbindung ans Energiesystem. Das Resultat dieser Forschung soll Energieflüsse im Mobilitätssystem räumlich und zeitlich abbilden können.

Einflüsse von erneuerbaren Energieerzeugung auf das Mobilitätssystem kann mit diesem Ansatz untersucht werden.

Referenzen

- [1] BFS Taschenbuchstatistik 2014
- [2] BFS/ARE Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010
- [3] BFS/ARE Erhebung leichte Nutzfahrzeuge, 2013
- [4] Rizzoni, G., Guzzella, L., Baumann, B.M., „Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains“, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, Volume 4, 246-257, doi:10.1109/3516.789683
- [5] Sorrentino, M., Mauramati, F., Arsie, I., Cricchio, A. et al., "Application of Willans Line Method for Internal Combustion Engines Scalability towards the Design and Optimization of Eco-Innovation Solutions," SAE Technical Paper 2015-24-2397, 2015, doi:10.4271/2015-24-2397
- [6] BFS Energiestatistik 2014
- [7] BFS Leistungen des Privaren Personenverkehrs auf der Stasse, Februar 2014