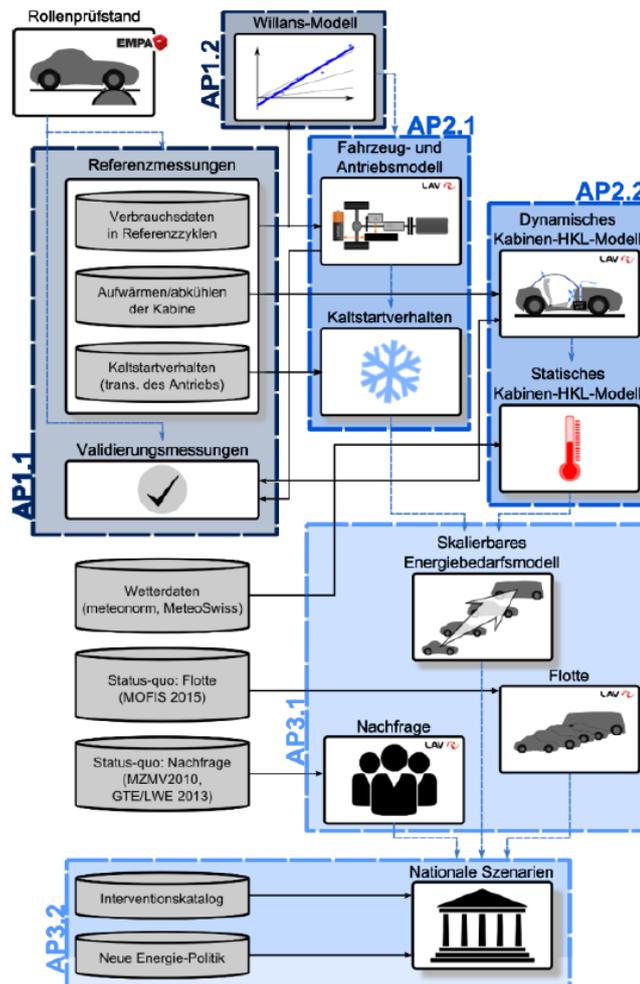




Schlussbericht vom 1. März 2020

ESMOBIL-RED

Realverbrauch konventionell und elektrisch angetriebener Fahrzeuge abbildendes, energiesystemisches Modell des schweizerischen Mobilitätssektors zur Bewertung von Nachhaltigkeitsmassnahmen





Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
Aerothermochemistry and Combustion Systems Laboratory



Empa

Materials Science and Technology

Datum: 1. März 2020

Ort: Zürich

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

ETH Zürich
Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
ML J 40, Sonneggstrasse 3
CH-8092 Zürich
www.lav.ethz.ch

Empa Dübendorf
Überlandstrasse
8600 Dübendorf
www.empa.ch

Autor/in:

Gil Georges, ETH Zürich, gil.georges@lav.mavt.ethz.ch
Lukas Küng, ETH Zürich, lukas.kueng@lav.mavt.ethz.ch
Thomas Bütler, Empa Dübendorf, thomas.buetler@empa.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501311-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

ESMOBIL-RED ist ein Modell zur Abschätzung des Energiebedarfs der heutigen und möglicher zukünftiger PW-Flotten der Schweiz. Dazu wurde eine eigens im Projekt betriebene Testflotte verschieden angetriebener Fahrzeuge in Labor- und Feldversuchen charakterisiert.

Die Daten des Laborversuchs dienten zur Kalibration sogenannter Willans-Modelle: sie beschreiben den Gesamtwirkungsgrad als Funktion der mittleren positiven mechanischen Leistung der Vortriebskraft am Rad — fortan «Radlast». ESMOBIL-RED generierte solche Modelle für konventionelle, hybridische und Plug-in hybridische Diesel-, Benzin- und Gasantriebe, sowie Batterieelektrische- und Brennstoffzellenantriebe. Die Radlast kann für jedes beliebige Fahrzeug in einer beliebigen Fahrsituation berechnet werden. Mit der Möglichkeit die Willans-Modelle verschiedener Antriebsformen gegeneinander auszutauschen entsteht ein universeller Schätzer des Energiebedarfs als Funktion grundlegender physikalischer Eigenschaften des Fahrzeugs (wie seiner Masse) und des Geschwindigkeitsprofils der Fahrt.

Auf nationaler Skala, der Ambition von ESMOBIL-RED, fehlt die Geschwindigkeitsinformation, da nicht jede Fahrt jedes Autos beobachtet werden kann. Deswegen wurde der Feldversuch als Stichprobe des Verbrauchs unter Realbedingungen herangezogen und die Abweichung zum Normwert im WLTC Testzyklus gemessen. Im Mittel lag der Realverbrauch bei allen Antriebsarten 20-30% über dem Normverbrauch. Statistische Analysen zeigten, dass die Berücksichtigung der effektiven Durchschnittsgeschwindigkeit, des Beschleunigungsverhaltens, der Strassentopographie und des Energiebedarfs allfälliger antriebsunabhängiger Nebenaggregate die Varianz einschränken. Aus der Umkehr dieser Erkenntnis entstand das ESMOBIL-RED Realverbrauchsmodell.

Die erste Anwendung war eine virtuelle Flotte auf Basis der in 2015 beobachteten Mobilitätsnachfrage der Schweizer Bevölkerung gemäss dem BFS Mikrozensus Mobilität und Verkehr. Die einzelnen Fahrzeuge widerspiegeln nicht nur die unterschiedlichen täglichen Nutzungsprofile in Distanz und Fahrtzeit, sondern unterscheiden sich auch in Form, Gewicht, Antriebsleistung und damit ihrem Energiebedarf und ihrer Reichweite. So konnte ein Optimierungsmodell für jedes Fahrzeug die (im Betrieb) CO₂-ärmste Antriebstechnologie auswählen, unter Berücksichtigung der benötigten Reichweite und der CO₂-Emissionen bei der Produktion des benötigten Energieträgers. Es zeigte sich, dass für die spezifischen Randbedingungen der Schweiz Vollelektrifizierung ein wünschenswerter und stabiler Endzustand ist.

Um den zeitlichen Verzug bis zum Erreichen der Vollelektrifizierung zu beleuchten, kam ein dynamisches Kohortenmodell der Flotte zum Einsatz. Es beschreibt die allmähliche Veränderung des Fahrzeugbestandes über den jährlichen Zufluss aus dem Neuwagenmarkt, sowie die Ausmusterung älterer Fahrzeuge als Funktion ihres Alters. Damit ist das imponierte Wachstum des Marktanteils der einzige limitierende Faktor der Elektrifizierung der Flotte. Unter der Annahme, die aktuellen CO₂-Ziele für PW werden eingehalten (und in Zukunft konsequent weitergeführt), ergeben sich die Marktanteile konkurrierender Technologien. Bewertet wurden die kumulierten CO₂-Emissionen bis zum Erreichen einer vollständig CO₂-neutralen Flotte. In allen Fällen auffällig war die grosse «eingeschlossene» CO₂-Emissionen der vor Beginn der Analyse verkauften, konventionellen Fahrzeuge. Eine schnelle Dekarbonisierung bedingte deswegen einen beschleunigten Rückgang der spezifischen Emissionen. Dies kann über einen erhöhten Marktanteil von Elektro- und Hybridfahrzeugen (d.h. Förderung), eine Beschleunigung der Substitutionsdynamik z.B. über «Abwrackprämien» oder den zusätzlichen Eintrag CO₂-armer Energievektoren wie «e-fuels» oder Biotreibstoffe erfolgen.

Die Fallbeispiele illustrieren wie der ESMOBIL-RED Ansatz Analysen rund um die Energieintegration zukünftiger Antriebssysteme eröffnet. Die wichtigsten Methodikbausteine wurden in 3 wissenschaftlichen Publikationen einem Fachpublikum unterbreitet.

Résumé

ESMOBIL-RED modélisait la consommation d'énergie de toutes les voitures dans la flotte Suisse, tant pour sa composition courante que des flottes hypothétiques comprenant des systèmes à traction électrique. Pour ce faire, une flotte d'expérimentation de 5 voitures a été caractérisée par des essais de laboratoire et des essais pratiques sur la route.

Les données des essais de laboratoire servaient à calibrer des modèles « Willans » pour tous les systèmes de traction investigués pendant le projet, notamment des systèmes conventionnels, hybrides et hybrides rechargeables à diesel, essence ou gaz, ainsi que des systèmes à batterie électrique et à l'hydrogène. Le modèle « Willans » décrit l'efficacité d'un système de propulsion comme une fonction affine de la charge moyenne positive de propulsion. Celle-ci peut être calculée pour n'importe quelle voiture, indépendamment de son système de propulsion, pourvu que certaines données techniques (comme sa masse) et opérationnelles (notamment un profil de vitesse) soient connues. La modélisation est donc universelle pour toute voiture et système de propulsion.

Les données des essais pratiques servaient à estimer la consommation d'énergie réelle. Elles définissent un facteur correctif entre la consommation réelle et la consommation normée indiquée par la procédure « WLTP ». Le facteur a été paramétrisé comme fonction de la vitesse moyenne, de l'accélération positive moyenne, de la topographie du réseau routier et l'intensité de charges auxiliaires, comme le système d'éclairage ou le chauffage de la cabine. Cette dernière a été particulièrement importante. En moyenne, la consommation réelle excédait la consommation normée à 20-30%.

Le modèle de consommation fut ensuite appliqué à la flotte de voitures Suisse. La demande de mobilité journalière était relevée par le microcensement sur les transports 2015 de l'OFS. Ensuite, un optimiseur déterminait le mix de technologies minimisant les émissions de CO₂ à travers toute la flotte, tenant compte de l'autonomie requise et des émissions de CO₂ pendant la disposition des carburants. Pour le contexte Suisse, l'électrification entière de la flotte présentait une stratégie efficace et robuste : le mix de technologies était insensible contre les variations du mélange d'électricité consommée, bien que l'effet de réduction y était directement proportionnel.

En pratique, il y a un délai entre la commercialisation d'un produit et sa pénétration complète de la flotte. Pour ce comprendre, nous utilisons un modèle de cohorte. Il décrit l'entrée de nouvelles voitures émergentes du marché, et la sortie d'anciennes voitures en fonction de leur âge. Postulant que le facteur limitant de l'électrification est son succès dans le marché, plusieurs scénarios ont été développés reflétant la politique Européenne. Nous évaluons les scénarios par leurs émissions de CO₂ cumulées jusqu'à une décarbonisation totale dans un futur suffisamment distant. Les résultats montraient la grande quantité de CO₂ associée aux voitures vendues avant le début de l'analyse (2019), indépendamment du succès commercial des voitures électriques. Pour une décarbonisation efficace il est donc important de réduire les émissions spécifiques le plus vite possible. Ceci peut se faire par l'augmentation du taux de marché (par exemple par un subside), à travers une accélération de la dynamique de substitution ou à travers l'introduction de carburants substitutifs comme les « e-fuel » ou biogéniques.

Les exemples fournis démontrent l'utilité pratique est la flexibilité de l'approche ESMOBIL-RED pour des études concernant l'intégration énergétique de nouvelles formes de propulsion. Les modules de méthodologie les plus importants ont été mis à disposition d'un public spécialisé dans trois publications scientifiques.

Abstract

Project ESMOBIL-RED developed an assessment methodology of the energy demand of the Swiss fleet of passenger cars, comprising its current and potential future propulsion technologies. To that end, a small fleet of test vehicles was characterised in laboratory and field tests.

The laboratory test data served to calibrate so-called «Willans» models for all propulsion systems investigated during ESMOBIL-RED, namely conventional, hybrid and plug-in hybrid powertrains fuelled by diesel, gasoline or natural gas, as well as battery electric and fuel cell electric systems. A Willans-model describes the total efficiency of a propulsion system as an affine relationship of the mean positive propulsion load. The latter can be computed for any car, given certain technical and operational characteristics (such as the effective mass and a speed profile). It is independent of the propulsion system, as the Willans-line is independent of the car. The model can thus be used to describe any car using any propulsion system.

The data of the field tests were used to estimate the real-world energy demand under road conditions. It was expressed as a correction factor relative to the norm consumption as defined by the legislative «WLTP» procedure. The variance of the factor value could be partially explained by the average velocity, the average positive acceleration, the experienced road topography and the load of auxiliary devices such as lighting or the cabin heating system. On average, the specific energy demand of all propulsion systems was 20-30% elevated in real-world conditions.

The consumption model was then applied to the entirety of the Swiss fleet. Its daily driving requirements were quantified by using the Swiss «Mikrozensus Mobilität und Verkehr» by the Swiss Federal Office for Statistics. Then an optimizer selected the mix of propulsion technologies yielding minimal CO₂ emissions over the entire fleet. It accounted for the effectively required autonomy range (using the microcensus data) and the CO₂ emissions of providing the potentially required alternative energy carriers. For the specific boundary conditions of Switzerland, full electrification of the fleet was shown to be an effective and robust decarbonisation strategy: it is robust against fluctuations of the CO₂-intensity of the average consumer electricity mix; of course the reduction effect is directly proportional to that CO₂-intensity.

There is a delay between the introduction of electric propulsion technologies in the market and the achievement of full electrification of the fleet. This was explored using a dynamic cohort model. It describes the natural renewal of the fleet as new vehicles entering the fleet through the market and old vehicles leaving the fleet as a function of their age. Postulating that the market share is the limiting factor of vehicle electrification, we developed a series of scenarios reflecting the current decarbonisation strategy of the Swiss respectively EU governments. To evaluate the scenarios, we used the resulting cumulative CO₂ emissions until reaching full electrification in a sufficiently distant future. The results highlight the important role of vehicles sold before and shortly after the beginning of the analysis in 2019: they stay in the fleet for over a decade, locking in large amounts of CO₂. For a fast and effective decarbonisation, it is thus paramount to quickly reduce the specific emissions as much as possible. Practically, this can be achieved by influencing the market share of hybrid and battery-electric vehicles (e.g. through subsidies), or by addressing vehicles in the fleet, either through accelerating the substitution dynamics (through scrapping subsidies) or by providing drop-in replacement fuels such as «e-fuels» or biofuels.

The results shown in this report prove the usefulness of the ESMOBIL-RED approach in investigating various questions around the energy integration of future propulsion systems. The most important methodological elements were made public in 3 specific scientific publications.

Take-home messages

ESMOBIL-RED Energiebedarfsmodell

- Das ESMOBIL-RED Energiebedarfsmodell ist universell auf beliebige Autos mit beliebigem Antrieb (sofern dafür die notwendigen Willans-Koeffizienten bekannt sind) unter beliebigen Fahrsituationen anwendbar.
- Es steht auf der rigorosen empirischen Basis der Laborversuche an real existierenden Vertretern aller Antriebsvarianten.
- Zur Anwendung erforderlich sind lediglich die entsprechenden Willans-Koeffizienten, allgemeine technische Eigenschaften des Fahrzeugs (wie seine Masse) und ein zeitabhängiges Geschwindigkeitssignal das die Fahrsituation beschreibt.
- Zusätzliche Störgrößen wie die Last von Nebenaggregaten oder ein steigungsreicher Streckenverlauf können einfach als zusätzliche Lasten aufgenommen werden.

ESMOBIL-RED Realverbrauchsmodell

- Wenn keine Daten aus Feldmessungen verfügbar sind kann das Energiebedarfsmodell mit legislativen Normfahrzyklen verwendet werden. Das ESMOBIL-RED Realverbrauchsmodell beschreibt die dadurch entstehende Unterschätzung des Realverbrauchs über einen Korrekturfaktor. Im Mittel beträgt der Unterschied 20-30%.
- Der Realverbrauchs faktor kann über 4 einfache Parameter (wie die Durchschnittsgeschwindigkeit) für spezifische Fälle bestimmt werden. Damit kann z.B. die Regionalisierung eines Fahrprofils (Berg- gegen Flachlandregion) oder Energieeffizienzmassnahmen wie «eco-driving» (moderates Beschleunigungsverhalten) oder sogar den Verkehrsfluss (Durchschnittsgeschwindigkeit) modellieren, ohne, dass dafür zusätzliche Messdaten erhoben werden müssten.

Anwendung für Energie-systemische Fragestellungen

- Das ESMOBIL-RED Energieverbrauchsmodell wurde mit zwei verschiedenen Flottendarstellungen kombiniert. Damit konnte sowohl der aggregierte Energiebedarf der Flotte berechnet werden, als auch die notwendigen Reichweiten im Einzelnen überprüft werden.
- Durch Anpassung der Modellparameter, wie beispielsweise des Leergewichtes der Fahrzeuge, können technologische Massnahmen wie z.B. Leichtbau simuliert werden.

Erkenntnisse der Szenarienanalyse

- In der Schweiz, mit ihrem aktuellen und absehbaren zukünftigen Elektrizitätsmix, hat sich eine vollelektrifizierte Flotte als effiziente und robuste Dekarbonisierungsstrategie bewiesen. Zwar hängt die Dekarbonisationswirkung direkt von der CO₂-Intensität der Ladelektrizität ab, aber bei den in der Schweiz erzielten Werten steht es ausser Frage, dass fossile Vektoren im PW-Sektor zu tieferen Emissionen führen könnten.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	9
1.1	AUSGANGSLAGE UND HINTERGRUND	9
1.1.1	CO ₂ -Reduktionspotential des PW-Verkehrs in der Schweiz	9
1.1.2	Rolle des PW-Sektors bei der Erreichung der Klimaziele der Schweiz	10
1.1.3	Weg zu einer CO ₂ -freien Mobilität: Rolle der Transformationsgeschwindigkeit	11
1.2	MOTIVATION DES PROJEKTES	11
1.2.1	Notwendigkeit der Dekarbonisierung	11
1.2.2	Berechnung der Energieintensität heutiger und zukünftiger Fahrzeuge	11
1.2.3	Normemissionen und die aktuelle Dekarbonisationsstrategie der Schweiz	12
1.3	PROJEKTZIELE	13
1.3.1	Übergeordnetes Ziel: Dekarbonisationsstrategien für den PW-Verkehr	13
1.4	STRUKTUR DIESES BERICHTS	13
1.4.1	Allgemeingültiges Energiemodell	13
1.4.2	Abweichung zwischen Real- und Normverbrauch	14
1.4.3	Technologische Reduktionspotentiale	14
1.4.4	Klimawirksamkeit einer Dekarbonisationsstrategie	14
2	ANLAGENBESCHRIEB: FLOTTENVERSUCHE	15
2.1	DIE ESMOBIL-RED TESTFLOTTE	15
2.2	VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG DER LABORMESSUNGEN	17
2.2.1	Messtechnik und -prozeduren	17
2.2.2	Messprogramm	18
2.3	MESSTECHNIK UND DURCHFÜHRUNG DER FELDVERSUCHE	19
2.3.1	Messtechnik	19
2.3.2	Durchführung	21
3	VORGEHEN UND METHODE	22
3.1	STRUKTUR DES PROJEKTES	22
3.2	BERECHNUNG DER ENERGIEINTENSITÄT EINES EINZELFAHRZEUGS	22
3.2.1	Mechanischer Energiebedarf am Rad	22
3.2.2	Effizienz des Antriebs (Willans-Ansatz)	23
3.2.3	Korrektur für Realbedingungen	24
3.3	SZENARIOANALYSE: CO ₂ -OPTIMALE FLOTTE	26
3.4	SZENARIOANALYSE: ZUKÜNFTIGE FLOTTEN	27
3.4.1	Kohortenmodell der Schweizer PW-Flotte	28
3.4.2	Jahresfahrleistung Schweizer PW	28
3.4.3	Flottenszenarien	28
3.4.4	Bewertung der Nachhaltigkeit	29
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	31
4.1	AUSWERTUNG DER LABORMESSKAMPAGNE	31
4.1.1	Verbrauchswerte	31
4.1.2	Kaltstartverhalten und Verbrauch relativ zum WLTC	32
4.1.3	Validierung der Fahrzeug-Messtechnik für den Feldversuch	33
4.2	AUSWERTUNG DER FELDTESTS	34
4.2.1	Nutzungsprofile der Testfahrzeuge	34
4.2.2	Spezifischer Energiebedarf über alle Fahrten	35
4.2.3	Spezifischer Energieverbrauch nach Strassenart	36

4.2.4	<i>Einfluss der Strassentopographie auf den Energiebedarf</i>	38
4.3	ENERGIEMODELL	39
4.3.1	<i>Herleitung der Willans-Koeffizienten</i>	39
4.3.2	<i>Zusatz: Willans-Gerade des Lade- und Batteriesystems</i>	41
4.4	REALVERBRAUCHSMODELL.....	42
4.4.1	<i>Einfluss nicht-antriebsrelevanter Nebenaggregate</i>	45
4.4.2	<i>Phänomenologische Modellierung der Heiz- und Kühllast</i>	46
4.4.3	<i>Realverbrauchsfaktoren</i>	49
4.5	OPTIMALE FLOTTENZUSAMMENSETZUNG	50
4.6	FLOTTENZENARIOEN	53
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND FAZIT	55
6	AUSBLICK UND ZUKÜNFTIGE UMSETZUNG	56
7	NATIONALE UND INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT	57
8	KOMMUNIKATION	58
9	PUBLIKATIONEN	58
10	LITERATURVERZEICHNIS	59

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

1.1.1 CO₂-Reduktionspotential des PW-Verkehrs in der Schweiz

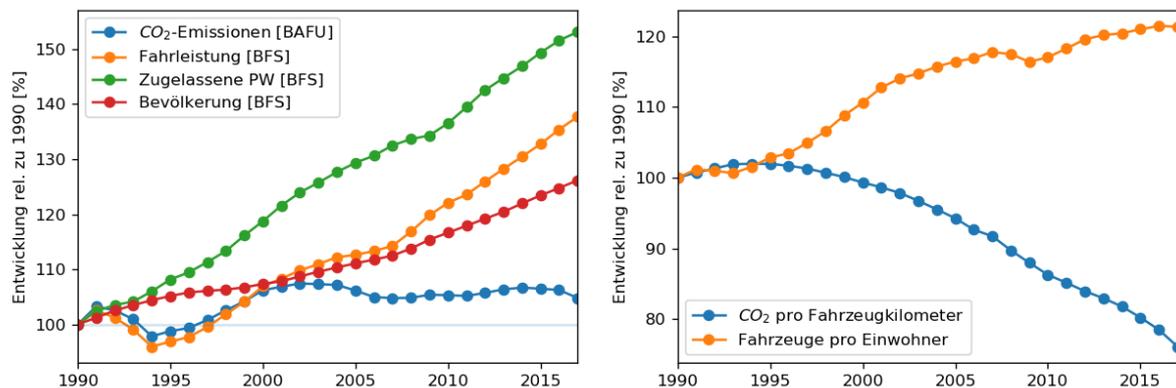


Abbildung 1: Entwicklung der CO₂-Emissionen, Fahrleistung und Anzahl Schweizer PW sowie der Schweizer Bevölkerung relativ zu 1990 (links); sinkende CO₂-Emissionen pro gefahrenem Kilometer und steigender Motorisierungsgrad (rechts) als Verhältnis der jeweiligen Kurven auf der linken Hälfte.

In der Schweiz ist der Verkehr, unter allen Wirtschaftszweigen, der wichtigste CO₂ Emittent. Der emissionsreichste Transportmodus ist der motorisierte Individualverkehr (MIV). Der MIV umfasst diverse Transportmittel, wie Motorräder; CO₂-relevant (in der Schweiz) sind aber nur Personenwagen (PW) [1]. Trotz wachsender ÖV-Anteile [2], verschärften CO₂-Vorschriften [Flottenziele] und dem Vorstoss elektrifizierter Antriebe [3] sind die jährlichen Gesamtemissionen der Schweizer PW Flotte gegenüber 1990 um ungefähr 5% gestiegen, wo sie seit fast 2 Jahrzehnten mehr oder weniger stagnieren [1]; erst in den letzten Jahren ist eine zaghafte Trendwende zu erkennen (siehe Abbildung 1). Gleichzeitig ist die Nachfrage (gemessen in Fahrzeugkilometern) um massive 35% gestiegen [4]. Die Emissionsintensität, die durchschnittlich pro gefahrenem Kilometer ausgestossene CO₂-Menge, hat sich demnach um fast 25% verringert. Einzelnen wurden PW-Antriebe demnach effizienter; dieser Fortschritt wurde aber systemweit vom Wachstum der Nachfrage kompensiert.

Die Verkehrsperspektiven des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) [5] legen nahe, dass die Nachfrage auch in Zukunft wachsen wird. Um die CO₂-Emissionen signifikant (und mit Gewissheit) zu reduzieren, sind regulatorische resp. technologische Eingriffe ins System notwendig. Die augenscheinliche Lösung ist, die Nachfrage auf ÖV und Langsamverkehr umzulagern. Jedoch ist der MIV das Rückgrat unseres Mobilitätssystems: im Alltag legt der durchschnittliche Einwohner der Schweiz rund 37 km zurück, davon 2/3 mit dem MIV [4]. Das lässt sich nicht von heute auf morgen ersetzen. Das zeigen auch die ARE Szenarien, die trotz angenommener starker (und erfolgreicher) Förderung des ÖV ein starkes MIV Wachstum prognostizieren. Automatische Fahrzeuge mögen die Art wie wir MIV konsumieren transformieren. Aber als Modus wird er lange erhalten bleiben. Deshalb ist es von strategischer Bedeutung, und Schwerpunkt dieses Projektes, die Emissionsintensität der Antriebe zu reduzieren. Zunächst besteht Optimierungspotential beim verbrennungsbasierten Antrieb, insb. in der Hybridisierung und dem Wechsel auf Erdgas [6]. Drastischer ist der Ersatz von Diesel und Benzin durch erneuerbar produzierten Energieträger wie Elektrizität, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe. Sie können die Emissionsintensität (gemäss vorangegangener Definition) faktisch zu Null setzen. Diese neuen Energieträger müssen aber erst produziert werden. Ausserdem bedingen sie neue Technologien im Fahrzeug selbst und darum herum, insb. in Form der benötigten

Energieinfrastruktur (Lade- und Zapfsäulen). Das wirft die Frage auf, ob andere Sektoren wie z.B. die Stromproduktion nicht mehr CO₂ mit weniger Aufwand reduzieren könnten.

1.1.2 Rolle des PW-Sektors bei der Erreichung der Klimaziele der Schweiz

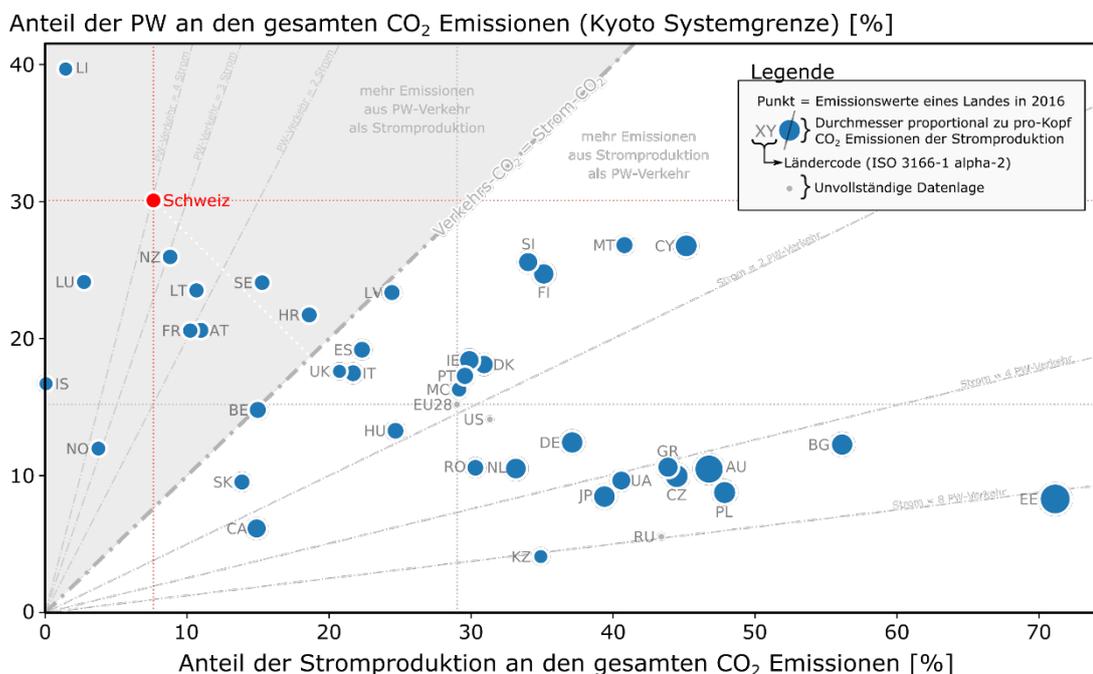


Abbildung 2: Anteil des PW-Verkehrs und der Stromproduktion an den totalen CO₂-Emissionen (innerhalb der Kyoto Systemgrenze) verschiedener Nationen in 2016 [8]. Der Punktdurchmesser skaliert mit den CO₂ Emissionen der Stromproduktion pro Kopf und ist damit ein Mass für CO₂-Intensität der Stromproduktion (unter der Annahme, dass der Elektrizitätsbedarf mit der Bevölkerung skaliert und Import-/Exportgeschäfte vernachlässigt werden können). Im grau hinterlegten Bereich generiert der PW-Sektor absolut mehr Emissionen als die Stromproduktion. Das Ungleichgewicht wächst mit der euklidischen Distanz zur Trennlinie (weiss gepunktete Linie).

Im internationalen Vergleich zeigt sich (siehe Abbildung 2), dass in der Schweiz die CO₂-Emissionen des PW-Verkehrs jene der Elektrizitätsproduktion vielfach überschreiten. Das ist zunächst eine arithmetische Konsequenz der Zusammensetzung des Schweizer Kraftwerkparcs: die CO₂-Bilanz¹ berücksichtigt sämtliche Emissionen der Kraftwerke innerhalb eines Landes, unabhängig davon wer die generierte Elektrizität konsumiert (im ökonomischen Sinn). Mit ihrem Fokus auf Wasser- und Kernkraft trägt die Elektrizitätsproduktion der Schweiz deswegen kaum zur Bilanz bei [7]. Das unterbieten nur noch jene Länder mit grösserer Wasserkraftkapazität (Island und Norwegen) oder minimaler Eigenproduktion (Lichtenstein und Luxemburg) [8].

Das Potential eines Energieträgerwechsels ist in der Schweiz also besonders hoch, weil der Elektrizitätssektor bereits grösstenteils dekarbonisiert ist. Wie Abbildung 2 zeigt, ist das im EU28-Durchschnitt nicht der Fall. Ausserdem ist das relative Reduktionspotential von 30% eines der höchsten im Feld. Das ansonsten vergleichbare Norwegen liegt bei «nur» 12%. Hauptursache dafür ist der viel stärker ausgeprägte Binnenflug- und Schwerverkehr: insgesamt hält der MIV weniger als 50% der Verkehrsemissionen, verglichen mit über 2/3 in der Schweiz [8].

¹ Bemerkung: die CO₂-Bilanz versteht sich gemäss UNFCCC guidelines innerhalb der Kyoto-Systemgrenze, d.h. ausschliesslich internationalem Flug- und Schiffverkehr, Landnutzungsänderung, Forstwirtschaft und UNFCCC Sektor 6.

1.1.3 Weg zu einer CO₂-freien Mobilität: Rolle der Transformationsgeschwindigkeit

Im vorangehenden Kapitel definierten wir das Reduktionspotential des PW Sektors als die CO₂-Emissionen der aktuellen, fast vollständig fossil angetriebenen Flotte. Damit nehmen wir an, eine Technologie wie Elektromobilität eliminiere alle CO₂ Emissionen über Nacht. In Wirklichkeit ist das ein allmählicher Prozess, getrieben durch den Neuwagenmarkt: 2018 wurden europaweit (EU28 + EFTA) rund zweihunderttausend neue Elektrofahrzeuge (EVs) zugelassen. Norwegen war dabei mit 46'143 Neuzulassungen der absolut grösste Markt. Zum Vergleich, in der Schweiz waren es 2018 «nur» 5'138 EVs; dabei war der gesamtschweizerische Markt (über alle Antriebsarten) mit rund dreihunderttausend Neuzulassungen in 2018 [9] fast doppelt so gross wie der Norwegische [10]. Noch deutlicher wird der Unterschied im Bestand: Ende 2018 waren in der Schweiz fast zwanzigtausend EVs im Umlauf [3], in Norwegen waren es annähernd zweihunderttausend. Das Reduktionspotential der Schweiz mag also insgesamt höher sein, aber Norwegen hat bereits (wenigstens theoretisch) 10 mal mehr von seinem realisiert. Was bedeutet das klimapolitisch?

1.2 Motivation des Projektes

1.2.1 Notwendigkeit der Dekarbonisierung

Der IPCC «special report» [11] schätzt, dass noch 383 Gt CO₂ (umgerechnet ab 2019) emittiert werden dürfen, bevor die mittlere Erderwärmung mit grosser Wahrscheinlichkeit (66%) permanent +1.5°C überschreitet. Aktuell werden weltweit 36 Gt/Jahr ausgestossen. Bleibt diese Zahl konstant, so ist das CO₂ Budget in etwas mehr als zehn Jahren aufgebraucht. Wenn wir einen linearen Absenkpfad annehmen, dann muss dieser innert rund zwei Jahrzehnte zu vollständiger Dekarbonisierung führen. Das ist extrem kurzfristig und bedeutet, alle Sektoren, auch der Transport, müssen ihren Teil beitragen und das Ziel muss «netto-null» sein.

Wie bereits diskutiert ist Elektrifizierung ein effektiver Weg zu null Emissionen in der Mobilität. Allerdings können auf Grund der angesprochenen Marktdynamik Jahrzehnte vergehen bis eine neue Antriebstechnologie die vollständig durchdringt — wenn dieser Punkt überhaupt je erreicht wird. In der Zwischenzeit stossen fossil angetriebene Fahrzeuge weiterhin CO₂ aus. Gleichzeitig verändern sich wichtige Randbedingungen, wie z.B. der Elektrizitätsmix der Schweiz, unter dem Druck fluktuierender Erneuerbarer, dem Atomausstieg und der zusätzlichen Last aus (unter anderem) der Elektromobilität. Das birgt speziell in der elektrisch offenen «Stromdrehscheibe Schweiz» das Risiko einer Intensivierung der CO₂-Emissionen aus dem Stromsektor, wenn auch nur indirekt über Importgeschäfte. Die Effektivität einer Dekarbonisationsmassnahme ist also verzögert und zeitlich variabel. Die Bewertung einer Dekarbonisationsstrategie darf also nicht alleine auf die heutige Flotte oder einzelne Technologien fokussieren, sondern muss den Transformationsprozess in Zukunft beschreiben, inklusive der relevanten Nebenschauplätze.

1.2.2 Berechnung der Energieintensität heutiger und zukünftiger Fahrzeuge

Die lange und erfolgreiche Geschichte konventioneller Antriebe liefert eine breite Erfahrungsbasis, auf welcher datenbasierte Ansätze zuverlässig Emissionsintensitäten vorhersagen können. Bei alternativen Antriebssystemen fehlt diese Datenbasis, schlicht wegen der geringen Stückzahl. Zwar gibt es viele punktuelle Feldstudien, aber sie leiden unter Repräsentativitätsproblemen. Stehen keine (oder nicht genug) reale Fahrzeuge zur Verfügung, bleiben nur Computersimulationen. Sie beschreiben die Fahrphysik und die verschiedenen Energieumwandlungsprozesse während der Fahrt. Die Physik aller gängigen Energiewandler ist fundamental verstanden, wie z.B. der Magnetfluss durch einen Elektromotor, der sich über finite Elemente Methoden und die Maxwell Gleichungen berechnen lässt. Das ist aber rechenintensiv und bedingt die exakte Geometrie und Materialeigenschaften des Elektromotors, sprich die komplette Konstruktion. Eine solch detaillierte Simulation ohne Abgleich mit

einem physikalischen Referenzsystem durchzuführen ist fragwürdig; und wenn ein Referenzsystem verfügbar ist, kann man genauso gut datenbasiert arbeiten.

In der Praxis wird meist ein Kompromiss geschlossen: kritische Aspekte wie z.B. die Längsdynamik werden vollständig aufgelöst, während empirische Modelle andere Phänomene wie die Umströmung des Fahrzeugs oder die Physik der Energiewandler approximieren, z.B. mittels Betriebskennfelder. Diese liefern eine hinreichend präzise virtuelle Abbildung einer existierenden Komponente. Obwohl sie viele grundlegende Phänomene nicht auflösen, bieten sie tiefe Einblicke in die Funktionsweise einer Komponente; Hersteller hüten sie deshalb oft als Betriebsgeheimnis. Das macht es ausserhalb einer Produktentwicklung schwierig bis unmöglich, zuverlässige Komponentenmodelle aufzutreiben, wenigstens für den aktuellen Technologiestand.

Natürlich lassen sich Wissenslücken mit ingenieurwissenschaftlichen Annahmen schliessen; z.B. ganz einfach, dass alle zukünftigen Komponenten sich so verhalten wie jene, für welche Informationen verfügbar sind. Das stellt aber die Repräsentativität der Resultate in Frage. Ein eindeutiges Qualitätsmass liefert nur der Vergleich mit einem existierenden Referenzfahrzeug, was zum gleichen Dilemma wie beim modellfreien Ansatz führt. Hinzu kommt, dass neben dem Komponentenverhalten an sich grosse Unsicherheit auf der Auslegung des Antriebsstranges besteht: welche Komponentenvarianten ausgewählt werden, welche Leistung sie haben und wie sie angesteuert werden ist am Ende des Tages keine reine Frage von Effizienz: ein Fahrzeugdesign ist ein Kompromiss innerhalb des betriebswirtschaftlichen Kontextes eines Herstellers. Dabei spielen gänzlich nicht-technische Faktoren wie die bestehende Zulieferkette, das Markenimage oder regulatorische Randbedingungen eine wichtige Rolle. Ein Aussenstehender kann darüber nur spekulieren; ein reines Energiemodell liefert für solche Überlegungen keine Basis.

Im Endeffekt führt das zum gleichen Problem: ein Analyst kann bestehende Fahrzeuge beobachten oder hypothetische simulieren, in beiden Fällen ohne Garantie auf Repräsentativität. Der rein empirische Ansatz enthält keine Beschreibung der grundlegenden Phänomenologie und kann deshalb a priori keine Aussagen über andere Fahrzeuge als das Vermessene machen. Genau darin liegt die Stärke des rein simulativen Ansatzes. Ohne Kalibration sind seine Aussagen aber arbiträr. Kalibriert verallgemeinert er nur insofern die empirischen Komponentenmodelle, als jene Effekte veränderter Randbedingungen widerspiegeln können. Das ist keine Selbstverständlichkeit.

1.2.3 Normemissionen und die aktuelle Dekarbonisationsstrategie der Schweiz

Bei der Betrachtung ganzer Flotten kommt die Varianz zwischen Einzelfahrzeugen und -fahrten hinzu. Lokale Phänomene wie das Fahrverhalten und allfällige Nebenlasten wie das Heiz-, Lüftungs- und Kühlsystem (HLK) können zu grösseren Unsicherheiten führen als jene der technischen Beschreibung des Fahrzeugs. Für viele Autofahrer äussert sich dies im Alltag in einer Diskrepanz zwischen dem effektiven Verbrauch und der Herstellerangabe — fortan Normwert genannt. Der Normwert wird nach EU-Richtlinie 715/2007/EG vom 20. Juni 2007 bestimmt, im sogenannten «New European Driving Cycle» (NEDC). Wie das «International Council on Clean Transportation» (ICCT) dokumentiert hat [12] liegt der Normwert seit 2001 systematisch unter dem Realwert auf der Strasse; die Abweichung ist seither auf über 40% im Mittel gestiegen. Besorgniserregend ist weniger die Existenz einer Lücke als deren zeitliche Veränderung, denn die aktuelle klimapolitische Regelung des PW-Sektors in der EU und der Schweiz (und deswegen unsere Referenz-Dekarbonisationsstrategie in diesem Bericht) basiert auf Normwerten. Herstellern (resp. Importeuren) drohen hohe Strafzahlungen, falls die mittlere Emissionsintensität der Neufahrzeuge die sie in einem Jahr zulassen einen definierten Grenzwert überschreitet. Der Grenzwert beträgt 95 g/km ab 2021 und wird bis 2030 gestaffelt um 37.5% abgesenkt (wenigstens in der EU). Nimmt die Differenz zwischen Real- und Normwert weiter zu, so ist die effektive Reduktionswirkung (welche sich aus dem Realwert ergibt) geringer.

1.3 Projektziele

1.3.1 Übergeordnetes Ziel: Dekarbonisationsstrategien für den PW-Verkehr

ESMOBIL-RED ist ein Ansatz, Dekarbonisationsstrategien für den PW-Verkehr rigoros zu bewerten, über eine Beschreibung des resultierenden Transformationspfades. Dabei steht insbesondere die zeitliche Wirkungsentfaltung einer erfolgreichen Einführung neuer Technologie im Fokus, speziell neuer Antriebstechnologien wie Hybridisierung, Elektromobilität und Wasserstoff-/Brennstoffzellenantriebe. Dazu mussten wir drei methodische Probleme angehen:

Erstens verlangt das Vorhaben nach einem allgemeingültigen Fahrzeugenergiemodell, welches die in Kapitel 1.2.2 erläuterten Repräsentativitätsprobleme aus der Welt schafft. Nur so lässt sich die Betrachtung auf ganze Fahrzeugflotten erweitern und deren Transformationspfad aufzeigen. Aufbauend auf einem robusten, eigens im Projekt generierten Datenfundament soll es den Energiebedarf bestehender Fahrzeuge nachweislich korrekt berechnen können. Gleichzeitig soll es physikalisch nachvollziehbar auf alle zukünftig (vernünftig) zu erwartenden Fahrzeugkonfigurationen erweiterbar sein, wozu auch Änderungen an der Fahrzeugtechnik wie z.B. Gewichtsreduktion oder Formveränderungen gehören.

Zweitens muss unser Ansatz die in der Praxis auftretende Verbrauchsschwankungen durch externe Einflüsse wie Fahrerverhalten oder das Wetter in Magnitude und Frequenz berücksichtigen — für alle Antriebsarten — um die in Kapitel 1.2.3. erläuterte Unterschätzung der effektiven CO₂-Emissionen zu vermeiden. Das soll experimentell für die im Projekt betriebene Testflotte überprüft werden und auf heutige und zukünftige Gesamtflotte extrapolierbar sein.

Drittens soll die zum Abschluss von Kapitel 1.1.3 diskutierte EU-Flottenziele mit der ESMOBIL-RED Methode überprüft werden. Dazu benötigen wir ein verständliches und ausgewogenes Mass für die Klimawirkung einer Dekarbonisationsstrategie. Zunächst muss der im angestrebten Endzustand eingesetzte Technologiemit den Mobilitätsbedürfnissen technisch gewachsen sein und gegenüber Schwankungen der CO₂-Intensität des Elektrizitätsmixes robust sein. Als Indikator für Klimawirksamkeit sollen anschliessend die kumulierten «tank to wheel» CO₂-Emissionen über den gesamten Transformationsprozess dienen. Verglichen mit den in Kapitel 1.2.1 eingeführten IPCC Budgets ergeben sie ein Mass für Dringlichkeit und Zielorientierung: umso grösser der durch den PW-Sektor beanspruchten Anteil des Budgets, umso stärker müssen andere Sektoren gegensteuern.

1.4 Struktur dieses Berichts

Im Folgenden geben wir einen groben Überblick über die Gliederung der Arbeitspakete respektive methodologischen Bausteine und ihre logischen Verknüpfungen, bevor die nachfolgenden Kapitel vertieft in die Methodologie und Resultate einsteigen.

1.4.1 Allgemeingültiges Energiemodell

Der Kern von ESMOBIL-RED ist sein für alle Antriebsformen und Fahrzeugkonfigurationen gültiges Energiemodell. Es fusst auf den Daten einer breit angelegten Feld- und Laborversuchskampagne. Kapitel 2 diskutiert das experimentelle Vorgehen. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 erklären, wie diese Daten zur Herleitung semi-empirischer Modelle eingesetzt wurden und wie diese Modelle erlauben, die Effizienz des Antriebs mathematisch von den physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs und der Fahrsituation zu entkoppeln. Damit ist die in Kapitel 1.3.1 verlangte Allgemeingültigkeit gegeben.

1.4.2 Abweichung zwischen Real- und Normverbrauch

Zur Bezifferung der Abweichungen des Verbrauchs unter Normbedingungen im Labor und unter Realbedingungen auf der Strasse wurden die im Labor vermessenen Fahrzeuge zusätzlich in einem grossangelegten Feldversuch im Flottenbetrieb der Empa untersucht. Die Daten erlaubten eine Prozedur zur Bestimmung eines Korrekturfaktors zu definieren. Berücksichtigt werden das Fahrerverhalten, die Strassentopografie und der Energiebedarf antriebsunabhängiger Hilfsaggregate. Da insbesondere die Kabinenheizung bei elektrifizierten Antrieben die Komponente mit der grössten elektrischen Nennleistung neben dem Antrieb ist, wurde zusätzlich die Phänomenologie des Heizenergiebedarfs mit einem thermodynamischen Kabinenmodell beleuchtet.

1.4.3 Technologische Reduktionspotentiale

Systemseitig wurde das Energiemodell zunächst für die Berechnung des technologischen Reduktionspotential innerhalb der aktuellen Nachfrage gemäss dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr des BFS berechnet. Untersucht wurden die effektiv benötigte Reichweite, graue Emissionen entlang der heutigen und möglicher zukünftiger Energieversorgungsketten sowie die Möglichkeit verschiedene Technologievarianten zu kombinieren. Daraus ergab sich der maximale CO₂-reduzierende Flottenmix und wie dieser von externen Randbedingungen wie der CO₂-Intensität der Elektrizitätsversorgung abhängt.

1.4.4 Klimawirksamkeit einer Dekarbonisationsstrategie

In diesem letzten Schritt wurde die Dynamik der Transition über ein Flottensubstitutionsmodell abgebildet. Solche Modelle beschreiben die zeitliche Veränderung der Flottenzusammensetzung über den Zufluss neuer Fahrzeuge (und damit neuer Technologien) aus dem Markt, sowie der Ausserverkehrssetzung bestehender. Unter Anwendung des Energiemodells und Annahmen wurden so die direkten CO₂-Emissionen der Flotte Jahr für Jahr extrapoliert. Als Fallbeispiel wurden die zum Abschluss von Kapitel 1.1.3 diskutierte EU-Flottenziele mit der ESMOBIL-RED Methode überprüft.

2 Anlagenbeschrieb: Flottenversuche

Die empirische Grundlage des ESMOBIL-RED Modells produzierte die Empa in einer breit angelegten Feld- und Laborversuchskampagne. Dazu wurde eine Flotte alternativ angetriebener Fahrzeuge (Erdgas-, Hybrid-, Plug-in Hybrid-, Batterie-elektrische und Brennstoffzellenantriebe) mit einem Datenerfassungssystem ausgerüstet welches energieverbrauchsrelevante Daten aufzeichnet. Die Fahrzeuge wurden zunächst unter kontrollierten Bedingungen im Labor untersucht und anschliessend im laufenden Betrieb als Mietfahrzeug in der Betriebsflotte der Empa Dübendorf eingesetzt und mit dem Datenerfassungssystem überwacht. Im Folgenden erläutern wir die Fahrzeuge, die Messkampagnen und die eingesetzte Messtechnik.

2.1 Die ESMOBIL-RED Testflotte

Um vergleichbare Verbrauchsdaten zu erhalten, wurde bei der Auswahl der Fahrzeugtypen darauf geachtet, dass sich die Fahrzeuge in den Grundparametern (Leistung, Karosserieform, Gewicht) so wenig wie möglich unterscheiden. Mit der Mittelklasse ("Golf-Klasse") wurde ein Marktsegment gewählt, welches von den meisten LCA Studien als repräsentativ für die Schweiz angenommen wird. In der Tat ist der VW Golf, neben dem Skoda Octavia, seit Jahren das meistverkaufte Modell der Schweiz (Modellstatistik 2013-2018, Auto Schweiz)².

So bestand die Flotte im Endeffekt aus einem batterie-elektrischen VW e-Golf (BEV), einem Plug-In Hybrid Audi A3 e-tron (PHEV) und einem gasbetriebenen Audi A3 g-tron (CNG). Zu Projektbeginn war kein Vollhybridfahrzeug in der Mittelklasse verfügbar. Deshalb wurde auf einen VW Jetta ausgewichen. Er basiert zwar auf derselben Plattform wie der VW Golf resp. der Audi A3, hat aber ein Stufenheck anstelle eines Schräghecks.

Ähnlich stellt sich die Situation beim Brennstoffzellenfahrzeug dar. In der Schweiz war zu Projektbeginn nur ein Fahrzeugmodell mit Brennstoffzellenantrieb erhältlich. Der Hyundai ix35 Fuel Cell unterscheidet sich sowohl aerodynamisch wie auch gewichtsmässig stark von den anderen Fahrzeugtypen. Beim Vergleich der ermittelten Realverbräuche gilt es dies deshalb zu beachten. Auf die Charakterisierung des Antriebsstrangs hat dies aber nur einen geringfügigen Einfluss, da die Antriebsleistung im Bereich der anderen Fahrzeuge liegt.

² <https://www.auto.swiss/statistiken/pw-zulassungen-nach-modellen/>

	Gas-Fahrzeug (CNG)	Hybrid Fahrzeug (HEV) ohne externe Auflademöglichkeit	Plug in Hybrid Fahrzeug (PHEV) mit externer Auflademöglichkeit	Elektrofahrzeug (BEV)	Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)
					
Marke / Typ	Audi A3 Sportback g-tron	Volkswagen Jetta Hybrid	Audi A3 Sportback e-tron	Volkswagen e-Golf	Hyundai ix35 Fuel Cell
Energieträger	Erdgas-Biogas / Benzin	Benzin	Benzin / Elektrisch	Elektrisch	Wasserstoff (gasförmig)
Antrieb	Verbrennungsmotor (81kW)	Verbrennungsmotor (110kW) / Elektromotor (20kW)	Verbrennungsmotor (110kW) / Elektromotor (75kW)	Elektromotor (85kW)	Elektromotor 100kW (Brennstoffzelle + Hochvoltbatterie)
Getriebe	Automatik 7-Gang DSG	Automatik 7-Gang DSG	Automatikgetriebe 6-Gang DSG	1-Gang-Getriebe	1-Gang-Getriebe
Leergewicht / Zuladung	1260 kg / 540 kg	1505 kg / 590 kg	1615 kg / 435 kg	1510 kg / 450 kg	1830 kg / 420 kg
Verbrauch (Norm, gem. NEFZ)	3.6 kg/100km	4.1 l/100km	Benzin 1.7 l/100km + Elektr. 12.4 kWh/100km	12.7 kWh/100km	0.95 kg H2/100km
Reichweite (Norm, gem. NEFZ)	1300 km (Gas: 400km; Benzin: 900 km)	1100 km	940 km (davon 50km rein elektrisch)	190 km	594 km
Fahrstrecke im Fedldtest	38'600 km	39'000 km	26'100 km	10'000 km	33'800 km

Abbildung 3: Zusammenstellung der Fahrzeugeigenschaften der ESMOBIL-Fahrzeugflotte. Alle Fahrzeuge wurden aufgrund ihres Erstzulassungsdatums nach dem bisherigen Verbrauchszyklus NEFZ typisiert. Beim PHEV Verbrauch werden die Einzelverbräuche (Hybrid, rein Elektrisch) mittels der elektrischen Reichweite gewichtet zu einem Gesamtergebnis verrechnet.

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung der Labormessungen

2.2.1 Messtechnik und -prozeduren

Die Energieeffizienzuntersuchungen der verschiedenen Antriebsvarianten wurden unter kontrollierten Rahmenbedingungen auf einem Rollenprüfstand durchgeführt, wie er auch für die Verbrauchsmessungen gemäss Richtlinie ECE R 101 verwendet wird: Abbildung 4 schematisiert den entsprechenden Aufbau. Die auf der Rolle fixierten Fahrzeuge wurden dazu in vordefinierten Fahrsequenzen (sogenannten Fahrzyklen) betrieben. Die Rolle emuliert dabei den Fahrwiderstand auf der Strasse. Der Aufbau befindet sich in einer Klimakammer, welche die Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft auf kontrolliert konstanten Werten hält. Der Rollenprüfstand wurde für jedes Fahrzeug individuell auf den vom Hersteller vorgegebenen Fahrwiderstandswert und die reale Fahrzeugmasse (Leergewicht inkl. Fahrer und 25kg Zubehör/Gepäck) eingestellt. Gemessen wurde jeweils die momentane Leistungsabgabe (resp. -aufnahme) des Rades an die Rolle, sowie der Fluss des Endenergieträgers (Benzin, Diesel, Gas, Wasserstoff oder Elektrizität) aus dem Tank resp. der Batterie. Die eingesetzte Messtechnik und -prozeduren richteten sich dabei nach der Antriebsart:

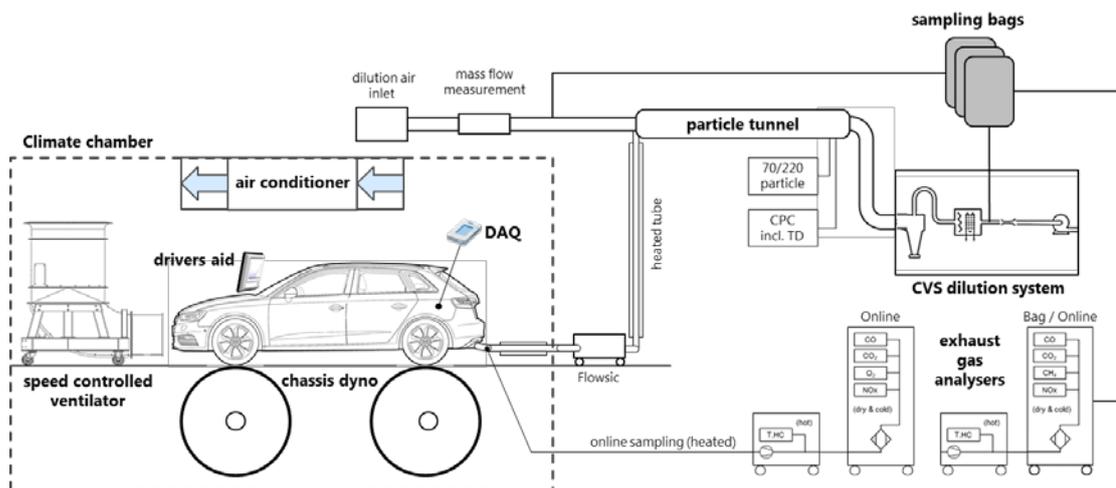


Abbildung 4: Prüfstands Aufbau zur Erfassung des Energieverbrauchs, dargestellt anhand des Plug-In Hybridfahrzeugs. Die Emissionen des Verbrennungsmotors wurden von der Abgasmesstechnik analysiert um den Verbrauch zu berechnen. Der elektrische Energiebedarf wurde durch das Datenerfassungssystem (DAQ) ermittelt. Beim BEV und beim FCEV wird die Abgasanalytik natürlich nicht benötigt.

Bei den Fahrzeugen welche mit einem Verbrennungsmotor ausgerüstet sind wurde der Kraftstoffbedarf entsprechend der Kohlenstoffbilanz aus den Emissionskonzentrationen im Abgas und dem dazugehörigen Abgasmassenstrom ermittelt. Dasselbe Verfahren kommt auch bei der Verbrauchsermittlung in der Typenprüfung zur Anwendung. Die Kohlenstoffbilanz ist eine exakte Messmethode, sofern das Tanksystem einwandfrei funktioniert (sprich kein Leck im Tank oder in einer Kraftstoffleitung aufweist). Mit Hilfe der Energiedichte des jeweiligen Kraftstoffs kann aus der verbrauchten Kraftstoffmenge der Energieverbrauch abgeleitet werden.

Bei den Fahrzeugen, welche zusätzlich oder ausschliesslich mit einem elektrischen Antriebsstrang ausgerüstet sind, wurde der Leistungsbezug aus der Hochvoltbatterie mittels Strom- und Spannungsmessungen erfasst, um so eine zeitaufgelöste Energiebedarfsbewertung des elektrischen Antriebsstrangs und der entsprechenden Nebenaggregate zu ermöglichen.

Plug-In Hybride sind ein prozeduraler Sonderfall: sie können sowohl rein elektrisch als auch verbrennungsmotorisch im Hybridmodus betrieben werden. Daher müssen beide Antriebsmodi

separat analysiert werden. Für den elektrischen Betrieb wurden Messungen mit vollgeladener Batterie und reinem Elektroantrieb durchgeführt. Für die Messungen im Hybridbetrieb wurde vorgängig die Batterie kontrolliert entladen um einen stabilen Betrieb im Hybridmodus zu gewährleisten. Dabei kam die gleiche Messtechnik wie bei reinen Batterie- oder Hybridfahrzeugen zum Einsatz.

Für das Brennstoffzellenfahrzeug kam die Verbrauchsberechnung gemäss ECE R 83 zur Anwendung. Die Berechnung des Verbrauchs erfolgte anhand des Druckunterschieds im Fahrzeugtank. Diese Methode vergleicht den Tankinhalt vor und nach dem Test, sprich sie generiert keine zeitlich aufgelösten Verbrauchssignale für das Brennstoffzellenfahrzeug.

2.2.2 Messprogramm

Alle Fahrzeuge, unabhängig ihres Antriebs, wurden in folgender Sequenz an Fahrzyklen bei Standardbedingungen (23°C, 50% relative Luftfeuchtigkeit) vermessen:

- 1x WLTC, kalt gestartet (international erarbeiteter Zyklus, neuer Typisierungszyklus)
- 3x WLTC, heiss gestartet (international erarbeiteter Zyklus, neuer Typisierungszyklus)
- 3x CADC, heiss gestartet (europäischer Realfahrzyklus)
- 3x FTP75, Phase 1+2, heiss gestartet (US-amerikanischer Typisierungszyklus)
- 3x RA, heiss gestartet (ehemaliger Schweizer Typisierungszyklus)

Das Basisprogramm wurde so gewählt, dass die gefahrenen Zyklen ein möglichst breites Spektrum an Leistungsanforderungen abdecken (siehe Tabelle 1). Das stellt sicher, dass die verschiedenen Antriebskomponenten in möglichst vielen Betriebszuständen beobachtet werden konnten, damit das spätere Energiemodell unabhängig der Fahrsituation repräsentativ ist. Die Wiederholungen einzelner Fahrzyklen gewährleisten reproduzierbare Resultate. Während der Tests waren keine Zusatzverbraucher (Heizung, Radio, etc.) eingeschaltet damit die Ergebnisse lediglich den Triebstrangverbrauch repräsentieren. Alle Zyklen wurden mit warmem Motor/Antriebsstrang gestartet um den Kaltstarteinfluss auf die Bestimmung der Triebstrangeffizienz zu reduzieren.

Zusätzlich zum Basisprogramm wurde der Einfluss der Witterung auf die Antriebseffizienz untersucht. Dazu wurden, bei gleichbleibendem Aufbau (sprich dank der Klimakammer), Verbrauchsmessungen bei anderen Temperaturen als Standardbedingungen gefahren.

Die Wahl der Zyklen erklärt sich wie folgt: der «World harmonized Light vehicles Test Cycle» (WLTC) ist unsere Referenz. Der Hauptgrund ist, dass er in der EU den «Neuen Europäischen Fahrzyklus» (NEFZ) als Typisierungszyklus ablöst; sprich der Normverbrauch aller zukünftig in der EU zuzulassenden Neufahrzeuge wird im WLTC gemessen. Langfristig, so die Vision der Initianten, soll er zum weltweiten Standard für alle Typisierungsaufgaben werden. Wenn im Folgenden nicht anders angegeben, beziehen sich Verbrauchsangaben immer auf den WLTC.

Fahrdynamisch (sprich bezogen auf die vorgegebenen Beschleunigungen) weist der WLTC eine ausgewogene Verteilung von städtischen Anteilen und Autobahnfahrt auf. Das gibt ihm eine eher moderate Dynamik. Deswegen fügten wir den bedeutend dynamischeren «Common Artemis Driving Cycle» (CADC) hinzu. Er wurde entwickelt um für die Bedingungen auf europäischen Strassen (speziell in Städten) repräsentativ zu sein. Eine Besonderheit sind seine hohen Geschwindigkeiten auf der Autobahn (vergleiche Abbildung 5). Diese führen zu signifikant höheren Motorleistungen als im WLTC. Dem gegenüber steht der FPT75, der legislative Zyklus der USA. Er ist etwa ähnlich dynamisch wie der WLTC, weist aber generell tiefere Geschwindigkeiten und dementsprechend kleinere Leistungsanforderungen auf. Als letztes Element der Sequenz steht der RA Zyklus. Er beginnt mit einer Hochgeschwindigkeitsphase und wird danach stetig langsamer. Diese Kombination

starker Dynamik und der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Feld stellt die grössten Leistungsanforderungen an den Fahrzeugantriebsstrang.

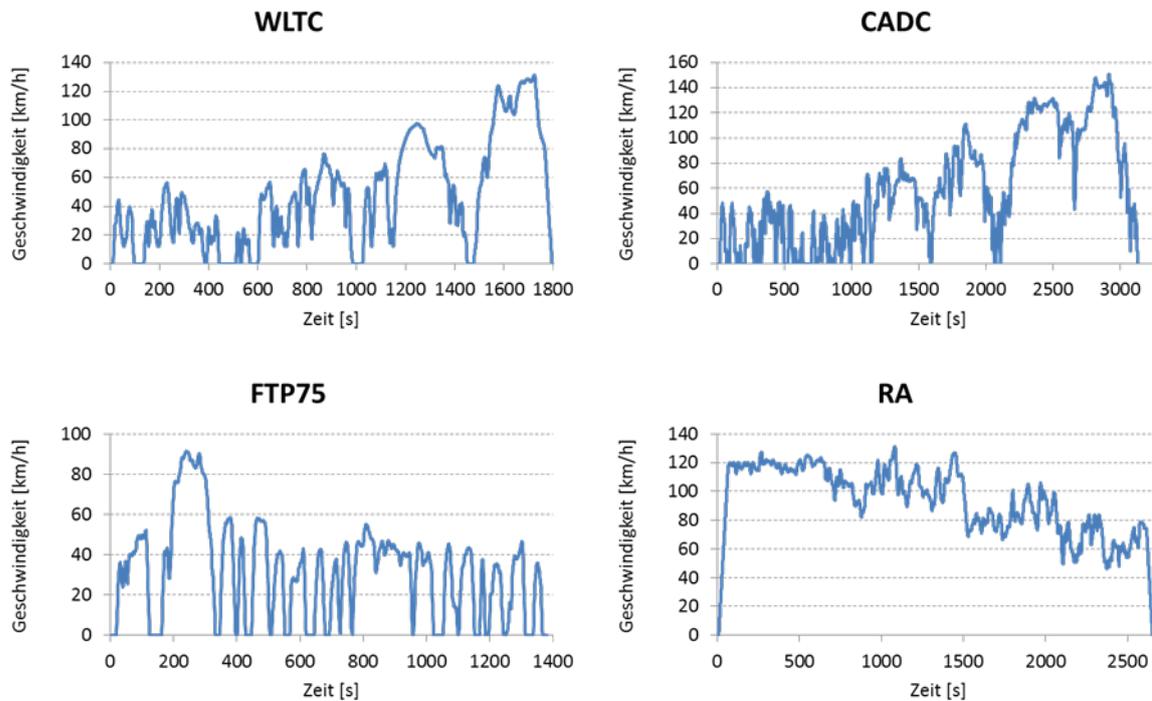


Abbildung 5: Geschwindigkeitsprofile der absolvierten Fahrzyklen WLTC (oben links), CADC (oben rechts), FTP75 (unten links) und RA (unten rechts)

Tabelle 1: Kennwerte der absolvierten Fahrzyklen

Fahrzyklus	\bar{v} [km/h]	v_{\max} [km/h]	t_{tot} [s]	Leistungsanforderung
FTP75	34.1	91.2	1380	niedrig
WLTC	46.5	131.3	1800	mittel
CADC	59.3	149.8	3136	hoch
RA	92.8	132	2673	sehr hoch

2.3 Messtechnik und Durchführung der Feldversuche

2.3.1 Messtechnik

Zu Beginn der Flottenversuche wurden alle fünf Fahrzeuge mit einem Datenerfassungssystem ausgerüstet. Die Geräte zeichneten primär Messsignale fahrzeugeigener Datensysteme auf (nebst vereinzelter, eigens installierter Sensoren — siehe weiter unten). Im Wesentlichen belauschten sie den sogenannten CAN-Bus, ein fahrzeuginternes Kommunikationsnetzwerk das Informationen zwischen angeschlossenen Steuergeräten (z.B. Motorsteuerung, Getriebesteuerung, etc.) verteilt; gewisse, vordefinierte Botschaften wurden auf einem internen Datenspeicher abgelegt. Dieser wurde anschliessend in regelmässigen Abständen per Wechseldatenträger ausgelesen.

Die Signale auf dem CAN-Bus der untersuchten Fahrzeuge waren verschlüsselt. Mit der Unterstützung des Fahrzeugherstellers (Audi für die beiden Audi A3) und durch aufwändige Entschlüsselung der Botschaften (beim VW Jetta, dem VW Golf und beim Hyundai ix35), konnten die wichtigsten Signale zur Analyse des Energiebedarfsverhaltens extrahiert werden. Da nur die beiden Audi-Fahrzeuge die Position als GPS-Koordinaten zur Verfügung gestellt haben, wurden die Datenerfassungssysteme der anderen Fahrzeuge zusätzlich mit einem GPS-Empfänger ausgerüstet um zeitaufgelöste Positionsdaten zu erhalten. Zudem wurde für die genaue zeitliche Zuordnung der Fahrten auch eine Echtzeituhr verbaut.

Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten Signale welche auf den Datenspeichern aufgezeichnet wurden. Die Daten wurden mit einer Frequenz zwischen 0.1 und 10Hz, je nach Signal, aufgezeichnet.

		CNG	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Zeit	[hh:mm:ss]	•	•	•	•	•
Kilometerstand	[km]	•	•	•	•	•
Geschwindigkeit	[km/h]	•	•	•	•	•
Breitengrad GPS	[°]	•	•	•	•	•
Längengrad GPS	[°]	•	•	•	•	•
Geschwindigkeit GPS	[km/h]	•	•	•	•	•
Anzahl Stateliten GPS	[-]	•	•	•	•	•
Kraftstoffverbrauch	[g/s] oder [l/s]	•	•	•	-	-
Strom Elektromotor	[A]	-	•	•	•	•
Spannung Elektromotor	[V]	-	•	•	•	•
Strom Hochvoltbatterie	[A]	-	•	•	•	•
Spannung Hochvoltbatterie	[V]	-	•	•	•	•
Strom Brennstoffzelle	[A]	-	-	-	-	•
Spannung Brennstoffzelle	[V]	-	-	-	-	•
Drehzahl Verbrennungsmotor	[U/min]	•	•	•	-	-
Drehzahl Elektromotor	[U/min]	-	•	•	•	•
Eingelegter Gang	[#]	•	•	•	-	-
Temperatur Kühlmittel	[°C]	•	•	•	•	•
Temperatur Wasserstofftank	[°C]	-	-	-	-	•
Druck Wasserstofftank	[kPA]	-	-	-	-	•
Umgebungstemperatur	[°C]	•	•	•	•	-
Leistung Heizung	[W]	-	•	•	•	-
Leistung Klimakompressor	[W]	•	-	•	•	-

Tabelle 2 zeigt die je nach Antriebsart aufgezeichneten Informationen. Das Ziel war eine möglichst präzise Schätzung des Endenergiebedarfs. Grundlegend dafür war zunächst ein präzises, zeitaufgelöstes Geschwindigkeitssignal. Daraus lässt sich der mechanische Energiebedarf am Rad schätzen und mit den Labormessungen kalibrierten Modellen zu Endenergie übersetzen. Die GPS Signale dienen zur Überprüfung des Geschwindigkeitssignals, zur Bestimmung vertikaler Bewegungen (Höhenmeter) und dem Abgleich mit Kartenmaterial. Als Maß für den effektiven Endenergieverbrauch wurden die Signale abgegriffen, welche das Fahrzeug im Kombiinstrument zur Anzeige des momentanen Verbrauchs benutzt. Bei Elektroantrieben wurde zusätzlich die momentane Leistung der Hochvoltbatterie (Spannung und Strom) aufgezeichnet. Für das Brennstoffzellenfahrzeug stand kein Verbrauchssignal zur Verfügung. Stattdessen wurde der Gesamtverbrauch nach jeder Fahrt anhand des Tankdrucks und der Temperatur bestimmt.

Zusätzlich wurden, je nach Verfügbarkeit, zusätzliche Signale aufgezeichnet um den Einfluss allfälliger, antriebsunabhängiger Nebenaggregate zu bestimmen. Dies umfasste Strommessungen am 12 Volt Bordnetz, die Leistungsaufnahme von elektrischen Heiz- und Kühlgeräten, die Aussen- und Innentemperatur sowie der Schaltzustand einzelner Bedienelemente (wie z.B. der Sitzheizung).

2.3.2 Durchführung

Die Fahrzeuge wurden während einem 2-jährigen Praxiseinsatz als Betriebs- und Car-Sharing-Fahrzeuge an der Empa betrieben um Verbrauchsdaten in realen Fahrsituationen mit unterschiedlichen Fahrern zu sammeln und etwaige Einflussfaktoren durch Zusatzverbraucher im Betrieb aufzuzeichnen. Ziel war es in über die Dauer des Feldversuchs genügend Daten zu sammeln welche für den Winter- und den Sommerbetrieb der Fahrzeuge repräsentativ sind.

Die Fahrzeuge wurden von der Empa-Garage (dem Empa-internen Fahrzeugverleih) verwaltet. Die Fahrzeuge konnten von Empa-Mitarbeitern für Dienstfahrten und auch für private Fahrten, unter der Woche und auch am Wochenende, gemietet werden. Zudem wurden die Fahrzeuge in einem regelmässigen Turnus auch der Empa St.Gallen für die Benutzung zur Verfügung gestellt. Im gleichen Rhythmus wurden auch die Datenspeicher der Fahrzeuge ausgelesen und die Daten für die Verarbeitung vorbereitet.

3 Vorgehen und Methode

3.1 Struktur des Projektes

Aufbauend auf den Verbrauchsdaten der in Kapitel 2 erläuterten Messkampagne, verlief die Modellentwicklung parallel in zwei Phasen: Arbeitspakete 1 und 2 leiteten zunächst die notwendigen Energiemodelle zur Berechnung der Energieintensität eines beliebigen Fahrzeugs her. Das umfasste den Aufbau und die Überprüfung des notwendigen theoretischen Fundaments, sowie die Implementation, Kalibration und Validierung des Modells an Hand der gesammelten Daten. In der zweiten Phase benutzte Arbeitspaket 3 die generierten Modelle um den Energiebedarf und die resultierenden CO₂-Emissionen für die aktuelle und mögliche zukünftige Fahrzeugflotten zu extrapolieren. Die Projektresultate entstammen diesen Szenarioanalysen sowie Erkenntnissen auf den einzelnen Etappen. Im Folgenden diskutieren wir die theoretischen Grundlagen der Energieberechnung sowie deren Kalibration. Anschliessend erklären wir die Aufbereitung der Messresultate und ihre Anwendung zur Modellkalibration und schliesslich die Datenlage für die nationale Extrapolation.

3.2 Berechnung der Energieintensität eines Einzelfahrzeugs

Wir definieren die Energieintensität eines Fahrzeugs während einer Fahrt als die pro Distanz benötigte Endenergiemenge, konkret (in ESMOBIL-RED) Diesel, Benzin, Gas, Wasserstoff oder Elektrizität. Das in ESMOBIL-RED aufgebaute Modell berechnet sie in drei Schritten: zunächst beziffert ein fahrphysikalisches Modell den mechanischen Energiebedarf, den ein Fahrzeug über seine angetriebenen Räder an die Strasse abgeben musste um eine bekannte Fahrmission zu erfüllen. Das Fahrzeug ist dabei über allgemein bekannte technische Kenngrössen definiert, wie seiner Masse, des Rollreibungskoeffizienten seiner Räder und seiner projizierten Frontfläche. Die Fahrmission ist vollständig über ein zeitlich aufgelöstes Geschwindigkeitsprofil definiert. Gemäss der Vorgabe in Kapitel 2.2.2. verwenden wir hierzu unseren Referenzzyklus, den WLTC, falls nicht anders angegeben. Der WLTC wird in der EU den in de in Kapitel 1.2.3 eingeführten NEFZ als Testzyklus zur Bestimmung des Normverbrauchs ablösen.

Schritt zwei berechnet die Antriebseffizienz, sprich das Verhältnis des nun bekannten mechanischen Energiebedarfs zum Endenergiebedarf des Antriebs. Die Grundannahme ist, dass die durchschnittliche Effizienz des Antriebs nicht nur von der Technologie, sondern auch vom durchschnittlichen mechanischen Energiebedarf am Rad abhängt. Damit berücksichtigen wir, dass verschiedene Fahrsituationen, z.B. je nachdem ob sie primär auf der Autobahn oder im dichten Stadtverkehr stattfinden, einen sehr starken Effekt auf den Antrieb haben können (siehe dazu Tabelle 1 und die Diskussion der untersuchten Fahrprofile der Labormessungen in Kapitel 2.2.2).

Wenn geeignete Messdaten aus Testfahrten vorliegen können diese an Stelle des WLTC in Schritt 1 benutzt werden. Andernfalls korrigiert Schritt 3 für die zu erwartende Abweichung des Realverbrauchs von der Norm. Der Faktor der Abweichung wurde dabei am Feldversuch kalibriert. Berücksichtigt wurden (1) von der Norm abweichende Durchschnittsgeschwindigkeiten, (2) das Beschleunigungsverhalten des Fahrers, (3) die Topographie des Strassennetzes (das Streckenprofil) und (4) mögliche Zusatzverbraucher wie die Kabinenheizung.

3.2.1 Mechanischer Energiebedarf am Rad

Um ein gegebenes Fahrzeug entlang eines bekannten Geschwindigkeitssignals $v(t)$ zu bewegen, muss der Antrieb in jedem Zeitpunkt t die sich der Bewegung widersetzenen Kräfte kompensieren.

Die dafür notwendige Kraft F_{prop} (aus dem Englischen «propulsion» für Vortrieb), auch Radlast genannt, ergibt sich aus der Kraftgleichung entlang der Längsachse:

$$F_{prop}(v(t), \alpha(t)) = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot v^2(t) + m \cdot g \cdot c_r \cdot \cos(\alpha(t)) + m \cdot \frac{d}{dt}v(t) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha(t))$$

wobei c_D der Luftwiderstandsbeiwert, A_f die projizierte, frontale Fahrzeugfläche, ρ die lokale Luftdichte, $v(t)$ die momentane Geschwindigkeit, $\alpha(t)$ die Steigung der Strasse an der aktuellen Position, m die effektive Fahrzeugmasse, c_r der Rollreibungskoeffizient der Reifen und g die Erdbeschleunigung ist. Wir definieren die mittlere positive Radleistung als die durchschnittlich über die Fahrtdauer $t = 0 \dots t_f$ erbrachte positive Arbeit am Rad:

$$\bar{P}_w^+ = \frac{\int_0^{t_f} F_{prop}(t) \cdot \Phi(F_{prop}(t)) \cdot v(t) dt}{\int_0^{t_f} dt}$$

wobei $\Phi(x)$ die Heaviside-Funktion ist ($\Phi(x) = 1$ wenn $x > 0$ und sonst $\Phi(x) = 0$). Der Heaviside-Term blendet Zeitpunkte negativer Radlast ($F_{prop} < 0$) aus. Das ist dann der Fall, wenn das Fahrzeug aktiv bremsst, sprich wenn der Fahrer das Bremspedal betätigt. Die negative Radlast heisst, dass mechanische Energie vom Rad an den Antrieb zurückfliesst. In konventionellen Antrieben setzt Reibung zwischen Bremsklotz und –scheibe die zurückfliessende mechanische Energie in Wärme um, welche dann an die Atmosphäre abgegeben wird. Am Ende der Fahrt (Zeitpunkt t_f) hat der Antrieb also die mechanische Energiemenge $\bar{P}_w^+ \cdot t_f$ ans Rad abgegeben. Gleichzeitig haben die Bremsen die Energiemenge $\bar{P}_w^- \cdot t_f$ in Wärme umgewandelt, wobei die mittlere negative Radleistung \bar{P}_w^- analog zu \bar{P}_w^+ definiert ist, aber der Heaviside-Term filtert nun Zeitpunkte positiver Radlast.

Elektrisch angetriebene, rekuperationsfähige Fahrzeuge können einen Teil von $\bar{P}_w^- \cdot t_f$ in Elektrizität umwandeln, speichern und später zur Erbringung von $\bar{P}_w^+ \cdot t_f$ nutzen.

3.2.2 Effizienz des Antriebs (Willans-Ansatz)

Die Rolle des Antriebs ist es, die zum Vortrieb eines Fahrzeugs notwendige positive mechanische Leistung nach Bedarf aufzubringen (und ggf. zurückfliessende Bremsleistung aufzunehmen). Dazu wandelt er progressiv einen an Bord gespeicherten Endenergieträger wie Diesel, Benzin, Elektrizität, Wasserstoff oder Gas zu mechanischer Energie. Die Physik der Wandler ist trügerisch komplex: in der Regel sind verschiedene Verlustquellen gleichzeitig an verschiedenen Enden des Prozesses aktiv, und das je nach Betriebspunkt unterschiedlich stark. Je nach Einsatz kann die durchschnittliche Effizienz der gleichen Komponente deshalb stark streuen. Für PW-Antriebe, mit ihren hochdynamischen Betriebsmustern ist das unbedingt zu berücksichtigen; die zu Grunde liegende Phänomenologie ist dabei aber in den meisten Fällen viel zu komplex um sie aufzulösen.

In ESMOBIL-RED fanden wir im sogenannten Willans-Ansatz einen einfachen aber mächtigen Kompromiss. Der Grundgedanke ist, dass die Effizienz eines Motors generell von der Drehzahl abhängt, ihr Einfluss aber sekundär ist gegenüber dem Drehmoment. Der Willans-Ansatz verallgemeinert diese Intuition mathematisch in dem er einen linearen Zusammenhang zwischen der Ein- und Ausgangsleistung, also dem Produkt aus Drehmoment und Drehzahl des Wandlers postuliert. In der Praxis hat sich das für Verbrennungs- und Elektromotoren als eine bemerkenswert präzise Approximation bewährt [13]. Formell gilt:

$$P_{in} = P_{out} \cdot A + B$$

wo P_{in} die Eingangsleistung entweder als Treibstoffenergiefluss oder elektrische Leistung ist und P_{out} die generell mechanische Ausgangsleistung. Getreu der semi-empirischen Natur des Ansatzes lassen sich e und P_0 nicht direkt an physikalischen Eigenschaften einer Komponente festmachen.

Mathematisch drückt e (für $0 < e < 1$) aus, dass P_{in} immer grösser sein muss als P_{out} und ist damit ein

Mass für thermodynamische Effizienz. P_0 beschreibt inwiefern die thermodynamische Effizienz als Funktion der Last variiert:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(1 - \frac{P_0}{P_{in}}\right) \cdot e = \frac{P_{out}}{P_{out} \frac{1}{e} + P_0} = \left(\frac{1}{e} + \frac{P_0}{P_{out}}\right)^{-1}$$

Im Spezialfall $P_0 = 0$ reduziert sich das Model auf $\eta = e$, sprich die Effizienz des Umwandlungsprozesses ist unabhängig vom Betriebspunkt. Ansonsten steigt ($P_0 > 0$) respektive sinkt ($P_0 < 0$) die Effizienz hyperbolisch mit P_{out} . Direkte Rückschlüsse auf die Physik einzelner Komponenten lässt dies nicht zu; allerdings lassen sich ähnliche Komponente vergleichen. Umgekehrt ist der einzige Weg e und P_0 zu bestimmen eine Regressionsanalyse auf Komponentendaten.

In einer wissenschaftlichen Publikation hat die Empa gezeigt³, dass sich der klassischerweise auf Verbrennungsmotoren bezogene Willans-Ansatz auf das ganze Fahrzeug ausdehnen lässt. Es zeigt sich, dass alle Komponenten, von Elektromotoren bis zu Handschaltgetrieben, dem Willans-Ansatz folgen — wenigstens innerhalb des im normalen Betrieb zu erwartenden Leistungsbereichs. An statt die einzelnen Wandlungsprozesse entlang des Antriebs einzeln aufzulösen, definierten wir eine Willans-Ausgleichsgerade über den gesamten Antrieb. P_{in} wird damit zum mittleren Leistungsfluss chemischer respektive elektrischer Energie aus dem Tank respektive der Batterie; P_{out} ist die mittlere positive Radleistung \bar{P}_w^+ . Für verbrennungsbasierte Antriebe, inklusiv Hybridfahrzeugen gilt:

$$\bar{P}_{chem,out} = (A \cdot \bar{P}_w^+ + B)$$

wobei wir $A = e^{-1}$ und $P_0 = B$ für eine in der Folge einfachere Notation setzen. Für Batterie-elektrisch angetriebene Fahrzeuge muss der rekuperierte Anteil von \bar{P}_w^- über einen zusätzlichen Willans-Ausdruck berücksichtigt werden:

$$\bar{P}_{batt,out} = (A \cdot \bar{P}_w^+ + B) + \left(\frac{1}{A} \cdot \bar{P}_w^- + B\right)$$

3.2.3 Korrektur für Realbedingungen

Die Berechnung der mechanischen Energieintensität (siehe Kapitel 3.2.1 und die darauf gestützte Endenergieberechnung aus Kapitel 3.2.2) kann für jede beliebige Fahrsituation durchgeführt werden, vorausgesetzt es liegt mindestens das Geschwindigkeitssignal $v(t)$ vor. Ist das nicht der Fall wird \bar{P}_w^+ für den Normzyklus WLTC berechnet. Wie in Kapitel 1.2.3 diskutiert, kann der so berechnete Normwert im Einzelnen signifikant vom Realwert abweichen, auf Grund unzähliger Randbedingungen die auf der Strasse von den Normbedingungen abweichen können, wenn auch nur für kurze Zeit.

Wir verwendeten die im Feldversuch aufgezeichneten Daten um die Magnitude und Frequenz auftretender Verbrauchsspitzen zu beziffern. Die Datenlage umfasst nicht nur ein Geschwindigkeitssignal $v(t)$, sondern auch die Neigung $\alpha(t)$, die Umgebungstemperatur und die Leistungsflüsse zu allen grösseren Nebenverbrauchern. So konnten wir die effektiv auf der Strasse gemessene Energieintensität mit der gemäss WLTC zu erwartenden gegenüberstellen und Muster der Abweichung vom Real- zum Normwert innerhalb der verfügbaren Datenbasis erkennen. Diese liessen sich umkehren und in einen Korrekturfaktor übersetzen.

Grundannahme ist, dass die in Kapitel 3.2.2 erklärten Willans-Geraden die Antriebseffizienz unter allen Bedingungen, also auch im Feld, stets korrekt vorhersagen. Theoretisch haben z.B. tiefe Umgebungstemperatur durchaus einen Effekt auf die Gesamteffizienz wegen dem Kaltstartverhalten von Verbrennungsmotoren und dem potentiell erhöhten inneren Widerstand von Batterien. Im Feldversuch konnten aber keine solche Effekte beobachtet werden, was wir auf aktives

³ Aktuell unter internem Review

Thermomanagement zurückführen. Deswegen nehmen wir an, dass die alleinige Ursache eines Vorhersagefehlers die falsche Einschätzung der Nachfrage \bar{P}_w^+ an den Antrieb sei.

Unsere Korrekturprozedur erfasst 4 Dimensionen in denen eine reale Fahrt vom WLTC abweichen kann: der Korrekturterm r_I^+ beschreibt den Einfluss des Geschwindigkeitsprofils und des Beschleunigungsverhaltens auf die Radlast; der Korrekturterm r_{II}^+ beschreibt den Einfluss der Strassentopographie der gewählten Route; \bar{P}_{aux} erfasst allfällige Nebenaggregate:

$$\bar{P}^+ = \bar{P}_{WLTC}^+ \cdot r_I^+(\bar{v}, \bar{a}^+) \cdot r_{II}^+(\Delta z, \bar{\gamma}) + \bar{P}_{aux}(T_{amb})$$

Der WLTC wurde entwickelt um die mittlere Fahrt über eine breite Datenbank gemessener Fahrten zu approximieren. Selbst innerhalb der ursprünglichen Datenbasis können einzelne Fahrten sehr stark vom Mittel abweichen, z.B. wegen abweichenden Anteilen an Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt. Das Verhältnis der effektiven Durchschnittsgeschwindigkeit zum WLTC hat sich hierfür als effektiver Indikator erwiesen ($r_{velocity}$).

Selbst wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit exakt identisch zum WLTC ist kann der Energiebedarf immer noch durch stärkeres oder schwächeres Beschleunigen beeinflusst werden. Deshalb führten wir als zusätzlichen Indikator die mittlere positive Beschleunigung \bar{a}^+ ein:

$$\bar{a}^+ = \frac{\int_0^{t_f} \frac{d}{dt} v(t) \cdot \Phi\left(\frac{d}{dt} v(t)\right) dt}{\int_0^{t_f} \Phi\left(\frac{d}{dt} v(t)\right) dt}$$

Es zeigte sich, dass \bar{a}^+ stark zwischen Fahrten streut. Gleichzeitig ist \bar{a}^+ stark abhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit. Physikalisch steigt die Dissipationsleistung der Widerstandskräfte in der dritten Ordnung mit der Geschwindigkeit (siehe Kraftgleichung) und verlangt damit immer grössere Anteile der nominellen Antriebsleistung P_{max} . Das heisst die zur Beschleunigung verfügbare Leistungsreserve nimmt ab. Das zeigt sich auch in der folgenden Schätzung der maximalen Beschleunigung eines PW, welche unter Vernachlässigung der aerodynamischen und Rollreibungswiderstände aus der Kraftgleichung folgt [14]:

$$a_{max} = \frac{P_{max}}{m \cdot v}$$

Die Vermutung light also nahe, dass es bei hohen Geschwindigkeiten zusehends bequemer wird zu Segeln (passives Entschleunigen durch «Gas-wegnehmen» anstatt Bremsen). Als Indikator benutzen wir deshalb des Verhältnis von \bar{a}^+ zur durchschnittlichen positiven Beschleunigung des WLTC, skaliert auf a_{max} ($r_{dynamic}$).

Daraus ergibt sich der «positive power correction factor» r_I^+ [15]:

$$r_I^+(r_{velocity}, r_{dynamic}) = (b_{I,0}^+ + b_{I,1}^+ \cdot r_{dynamic}) \cdot r_{velocity} + (c_{I,0}^+ + c_{I,1}^+ \cdot r_{dynamic}) \cdot r_{velocity}^2$$

Wenn keine besseren Informationen zur Verfügung stehen, liefert folgende Korrelation den geschwindigkeitsabhängigen Mittelwert für $r_{dynamic}$ aus dem Feldversuch [15]:

$$r_{dynamic} = \frac{P}{m} \cdot (1.5646 - 0.5334 \cdot r_{velocity} + 0.0643 \cdot r_{velocity}^2)$$

Neben dem Verhalten des Fahrers spielt auch seine Streckenwahl eine Rolle, konkret das Höhenprofil der Strecke. Im WLTC wird nämlich ein vollkommen ebener Streckenverlauf angenommen. Ein unterstützendes Argument ist, dass der Tag der meisten PW am Wohnsitz ihres Halters beginnt und endet [16]. Im Tagesmittel sollte potentielle Energie also keine Rolle spielen. Auf Einzelfahrten gilt das aber nicht. Ein Höhenunterschied zwischen dem Ausgangs- und Zielpunkt bedeutet, dass der Antrieb den mindestens Potentialenergieunterschied aufbringen (resp. –nehmen) muss. Wenn das vertikale

Streckenprofil nicht monoton ist, kann der Zusatzbedarf sogar noch höher liegen; gleichzeitig beeinflussen Steigungen das Brems- und Rekuperationsverhalten.

Als Indikatoren benutzen wir den Höhenunterschied zwischen Ausgangs- und Zielort, ausgedrückt als durchschnittliche Steigung α (wobei $\dot{z}(t)$ die vertikale Geschwindigkeit des Fahrzeugs darstellt):

$$\sin(\alpha) = \frac{\int \dot{z}(t) dt}{\int v(t) dt}$$

sowie $\bar{\gamma}^+$, die durchschnittliche positive Steigung des Streckenverlaufs, als Verhältnis der vertikalen Steigung zur horizontalen Distanz auf aufsteigenden Streckenabschnitten:

$$\sin(\bar{\gamma}^+) = \frac{\int \Phi(\dot{z}(t)) \dot{z}(t) dt}{\int \Phi(\dot{z}(t)) v(t) dt}$$

Der Strassentopologie-Korrekturterm r_{II}^+ ergibt sich dann als [15]:

$$r_{II}^+(\alpha, \gamma^+) = a_{II,0}^+ + a_{II,1}^+ \cdot \bar{\gamma}^+ + b_{II}^+ \cdot \alpha + c_{II}^+ \cdot \alpha^2$$

Als letzten Effekt berücksichtigt unser Modell den Energiebedarf der sogenannten Nebenaggregate. Diese Geräte konsumieren zwar (in der Regel elektrische) Energie, tragen aber nicht mechanisch zum Vortrieb des Fahrzeugs bei. Als Energiekonsumenten unterscheiden sich diese Geräte über ihre nominelle Leistung und ihr Energiebezugsprofil. Insbesondere Steuergeräte ziehen eine konstante Last sobald die Zündung aktiv ist. Andere Systeme, wie z.B. die elektrische Servolenkung oder die Aussenbeleuchtung, werden auf Grund mehr oder weniger unvorhersehbarer externer Ereignisse aktiv. Komfortfunktionen schlussendlich sind a priori nutzergesteuert. Die leistungsstärksten Konsumenten sind die Heiz- und Kühlsysteme der Kabine. Wir postulierten deswegen, dass die Nebenaggregatslast eine konstante Grundlast und eine linear von der Umgebungstemperatur abhängt Komfortlast aufweist.

Nachfolgend die ermittelten Regressionsfaktoren [15]:

$b_{I,0}^+$	$b_{I,1}^+$	$c_{I,0}^+$	$c_{I,1}^+$	$a_{II,0}^+$	$a_{II,1}^+$	b_{II}^+	c_{II}^+
-0.24715	0.01303	0.38028	0.00245	0.97202	4.29226	18.35444	127.6415

3.3 Szenarioanalyse: CO2-optimale Flotte

Die verschiedenen, in ESMOBIL-RED untersuchten Antriebsvarianten unterscheiden sich unter anderem in ihrer effektiven Reichweite und den direkten CO2-Emissionen. Je nach individueller Fahrzeugpräferenz und täglicher Fahrleistung sind gewisse Antriebsformen für gewisse Personen (oder besser Fahrprofile) besser geeignet als andere. Im Folgenden interessieren wir uns dabei für CO2 Emissionen und die Frage, ob es für ein gegebenes Fahrzeug und sein zugehöriges Mobilitätsprofil eine optimale Antriebswahl gibt, und was das für die Flottenzusammensetzung heisst.

Dafür benötigen wir eine disaggregierte Beschreibung der gesamten Schweizer Flotte und ihren Bewegungen, sprich einzelne Fahrzeuge und individuelle Fahrten. Die Basis dafür waren die Rohdaten des Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) des BFS. Der MZMV ist eine repräsentative Umfrage die das BFS alle 5 Jahre durchführt wird. Zuletzt in 2015 wurden fast 60'000 Einwohner der Schweiz eingehend zu ihrem Mobilitätsverhalten befragt, inklusive aller Wege die sie an einem bestimmten Stichtag geleistet haben. Daraus rekonstruierten wir tägliche Fahrzeugbewegungen, als Summe der Etappen die eine befragte Person als Fahrerin oder Beifahrerin in einem haushalteigenen Fahrzeug zurücklegte. Der MZMV liefert zu diesem Fahrzeug auch genaue technische Spezifikation des Fahrzeugs (über seine Typennummer).

Mit diesen Informationen konnte unser Energiemodell (siehe Kapitel 3.2) für jedes Fahrzeug die resultierenden täglichen CO₂-Emissionen berechnen. Die optimale Antriebswahl übersetzt sich damit zur Frage, ob ein gegebenes Fahrzeug / Fahrprofilpaar mit einem alternativen Antrieb weniger CO₂ emittiert. Dabei reicht es nicht einfach die Willans-Koeffizienten für einen anderen Antrieb ins Energiemodell einzusetzen. Der Technologiewechsel wirkt sich auf gewisse Eigenschaften des Fahrzeugs aus, insbesondere sein Leergewicht. Das wiederum hat einen Impact auf den mechanischen Energiebedarf (siehe Kapitel 3.2.1) und damit die Gesamteffizienz.

Um diesen Effekt zu bestimmen, legten wir heuristisch die Komponentengrößen für ein dem ursprünglichen Fahrzeug äquivalenten Antrieb fest. Die Grundannahme ist, dass die effektiv am Rad verfügbare nominale Leistung (z.B. die Motorleistung bei konventionellen Antrieben) sich nicht verändert. Als Beispiel wird bei einem Elektroauto der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor gleicher Leistung ersetzt. Das Gewicht des Verbrenners und der Gangschaltung wird vom Leergewicht abgezogen; das (allgemein geringere) Gewicht des Elektromotors und seines Umrichters kommt dazu. Anschliessend nehmen wir an, Batteriezellen werden stehend im Unterboden des Fahrzeugs integriert (wie das z.B. Tesla und BMW machen). Wegen dem Platzbedarf der Radaufhängung steht damit maximal die Breite des Fahrzeugs über die Fläche zwischen beiden Radachsen für die Batterieinstallation zur Verfügung. Wir nehmen an, davon sind 80% nutzbar, wovon 70% effektiv aktives Material sind — der Rest sind strukturelle und funktionelle Elemente wie Zellmantel, Stromleiter, Trägerplatten sowie Abstandhalter und Luft, um belasteten Zellen Raum zur thermischen Ausdehnung zu geben. Daraus ergeben sich Batteriekapazität und –gewicht und damit das Leergewicht des äquivalenten Elektrofahrzeugs. Das Energiemodell berechnet daraus den effektiven Energiebedarf über das zugehörige Fahrprofil. Übersteigt dieser die Batteriekapazität scheidet der Elektroantrieb für das Fahrzeug aus.

Als Bewertungsgrundlage verwendeten wir Well-To-Wheel CO₂ Emissionen. Diese wurden berechneten über Emissionsfaktoren aus dem Energiebedarf für jedes Fahrzeug und jede Antriebsvariante berechnet, sofern die Variante über genügend Reichweite für das zugehörige Fahrprofil verfügte. Schliesslich bestimmten wir die optimale Flottenzusammensetzung in dem wir für jedes Fahrzeug nur die verbleibende Variante mit den geringsten Gesamtemissionen zurückhielten.

Für fossile Treibstoffe sind die Emissionen während der Produktion in erster Approximation konstant, da ähnliche Rohölzusammensetzungen ähnlichen Prozessen unterzogen werden. Die CO₂-Intensität der bezogenen Elektrizität kann sich jedoch mit der Stromversorgungssituation der Schweiz verändern. Deswegen wiederholten wir die Analyse über das gesamte Spektrum möglicher Stromquellen, von Wind- bis Ölkraft. Wir betrachten den Parameter als a posteriori Mass der effektiv bezogenen Elektrizität, sprich ein Mittelwert über ein Jahr. Allfällige marginale Effekte, wie stündliche und saisonale Fluktuationen sind darin bereits enthalten (resp. sind als Erhöhung gegenüber einem Referenzwert wie einem Konsumentenmix verstanden werden).

3.4 Szenarioanalyse: Zukünftige Flotten

Den Resultaten der CO₂-optimalen Flottenzusammensetzung vorausgreifend, ist der für die Schweiz vorzuziehende Endzustand weitgehend elektrisch (unter Annahme einer sich nicht signifikant verschlechternden CO₂-Intensität des Konsumentenmixes, sowie unter Vernachlässigung der in der Fahrzeug- und insbesondere Batterieproduktion investierten grauen Energie). Mit diesem Wissen verglichen wir mögliche Transformationspfade mit den CO₂-Budgets gemäss IPCC. Im Fokus stand dabei der Gegensatz, dass für die CO₂-Grenzwerte auf der Neuwagenflotte aktuell Normwerte gelten, aber für die effektive Dekarbonisierung der Realverbrauch relevant ist.

3.4.1 Kohortenmodell der Schweizer PW-Flotte

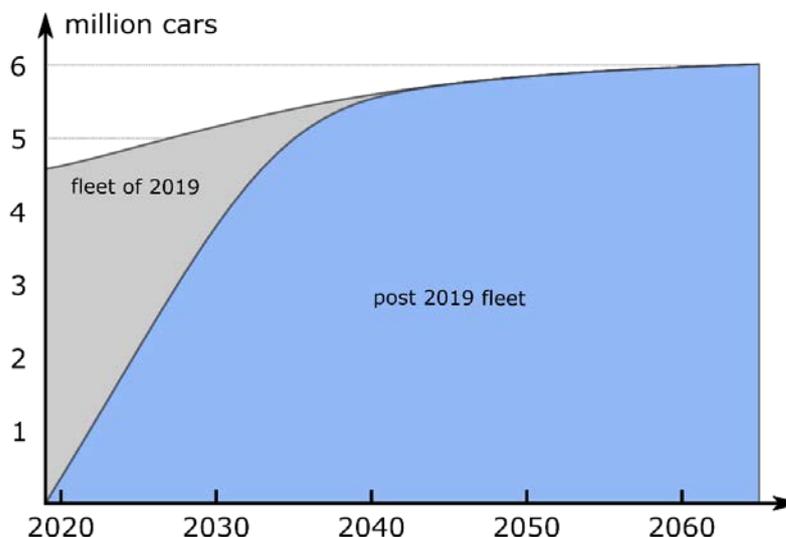


Abbildung 6: Bestand der PKW-Flotte der Schweiz, gemäss unserem Kohortenmodell. Der blau eingefärbte Bereich ist die Menge der ab 2019 verkauften Fahrzeuge.

Der Kernunterschied zur vorhergehenden Sektion ist die Berücksichtigung der Transformationsgeschwindigkeit. Dazu verwendeten wir ein klassisches Kohortenmodell: es beschreibt die Flotte als eine Gruppe Fahrzeuge, die sich nur in ihrem Alter unterscheiden. Jedes Jahr kommt eine vordefinierte Anzahl Neufahrzeuge dazu — in der Schweiz fluktuiert die Anzahl der Neuzulassungen pro Jahr seit drei Jahrzehnten um 300'000 Fahrzeuge pro Jahr⁴. Gleichzeitig werden bestehende Fahrzeuge nach dem Zufallsprinzip ausgemustert, wobei die Überlebenswahrscheinlichkeit alleine vom Fahrzeugalter abhängt (und allgemein mit dem Alter abnimmt). Das Resultat ist die in Abbildung 6 dargestellte Aufteilung der Schweizer Flotte in vor und nach 2019 verkaufte Fahrzeuge: die Bedeutung ist, dass neue Technologien nur den blau hinterlegten Bereich abdecken können. Gleichzeitig bleiben verkaufte Fahrzeuge teilweise für Jahrzehnte in der Flotte.

3.4.2 Jahresfahrleistung Schweizer PW

Für jedes Fahrzeug wurde die Jahresfahrleistung und daraus der jährliche Energiebedarf (über das Realverbrauchsmodell) bestimmt. Die Jahresfahrleistung basierte auf einer Analyse von Wartungsdaten eines repräsentativen Fahrzeugimporteurs [17]. Die Daten zeigten einen direkten Zusammenhang der Jahresfahrleistung und dem Fahrzeugalter.

3.4.3 Flottenszenarien

Die EU definiert die Absenkung der CO₂-Grenzwerte bis 2025 und 2030 relativ zu 2020. Gesamthaft muss die Neuwagenflotte den EU Grenzwerten folgen. Zum Zeitpunkt wo dieser Bericht entstand war der Wert in 2020 noch nicht verbindlich definiert. Aktuell sind 95 g/km vorgesehen, gemessen im NEDC. Da die Testprozedur in 2020 vom NEDC auf den WLTP wechselt, ist zurzeit unklar welcher Richtwert zu verwenden ist. Wir betrachten deshalb drei Szenarien (siehe Tabelle 2), gemäss Abbildung 7: Szenario T3 geht von den aktuellen 95 g/km in 2020 aus; Szenario T1 und T2 unterstellen eine Erhöhung des Richtwertes um 20 Prozent (wegen dem Wechsel auf den WLTP).

⁴ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassen-neu-inverkehrsetzungen.html>

Szenario T1 unterscheidet sich von Szenario T2 und T3 im definierten relativen Absenkpfad für das Jahr 2030. Die Grenzwerte werden nach 2030 linear extrapoliert, ausgehend von der Absenkrate zwischen 2025 und 2030. Alternative zu den drei Szenarien wird eine vierte Grenzwertlinie C eingeführt, welche einen radikal beschleunigten Absenkpfad an der bis 2030 zu Null geht.

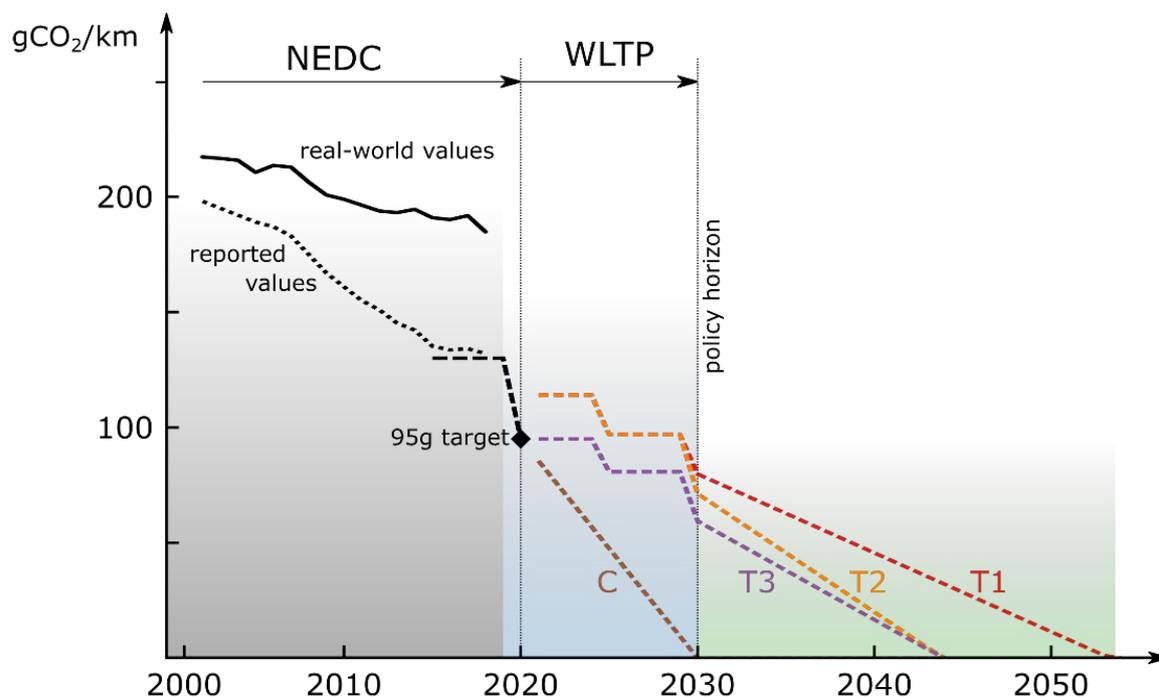


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Grenzwerte der Neuwagenflotte. Szenario T1, T2 und T3 unterscheiden sich in der Festlegung des Startwerts und den relativen Absenkpfeilen. Szenario C beschreibt einen radikalen Absenkpfad zu Null bis 2030.

Der Technologiemitx der Neuwagenflotte wird nur zum Teil aufgelöst: als limitierenden Faktor postulieren wir den Verkauf von Elektrofahrzeugen. Deswegen definieren wir den Anteil BEV (reine batterieelektrische Fahrzeuge, ohne PHEV) in jedem Modelljahr gemäss einem externen Szenario. Die BEV werden im Mittel der Neuzulassungen mit 0 g/km bilanziert. Wir nehmen dann an, dass die spezifischen Emissionen der verbleibenden, nicht-vollelektrischen Neufahrzeuge gerade so hoch sind, dass das im aktuelle Jahr gültige Emissionslimit der gesamten Neuwagenflotte exakt erreicht wird. Dabei legen wir nicht fest aus welchen Technologien sich diese „übrige“ Flotte zusammensetzt. Alle möglichen Marktzusammensetzungen welche die Emissionsziele exakt erfüllen führen nominell zu identischen CO₂ Emissionen, sofern man von einer technologieunabhängiger Fahrzeugnutzung (Fahrleistung) ausgeht.

3.4.4 Bewertung der Nachhaltigkeit

Wir bewerten die Dekarbonisierungswirkung der angenommenen politischen Vorgaben unserer Szenarien über das kumulierte CO₂ aus der Personenwagenflotte bis 2065, welches sich aus den verschiedenen Zusammensetzungen der Flotte ergibt. Dieser Wert muss kompatibel sein mit einer nachhaltigen Klimaentwicklung. Dazu verwendeten wir das CO₂ Budget für die Erreichung des 1.5°C Ziels gemäss dem IPCC special report. Dabei nahmen wir an, der globale Wert werde proportional zur Bevölkerung und anschliessend nach den heutigen CO₂ Emissionen der Schweizer Sektoren aufgeteilt. Das ergibt einen Wert von rund 110 Megatonnen CO₂ für die Personenwagen in der Schweiz.

Tabelle 1: Szenarien der CO₂-Grenzwerte der Neuwagenflotte

	Szenario	Startwert	Reduktion	Reduktion	Zeitpunkt
			2025	2030	Nullemissionen
T1	alte Ziele, konservativ	1.2 * 95	15%	30%	2054
T2	neue Ziele, konservativ	1.2 * 95	15%	37.5%	2044
T3	neue Ziele, ambitiös	95	15%	37.5%	2044
C	1.5 °C Budget	95	lineare Reduktion zur Erfüllung des Budgets		

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Auswertung der Labormesskampagne

Im folgenden diskutieren wir die Resultate der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Messkampagne im Labor, durchgeführt am in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Aufbau.

4.1.1 Verbrauchswerte

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Verbrauchswerte der 5 Fahrzeuge der ESMOBIL-RED Testflotte (siehe Abbildung 3) in den warmgestarteten Zyklen des in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Messprogramms, sowie die Herstellerangabe im NEFZ. Bei allen Antrieben sticht der starke Einfluss des Testzyklus ins Auge; ein von der Referenz abweichendes Fahrverhalten führt also ganz eindeutig zu einem abweichenden Verbrauchswert. Der CADC führt generell zum Höchstwert, ausser beim PHEV im Elektrobetrieb; die NEFZ-Herstellerangabe liegt generell deutlich tiefer und bei rein-elektrischen Antrieben am tiefsten. Die Erklärung liegt in den in Kapitel 2.2.2 diskutierten Eigenschaften der Testzyklen und spiegelt sich in den stark unterschiedlichen mittleren Radlasten (siehe Kapitel 3.2.1) in Abbildung 9 wider.

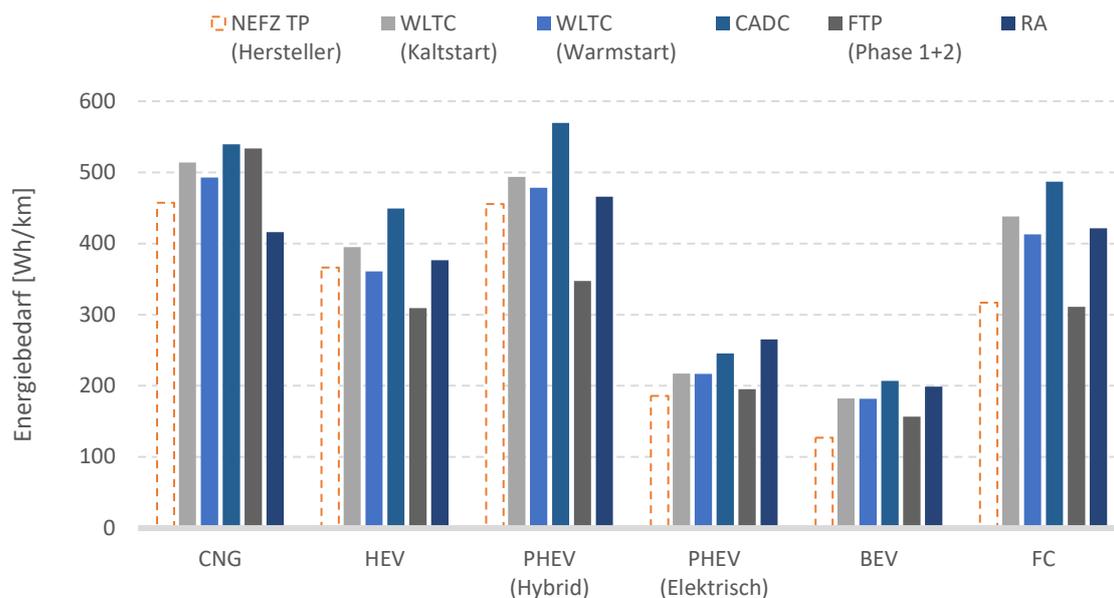


Abbildung 8: Gemessener, spezifischer Energiebedarf in Gas, Benzin oder Elektrizität pro Kilometer der 5 Fahrzeuge der ESMOBIL-RED Testflotte (siehe Abbildung 3) sowie NEFZ Angaben gemäss Hersteller («NEFZ TP (Hersteller)»); beim Plug-in Hybrid (PHEV) ist der Verbrauch im rein-elektrischen und verbrennungsmotorischen Modus separat ausgegeben.

Ein direkter Vergleich der Verbrauchswerte verschiedener Antriebe hat nur wenig Aussagekraft: zum einen verstehen sich die Werte in Einheiten der zugehörigen Endenergieformen, sprich Erdgas, Benzin, Elektrizität und Wasserstoff; unterschiedliche vorgelagerte Prozesse führen zu unterschiedlichen spezifischen Kosten, Umweltimpact und Primärenergiebedarf. Zum anderen unterscheiden sich die Fahrzeuge in Gewicht und Aerodynamik, was die Abweichung der mittleren Radlast verschiedener Fahrzeuge in gleichen Zyklen in Abbildung 9 beweist. Hier zeigt sich vor allem der Einfluss des Gewichts; so hat das Brennstoffzellenfahrzeug in allen Zyklen den höchsten mechanischen Energiebedarf und das CNG Fahrzeug den geringsten.

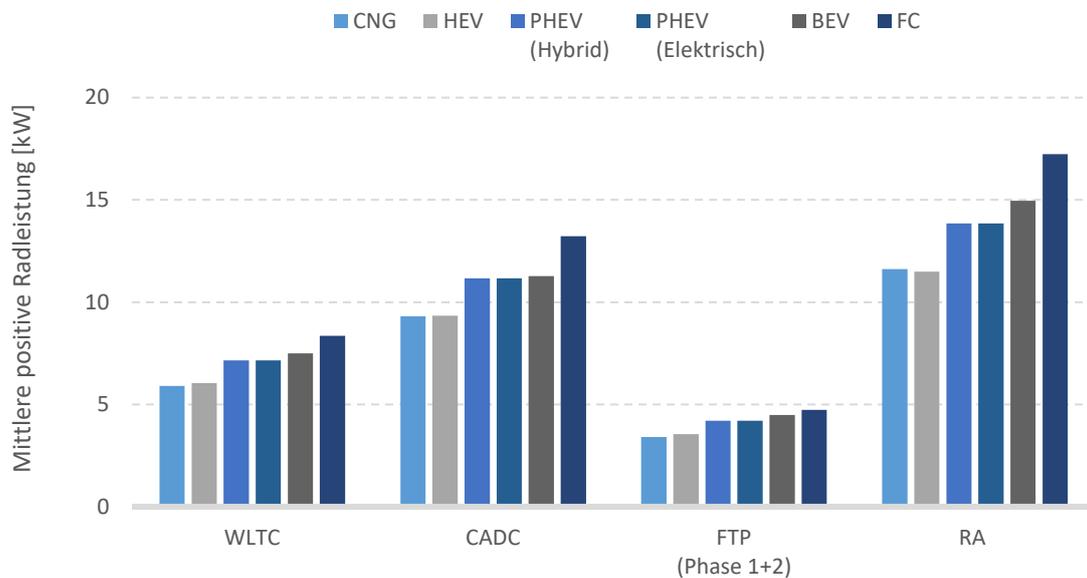


Abbildung 9: Mittlere positive Leistung am Rad, welche zur Absolvierung des Zyklus nötig ist. Hier zeigen sich hauptsächlich die Gewichtsunterschiede der Fahrzeuge. Der Verbrauch des FC Fahrzeugs ist neben dem höheren Gewicht auch durch die unterschiedliche Karosserieform beeinflusst.

Allgemein zeichnet sich eine eindeutige Tendenz zwischen der Radlast eines Fahrzeugs in verschiedenen Zyklen und dem zugehörigen Verbrauchswert ab. Die Prämisse unseres Modellierungsansatzes ist, dass dieser Trend kein Zufall ist sondern sich durch eine affine Funktion, die Willans-Approximation, vorhersagen lässt. Die Untersuchung dieser Hypothese und die anschließende Herleitung der Willans-Parameter sind in Kapitel 4.3 erläutert.

4.1.2 Kaltstartverhalten und Verbrauch relativ zum WLTC

Sektion 4.1.1 stellte die starke Abhängigkeit des Verbrauchswertes aller untersuchten Antriebe vom Testzyklus fest. Um ein erstes Gefühl für mögliche Abweichungen des Verbrauchswertes unter Realbedingungen zu bekommen, untersucht diese Sektion die Abweichung des Verbrauchs relativ zu unserer Referenz, dem WLTC (der auch die zukünftige gesetzliche Referenz sein wird). Abbildung 10 illustriert den Verbrauch der ESMOBIL-RED Testflotte (siehe Kapitel 2.1) in verschiedenen Zyklen, relativ zu ihrem Wert im WLTC, nach einem Warmstart.

Vergleicht man den Energiebedarf der Fahrzeuge zwischen dem kalt und dem warm gestarteten WLTC zeigt sich, dass der Kaltstart grundsätzlich zu einem erhöhten Energiebedarf führt da im kalten Zustand mehr Reibung überwunden werden muss und zusätzlich mehr Kraftstoff für das Aufwärmen des Motors benötigt wird. Bei den elektrischen Antrieben ist der Reibungseinfluss relativ gering, wodurch nahezu kein Unterschied zwischen Kalt- und Warmstart zu erkennen ist.

Der NEFZ, die Basis der Herstellerangaben, führt gegenüber dem WLTC tendenziell zu geringeren Verbrauchswerten. Bei BEV ist der Effekt am stärksten mit einer 30% Verbrauchsreduktion. Hier übersetzt sich der kaum Radlast-abhängige Wirkungsgrad des Elektroantriebs die reduzierte Radlast direkt in eine Energieersparnis. Bei verbrennungsmotorischen Antrieben führt die allgemein tiefe Radlast zu tieferen Leistungsanforderungen und damit einem tieferen mittleren Motorwirkungsgrad. Bei Hybridantrieben führt dies zusätzlich zur Reduktion des Rekuperationspotentials.

Der CADC Zyklus ist wesentlich dynamischer als der WLTC. Daher resultiert für alle Antriebsstränge ein höherer Energiebedarf. Aufgrund des hohen Autobahnanteils kann der Hybridantrieb in diesem

Fall tendenziell weniger zur Effizienzsteigerung beitragen, weshalb diese Antriebe hier den höchsten Verbrauchsunterschied aufweisen.

Der FPT75 weist den kleinsten Leistungsbedarf der Zyklen auf, weshalb der Energiebedarf dieses Zyklus im Vergleich zum warm gestarteten WLTC kleiner ausfällt. Lediglich das rein verbrennungsmotorische CNG Fahrzeug bildet hier die Ausnahme. Aufgrund der tiefen Leistungen und Geschwindigkeiten sinkt der mittlere Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors so stark ab, dass ein erhöhter Energiebedarf resultiert.

Der RA weist aufgrund der hohen Durchschnittsgeschwindigkeit den höchsten Leistungsbedarf auf. Trotz der Dynamik bei hohen Geschwindigkeiten kann der Verbrennungsmotor hier den Wirkungsgrad nahe am Bestpunkt halten, was zu einem tieferen Energiebedarf führt da der Zyklus auch keine Stopp-Phasen enthält. Die Antriebsstränge ohne Verbrennungsmotor weisen aufgrund ihres relativ stabilen Wirkungsgrads über das gesamte Leistungsspektrum eine direktere Abhängigkeit zum Radleistungsbedarf eines Zyklus auf, weshalb für diese Antriebe tendenziell ein Mehrverbrauch zu verzeichnen ist.

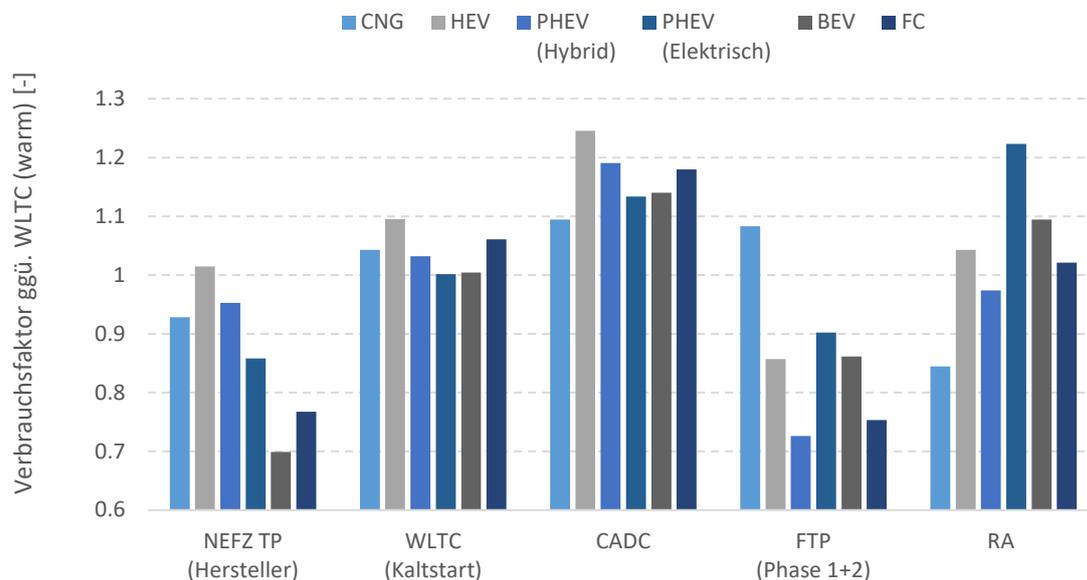


Abbildung 10: Verbrauchsfaktor der verschiedenen Zyklenvariationen gegenüber dem Energieverbrauch des WLTC mit warm gestartetem Antriebsstrang.

4.1.3 Validierung der Fahrzeug-Messtechnik für den Feldversuch

Nebst der Bestimmung der Willans-Koeffizienten (siehe Kapitel 3.2.2 und 4.1.1), wurden die Prüfstandmessungen verwendet um die im Feldversuch aufgezeichneten, fahrzeugeigenen Verbrauchssignale zu validieren. Verbrennungsmotorische Antriebe bestimmen den Kraftstoffverbrauch entweder durch Aufsummierung der eingespritzten Kraftstoffmenge oder Anhand des Lambda-Signals (Kraftstoff/Luftverhältnis) und dem Ansaugluftmassenstrom. Beide Berechnungsvarianten benötigen im Steuergerät des Motors festgelegte Kraftstoffparameter, wie Treibstoffdichte und Heizwert. Weichen die einprogrammierten Parameter vom effektiv verwendeten Kraftstoff ab, weicht das berechnete Signal dementsprechend auch vom realen Verbrauch ab.

Deswegen wurden die über die Kohlenstoffbilanz ermittelten Verbräuche mit den im Datenerfassungssystem aufgezeichneten Fahrzeugsignalen abgeglichen (siehe Abbildung 11 **Error! Reference source not found.**). Ihre Übereinstimmung wurde anschliessend per Regressionsanalyse

gemessen, was in allen Fällen lineare Zusammenhänge ergab. Die Parameter der Korrelationsgeraden wurden benutzt um die aufgezeichneten Signale des Feldversuchs vor der Auswertung zu korrigieren. Anhand derselben Methodik wurden, unter Zuhilfenahme entsprechender Messgeräte, auch verschiedene Strom- und Spannungssignale der Elektro-Antriebstränge validiert.

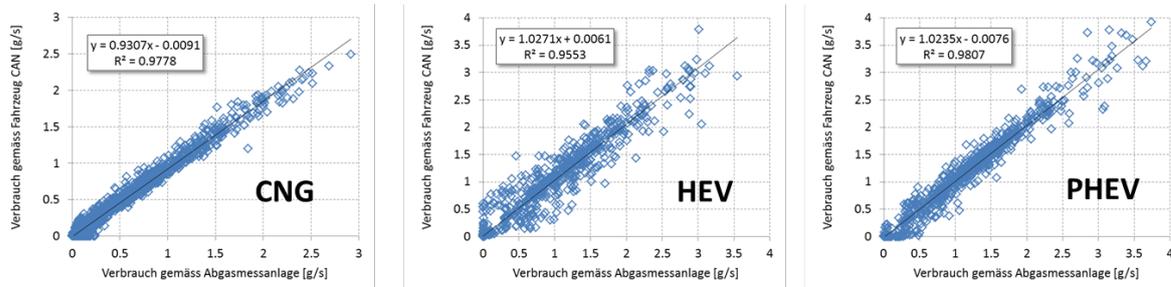


Abbildung 11: Vergleich des Verbrauchssignal der Abgasmessanlage (berechnet anhand der Kohlenstoffbilanz — siehe Kapitel 2.2.1) mit dem Signal der Motorsteuerung der 3 verbrennungsmotorischen Fahrzeuge. Der hohe R^2 -Wert der Regressionsanalyse (schwarze Linie) und der verschwindend kleine Achsabschnitt legen eine einfache Proportionalität, sprich einen systematischen Fehler nahe.

Die Abweichung erwies sich bei allen Antrieben als vernachlässigbar. Fahrzeuge einen vernachlässigen Fehler; beim Gasmotor hingegen lag die Verbrauchsangabe des Fahrzeugs konsequent unter der Prüfstandsmessung (siehe Abbildung 11). Die Erklärung dieses systematischen Fehlers bei der Motorsteuerung: bei der Berechnung des Verbrauchssignals den Normtreibstoff G20 verwendet. Dessen Dichte weicht von der mittleren Dichte des Schweizer Erdgasmix ab und erklärt die systematische Abweichung.

4.2 Auswertung der Feldtests

4.2.1 Nutzungsprofile der Testfahrzeuge

Nach anfänglichen Verzögerungen bei der Fahrzeugbeschaffung startete der Feldversuch im ersten Quartal 2016. Bis im Herbst 2018 konnten Empa Mitarbeiter die mit Datenerfassung ausgerüsteten Fahrzeuge bei der Empa Garage für dienstliche und private Zwecke ausleihen. Insgesamt wurden bis zu 56 Signale pro Fahrzeug über ca. 3'000 Fahrten und 115'000 km aufgezeichnet. Abbildung 12 zeigt den Einsatz der Fahrzeuge über die gefahrenen Strassenarten. Auffällig ist der hohe Autobahnanteil bei allen Fahrzeugen mit Ausnahme des BEVs. Wir vermuten die Ursache im Betrieb als «Poolfahrzeug»: die Fahrzeuge mussten formell über Stunden oder Tage ausgeliehen werden. Die Nutzer, Empa Mitarbeiter, müssen bereits über ein primäres Transportmittel für den Arbeitsweg verfügen. Deshalb vermuten wir den Hauptanwendungszweck in Dienstreisen oder längeren Fahrten über ein Wochenende.

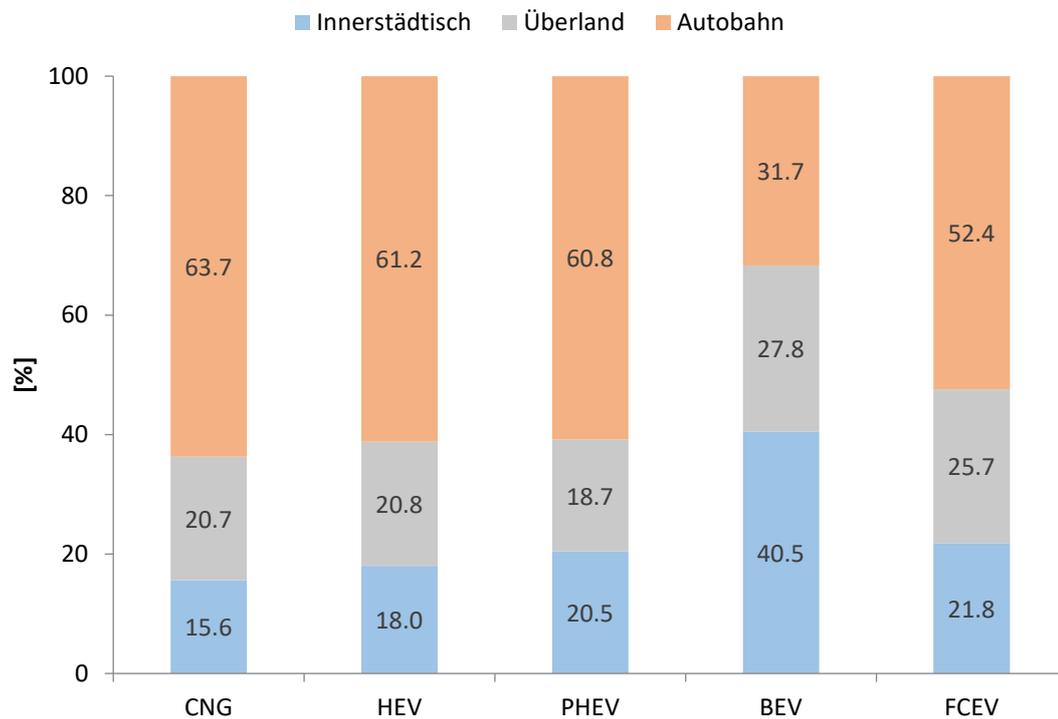


Abbildung 12: Aufteilung der über den beobachtungszeitraum zurückgelegten Fahrstrecke für die verschiedenen Antriebe in Innerstädtische-, Überland- und Autobahnfahrten .

Kurze Pendelstrecken sind im Vergleich zu Autos im Privatbesitz untervertreten. Das Elektrofahrzeug dagegen wurde vor allem abseits der Autobahn benutzt, vermutlich wegen dem Hintergedanken, mit einer Batterieladung wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren zu können. Dies trifft teilweise auch auf das FCEV zu.

4.2.2 Spezifischer Energiebedarf über alle Fahrten

Abbildung 13 zeigt die unter Realbedingungen gemessenen, spezifischen Energieverbräuche, welche anhand der zeitaufgelösten Signale ermittelt wurden. Dargestellt ist die Verteilung (als Kastengrafik) über alle beobachtete Fahrten, aufgeteilt nach Antriebsart (und damit Fahrzeug). Für das Hybrid- resp. das Plug-In Hybrid Fahrzeug wurde die chemische Energie aus dem Kraftstoff und die Energiebilanz der Batterie berücksichtigt. Berücksichtigt wurden alle Fahrten welche eine Distanz von mindestens einem Kilometer zurücklegten, mit Ausnahme des FCEV: aufgrund der Berechnungsmethode (Tankdruckdifferenz über die Fahrt, siehe Kapitel 2.3.1) konnten nur Fahrten über eine Distanz von mindestens 10 km berücksichtigt werden.

Der Median des Realverbrauchs liegt bei allen mindestens 100 Wh/km über den Herstellerangaben im NEFZ (siehe Abbildung 8); mit rund 50 Wh/km Abweichung sind die WLTC Laborwerte eine bessere Approximation; am nächsten kommt der Artemis-Zyklus (CADC), der beim FCEV sogar den Median Realverbrauch überschritt. Auf einzelnen Fahrten kam es zu sehr starken Abweichungen vom Mittelwert; je nach Antrieb hat sich der Verbrauch fast verdoppelt; er konnte aber auch deutlich unter dem Median liegen. Aus Kundensicht ist ein starrer Labormesswert damit definitiv keine zufriedenstellende Lösung. Ein differenziertes Verfahren, wie unser Willans-Ansatz, vermag die Varianz im Einzelnen genauer zu beschreiben (siehe Kapitel 3.2).

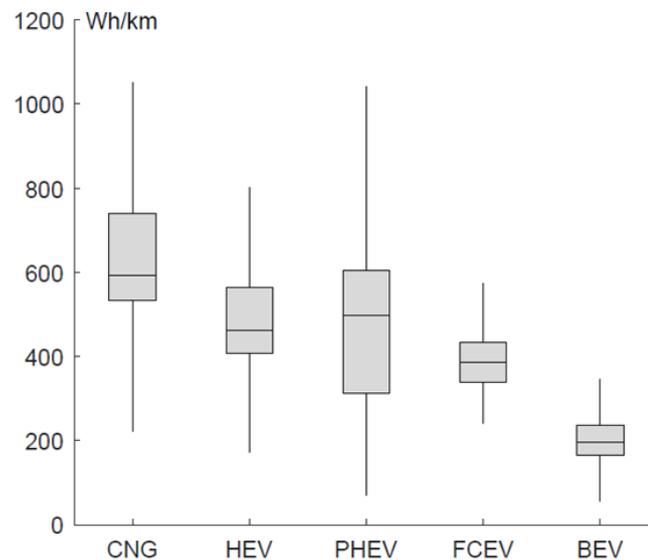


Abbildung 13: Verbrauch der verschiedenen Antriebsvarianten über den gesamten Beobachtungszeitraum (inkl. Zusatzverbraucher wie Klimaanlage und Heizung). Beim BEV sind die Energiespeicherverluste (Batterie und Ladegerät) bereits miteingerechnet (siehe Kapitel 4.3.2)

Im Feld aller Antriebe wies das konventionelle CNG (compressed natural gas) Fahrzeug im Median die höchsten spezifische Energieintensität von rund 600 Wh/km auf. Der Benzinhybrid (HEV) lag dem gegenüber ca. 28% tiefer (bei einer ähnlich höheren CO₂ Intensität). Der Median des PHEV liegt leicht über dem des HEV, obwohl die elektrisch zurückgelegte Distanz berücksichtigt wurde. Hauptursache ist das höhere Leergewicht des PHEV, aber auch der kleine Anteil rein elektrischer Fahrten — wie in Kapitel 4.2.1 diskutiert, wurden die Fahrzeuge primär auf längeren Autobahnfahrten eingesetzt, welche potentiell keine Möglichkeiten zum Zwischenladen lassen. Die Möglichkeit rein elektrisch oder hybridisch zu fahren resultiert in der grössten Streuung der Ergebnisse im Feld.

Das Brennstoffzellenfahrzeug unterbietet trotz seines höheren Gewichts den Medianwert des HEV, dies hauptsächlich aufgrund des höheren Wirkungsgrads der Brennstoffzelle im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Den tiefsten Realverbrauch und die geringste Streuung erreicht der rein elektrische Antrieb des BEV, aufgrund seines hohen Antriebswirkungsgrads.

4.2.3 Spezifischer Energieverbrauch nach Strassenart

Kapitel 4.2.2 die starke Varianz des Energieverbrauchs unter Realbedingungen fest. Um die Hintergründe zu verstehen differenzieren die 4 Einzelgraphen der Abbildung 14 den Verbrauch auf verschiedenen Strassenarten. So wird die Streckenwahl und das von der Strassenart abhängige Fahrverhalten von der Antriebseffizienz entkoppelt. Für das FCEV war das auf Grund des fehlenden, zeitaufgelösten Verbrauchssignals (siehe Kapitel 2.3.1) nicht möglich.

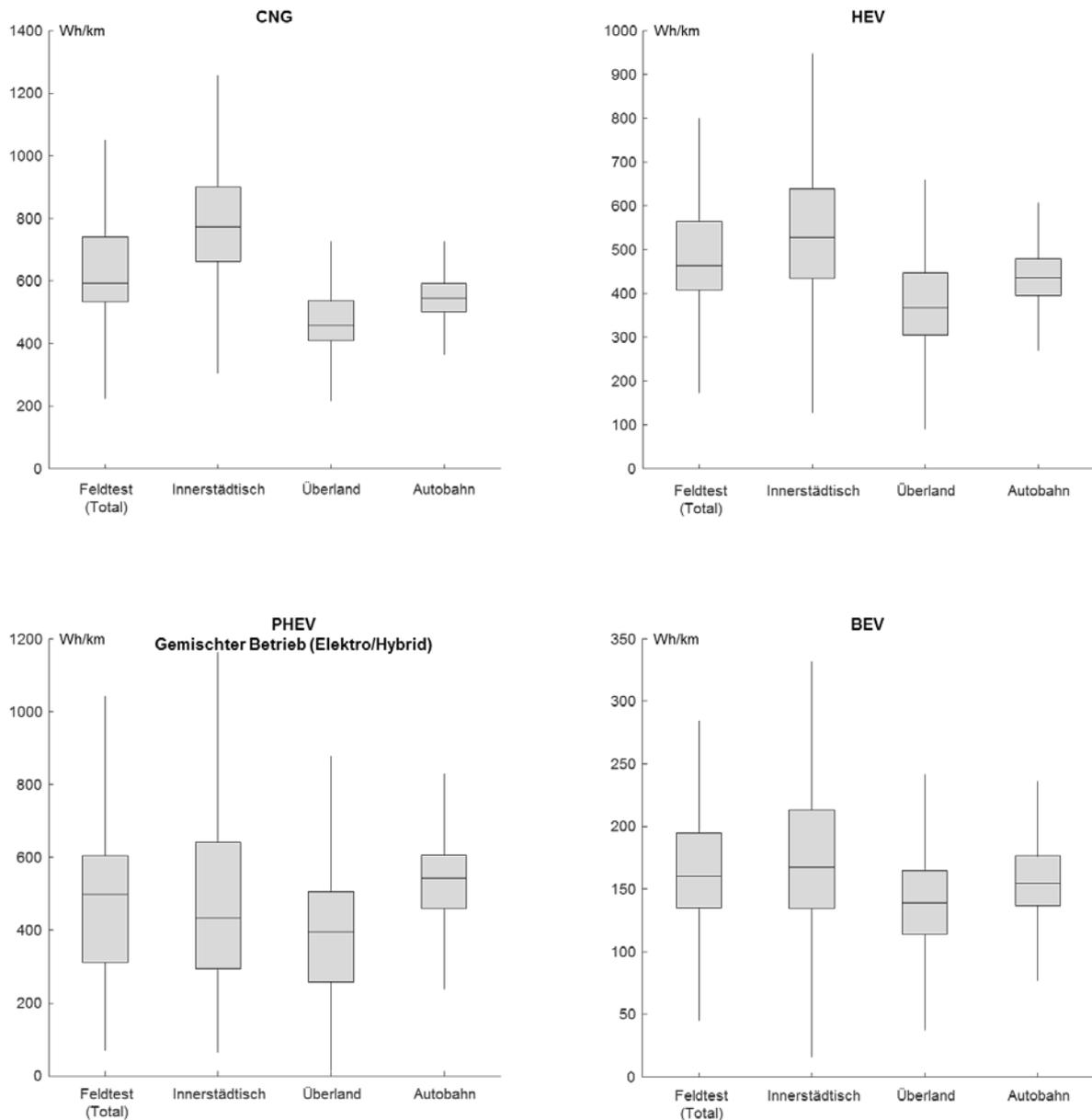


Abbildung 14: Boxplots des gemessenen Verbrauchs im Feldversuch (inkl. Zusatzverbraucher wie Klimaanlage und Heizung) nach Strassenart. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achsen. Der FCEV konnte aus messtechnischen Gründen nicht berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.2.3).

Beim CNG Fahrzeug springt der deutlich erhöhte innerstädtische Verbrauch ins Auge. Das ist der Effekt schlechter Teillasteffizienz bei Verbrennungsmotoren, den man bei allen konventionellen Antrieben beobachten kann. Im Gegensatz dazu kann der HEV die Unterschiede zwischen den verschiedenen Betriebsarten glätten. Allerdings reduziert sich dieser Vorteil bei erhöhtem Autobahnanteil. Ähnlich verhält es sich beim PHEV. Jedoch steigt aufgrund des höheren Fahrzeuggewichts der Verbrauch auf der Autobahn deutlicher an als beim HEV.

Auch beim BEV ergeben sich bei innerstädtischen Fahrten die höchsten Median-Verbrauchswerte. Entgegen dem Verbrennungsmotor hat das aber weniger mit Teillastverhalten zu tun, als mit den Nebenverbrauchern: die Prüfstandmessungen haben gezeigt, dass beim BEV der Verbrauch linear mit der erforderlichen Radleistung ansteigt. Im Realbetrieb kommen darauf noch Nebenverbraucher,

wie die Heizung, Klimaanlage, Radio, oder die Beleuchtung. Ihre Last ist a priori unabhängig vom Fahrzustand. Umso langsamer das Fahrzeug fährt, umso grösser der Anteil der Nebenverbrauchslasten am Gesamtbedarf, sprich zum Antrieb (siehe dazu auch Abschnitt 4.4.1). Deswegen steigt der Verbrauch im Innerstädtischen an; der Anstieg auf der Autobahn hängt dagegen mit der erhöhten Radlast zusammen.

Der Plug-In Hybrid (PHEV) in Abbildung 14 ist im sogenannten Mixbetrieb dargestellt, d.h. die Kombination von Elektro- und Hybridbetrieb. Die Verbräuche innerhalb der einzelnen Betriebsmodi sind in Abbildung 15 dargestellt. Das Verhältnis zwischen der hybridisch und rein elektrisch gefahrenen Distanz wird mit dem sogenannten Utility Factor (UF) gemessen. In der Typenprüfung wird dieses Verhältnis anhand der elektrischen Reichweite bestimmt und liegt bei einem Fahrzeug mit einer elektrischen Reichweite von ca. 50km bei ca. 0,7. Es wird also davon ausgegangen, dass bis zu 70% aller gefahrenen Kilometer rein elektrisch zurückgelegt werden. Im Realeinsatz in der Empa-Flotte lag dieser Wert, berechnet anhand des Mixverbrauchs und der Einzelverbräuche (Hybrid, Elektro) bei lediglich 24%.

Der Feldtest bestätigt, dass der effektiv in der Praxis erreichte UF sehr stark vom Nutzerverhalten und der Ladegewohnheiten abhängig ist. Würden wir nach Norm mit einem UF von 70% rechnen, würden wir den fossilen Energiebedarf (und damit die CO₂ Emissionen) um fast das Dreifache unterschätzen. Nur durch erhöhten Einsatz des elektrischen Antriebs kann signifikant fossile Energie gespart werden. Im reinen Hybridbetrieb war der Energieverbrauch für das untersuchte Fahrzeugs aufgrund des Fahrzeuggewichts sogar höher als der Verbrauch des HEV ohne externe Lademöglichkeit (vergleiche Abbildungen 12 und 13).

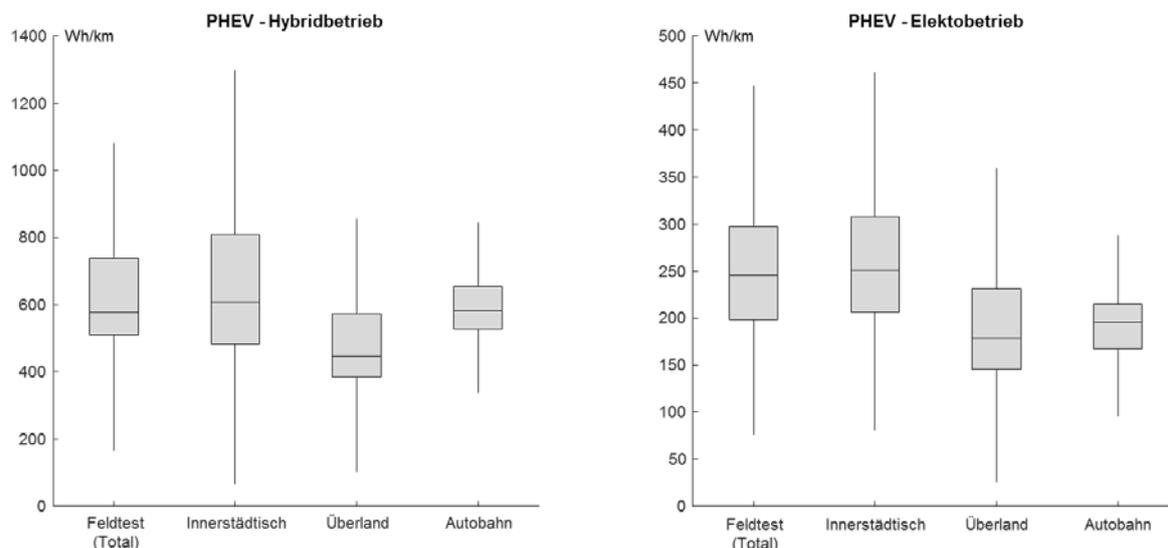


Abbildung 15: Aufteilung des Verbrauchs des extern aufladbaren PHEV-Fahrzeugs in Hybridbetrieb (Hochvoltbatterie leer) und im rein elektrischen Betrieb (Hochvoltbatterie voll)

4.2.4 Einfluss der Strassentopographie auf den Energiebedarf

Als Grundfunktion emuliert ein Rollenprüfstand eine Fahrt auf einer ebenen Strasse. Technisch wäre es durchaus möglich eine Bergfahrt zu simulieren, aber das ist in der Praxis unüblich. In der Tat gehen alle in diesem Projekt untersuchten (und in Abschnitt 2.2.2 diskutierten) Fahrzyklen von einer komplett ebenen Strassentopographie aus. Diese Annahme ist nicht realistisch, insbesondere in einer Alpenregion wie der Schweiz. Dennoch wird häufig argumentiert, dass die meisten PW am Abend wieder an ihren morgendlichen Ursprungsort, dem Wohnort des Fahrers, zurückkehren — das lässt

sich auch mit dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr für die Schweiz bestätigen. Über einen Tag ist die zurückgelegte Höhendifferenz also in der Regel effektiv Null.

Nichtsdestotrotz können auf Einzelfahrten energetisch signifikante Steigungen auftreten, welche den Energiebedarf insgesamt erhöhen. Deshalb untersuchten wir den Einfluss der Steigung resp. der entstehende Fehler, wenn sie vernachlässigt wird, sowie die Repräsentativität gegebener Normzyklen relativ zu den gesammelten Daten. Dazu wurden zunächst die aufgezeichneten GPS-Positionssignale vom ETHZ-LAV auf das swissTLM 3D⁵ Strassenkartenmaterial von Swisstopo projiziert um eine zuverlässige Höhenangabe zu ermitteln. Energetische Berechnungen zeigten, dass die Steigung im Mittel über alle aufgezeichneten Fahrten zu einer Erhöhung der Antriebslast von rund 7% führte. Diese Erhöhung wird im Realverbrauchsmodell durch den Faktor r_{II}^+ mitberücksichtigt (siehe Kapitel 3.2.3). Dessen Verteilung in den Feldmessungen ist in Abbildung 21 dargestellt.

Kurioserweise beobachteten wir für netto-bergab Fahrten einen Anstieg der Antriebslast. Das passiert, wenn die Bergabfahrt durch aufsteigende Segmente unterbrochen wird. Auf diesen Segmenten muss der Antrieb zusätzliche Arbeit leisten. Die Nettohöhendifferenz berücksichtigt dies nicht; energetisch versteht sie die Fahrt als kontinuierlichen Abstieg über eine Gerade. Bei stärker negativen Steigungen fällt der Effekt weniger ins Gewicht, da zum einen die Zurückgewinnung der Potentialenergie die zusätzliche Arbeit auf der Steigung überwiegt, und insgesamt die Strecke zunehmend steil wird. Kapitel 3.2.3 diskutiert wie hier ein zusätzlicher Indikator für den «vertikalen Umweg» im Realverbrauchsmodell Abhilfe schafft.

4.3 Energiemodell

4.3.1 Herleitung der Willans-Koeffizienten

Die Willans-Koeffizienten wurden auf Basis der Energieflussdaten der Labormesskampagne hergeleitet, ergänzt um Empa-eigene Prüfstandsdaten an anderen Fahrzeugen aus anderen Projekten: da keine konventionell angetriebenen Fahrzeuge in der ESMOBIL-RED Testflotte waren, wurden Messdaten des BAFU Emissionsinventar Projekts verwendet. Für batterieelektrische Fahrzeuge kamen Messdaten von drei zusätzlichen Fahrzeugen dazu.

Die Prüfstandsdaten wurden in je eine Willans-Gerade pro Antriebsart übersetzt. (siehe Kapitel 3.2 für eine konzeptionelle Erklärung). Dazu wurden die im Labor gefahrenen Zyklen (siehe Kapitel 2.2) in Teilstücke unterteilt. Für jedes wurde der zeitgemittelte positive mechanische Energiebedarf am Rad sowie der zeitgemittelte Treibstofffluss (als chemische Leistung) resp. Elektrizitätsbedarf berechnet. Abbildung 16 (links) zeigt den Zusammenhang beider Grössen am Beispiel eines HEV. Eine Regressionsanalyse stellte bei allen getesteten Fahrzeugen eine sehr starke ($R^2 > 0.98$) lineare Korrelation fest. Abbildung 17 zeigt die resultierenden Regressionskoeffizienten, welche wir als Willans-Koeffizienten A und B übernahmen.

⁵ <https://shop.swisstopo.admin.ch/en/products/landscape/tlm3D>

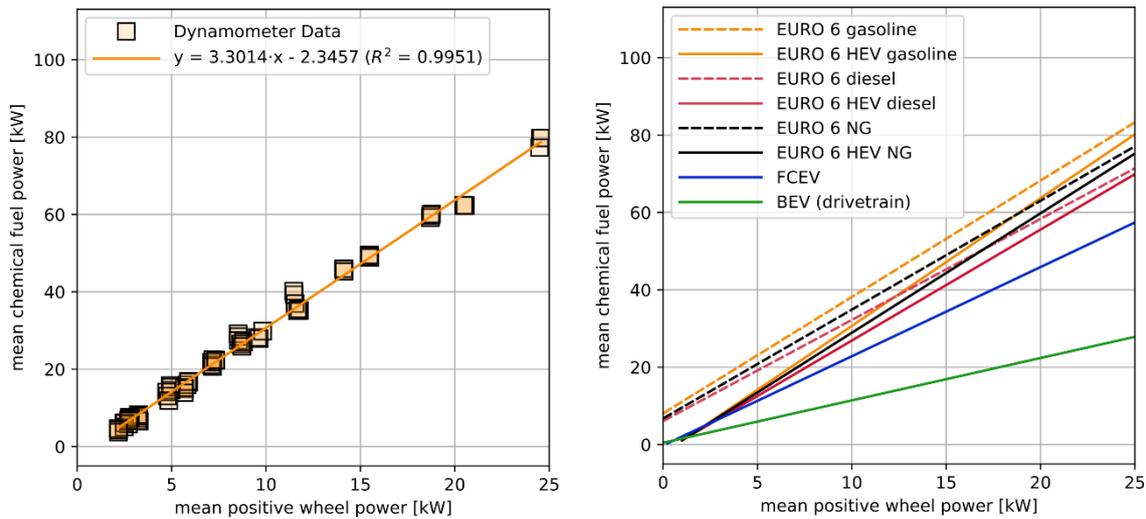


Abbildung 16: Aus den Prüfstandmessungen abgeleitete Willans-Linien. Die Willans-Linie setzt die mechanische Ausgangsleistung des Antriebs, d.h. die mittlere positive Radlast in Bezug zur mittleren Energienachfrage; ihr Verhältnis beschreibt die mittlere Effizienz des Antriebs. *Links*: ein Benzinhybridfahrzeug mit Darstellung der einzelnen, gemittelten Messpunkte (jeder Punkt ist ein Zyklus). *Rechts*: Vergleich verschiedener Antriebe; die Linien für den Diesel- und Gas-HEV wurden von der Willans-Linie des Benzinhybridfahrzeugs abgeleitet.

Für Plug-in Hybride gelten die Willans-Koeffizienten des entsprechenden HEV im Hybridmodus und die des BEV für den Elektromodus. Die «BEV drivetrain» Willans-Gerade beschreibt die Energiekette ab der Batterieklemme bis ans Rad, sprich den elektrischen Antrieb an sich. Die Verluste beim Laden und Entladen der Batterie werden durch die «BEV energy storage» Willans-Linie beschrieben, welche im nachfolgenden Kapitel 4.3.2 eingeführt wird.

Die Willans-Koeffizienten spiegeln die Lastabhängigkeit der Effizienz des Antriebsstrangs wieder. Mit der in Kapitel 3.2.2 eingeführten Notation gilt für die Effizienz nicht-rekuperationsfähiger Antriebe:

$$\eta = \left(A + \frac{B}{\bar{P}_w^+} \right)^{-1}$$

$\eta(\bar{P}_w^+)$ tendiert zu A^{-1} für sehr hohe Radlasten. A ist also Mass für Effizienz, welche umso höher ist je näher A an 1. B bestimmt das Vorzeichen der Ableitung von $\eta(\bar{P}_w^+)$; für positive B steigt die Effizienz mit der Radlast, für negative B (welches nur bei rekuperationsfähigen Hybriden auftrat) sinkt sie.

Vehicle category	A: slope	B: intercept	R ²	# vehicles	# cycles
EURO 6 gasoline	3.0084	8.0660	0.9899	7	53
EURO 6 diesel	2.6124	6.0977	0.9928	10	60
EURO 6 natural gas	2.8132	6.7570	0.9990	1	33
EURO 6 hybrid gasoline	3.3014	-2.3457	0.9951	2	66
EURO 6 hybrid diesel	2.8668	-1.7733	-	-	-
EURO 6 hybrid natural gas	3.0872	-1.9650	-	-	-
BEV drivetrain	1.0953	0.4760	0.9977	4	99
BEV energy storage	1.1992	0.1896	0.9993	3	16
FCEV	2.3047	-0.2116	0.9947	1	9

Abbildung 17: Willans-Koeffizienten, Determinationskoeffizient der linearen Korrelation zwischen mittlerer Radlast und mittlerem Energiebedarf, sowie Populationsgrösse der zu Grunde liegenden Daten in Anzahl Fahrzeuge und Anzahl getesteter Zyklen (cycles).

Ausserdem ist B der Verstärkungsfaktor der Radlastabhängigkeit der Effizienz. Umso kleiner B , umso geringer der Effekt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Ausdruck für sehr tiefe \bar{P}_w^+ unphysikalische Resultate produziert. Diese können in der Praxis auf Grund der unvermeidlichen Nebenaggregatslast nicht auftreten (im Extremfall, wenn das Fahrzeug sich überhaupt nicht bewegt, ist der Energiebedarf pro gefahrenem Meter undefiniert, da jeder Moment wo das Fahrzeug mit eingeschalteter Zündung, Steuergeräte, Radio, etc. läuft, sehr wohl Energie bezogen wird ohne die geringsten Fahrleistung). Für eine detailliertere Abhandlung der Willans-Gerade und möglicher Anwendungen verweisen wir auf die aus dem Projekt entstandene Publikation in Transport Research Part C veröffentlicht [18]; Abbildung 17 zeigt einen Auszug für interessierte Modellnutzer.

4.3.2 Zusatz: Willans-Gerade des Lade- und Batteriesystems

Gemäss der Konvention in Kapitel 3.2.2 (und der Anzeige im Kombiinstrument), beschreibt die Willans-Gerade eines BEV den Umwandlungsprozess von elektrischer Leistung aus der Batterie zu mechanischer Energie am Rad. Die Verluste beim Laden der Batterie sind noch nicht berücksichtigt. Das betrifft sowohl die Wandlungsverluste des Ladegeräts als auch die Lade- und Entladeverluste der Batterie selbst.

Dazu wurde ein Sondermessprogramm gefahren: die Fahrzeuge wurden, nach Beendigung eines Zyklus auf dem Rollenprüfstand, abwechselnd mit dem fahrzeugeigenen 1.4-1.6kW Ladegerät und einem externen 22 kW Ladegerät nachgeladen. Dabei wurde kontinuierlich die Leistung gemessen, die das Ladegerät vom Stromnetz bezieht. Anschliessend wandten wir auch auf diesen Umwandlungsprozess den Willans-Ansatz an, allerdings dieses Mal über Energien und nicht mittlere Leistungen: Abbildung 18 stellt die während der Fahrt aus der Batterie geflossene Energie in Bezug zur vom Ladegerät aus dem Stromnetz bezogenen Energie. Die Messpunkte bestätigten einen linearen Zusammenhang, und damit den Willans-Ansatz.

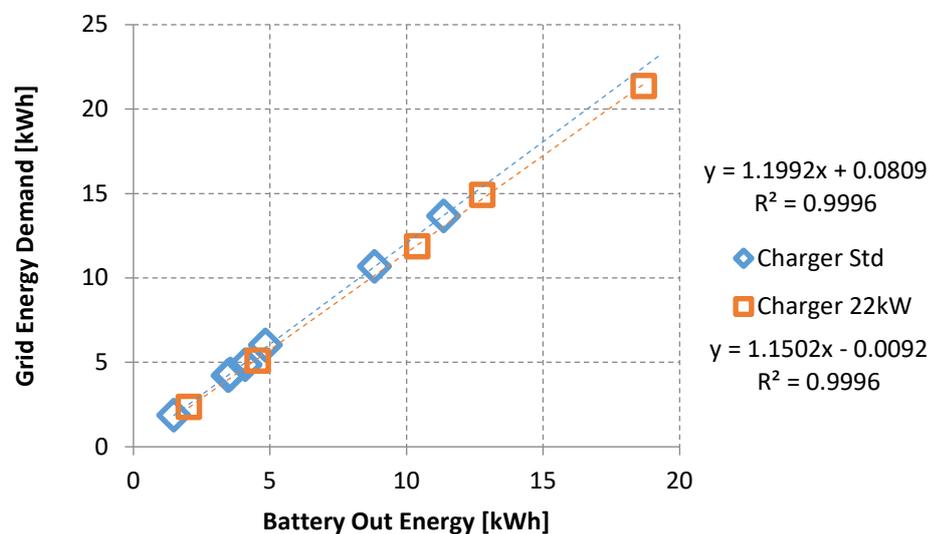


Abbildung 18: Vergleich der Energiespeichereffizienz in den verschiedenen Lade-Szenarios. Die Standardladung mit dem fahrzeugeigenen Ladeequipment (ca. 1.4-1.6kW Ladeleistung) weist eine Effizienz von ca. 83% auf. Der Ladevorgang an der Schnellladesäule der move-Infrastruktur der Empa weist eine Effizienz von ca. 87% auf.

Die Steigung der Energiespeicher-Willans-Gerade ist ein Mass für die Effizienz des Speichersystems (wichtig: das ist die kombinierte Effizienz des Ladegeräts und des Lade-/Entladezyklus der Batterie). Für den getesteten VW eGolf übersetzt sich das zu 83% für die interne 1.4-1.6kW Ladeoption und auf

87% für die externe 22kW Ladesäule. Der Achsenabschnitt steht für einen Basisenergiebedarf des Speichersystems, welcher bei den beobachteten Systemen vernachlässigbar klein war. Das heisst, dass der Wirkungsgrad des Energiespeichersystems nicht von der nachzuladenden Energie abhängt. Sprich das Ladegerät zog immer die gleiche Leistung vom Netz, ungeachtet der Entladungstiefe; nur die Dauer des Ladevorgangs änderte sich. Bei externen Ladegeräten mit noch höherer Ladeleistungen ist das nicht zwingend da Fall, da eventuell das Kühlsystem der Batterie einspringen muss. Analog der Nebenverbraucher während der Fahrt addiert sich dieser Eigenbedarf auf den eigentlichen Ladeenergiebedarf.

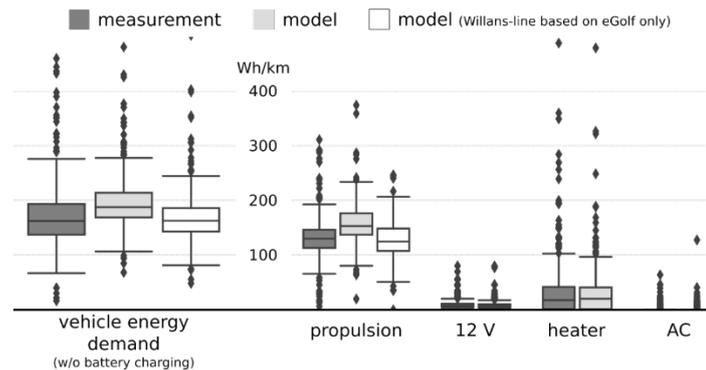


Abbildung 19: Vergleich der Verteilung des Energiebedarfs aus der Messung und der Modellrechnung, aufgeteilt nach Gesamtenergiebedarf sowie den einzelnen Beiträgen des Antriebs, des 12-Volt Bordnetzes und des Heizungs- und Kühlsystems.

4.4 Realverbrauchsmodell

Kapitel 3.2.2 führte den Willans-Ansatz als Abstraktion eines Antriebs und die mittlere Radlast als Abstraktion einer Fahrsituation für ein gegebenes Fahrzeug ein. Das Realverbrauchsmodell geht noch einen Schritt weiter und parametrisiert die abstrahierte Fahrsituation. Kapitel 3.2.3 führte die notwendigen Konzepte gleichzeitig mit der Grundstruktur des Modells ein. Im Folgenden zeigen wir die wichtigsten Erkenntnisse der statistischen Analyse, auf welche das Modell sich stützt. Die Definitionen (insbesondere Symbole) aus Kapitel 3.2.3 werden als bekannt vorausgesetzt.

Kerngedanke der statistischen war, Einflüsse auf die Radlast der 4 Realverbrauchsfaktoren gegenüber dem WLTC zu isolieren. Dazu wurde für alle im Feldversuch aufgezeichneten Fahrten die Korrekturfaktoren r_I^+ und r_{II}^+ berechnet (siehe Sektion 3.2.3 sowie Abbildung 20 und Abbildung 21).

Die Definition von r_I^+ und r_{II}^+ und die dazugehörigen Modelle entstanden aus einem stufenweisen Prozess, den wir in [15] vertiefen. Die Herausforderung war orthogonale Parameter zu identifizieren. Zum Beispiel bestätigten die Daten das postulierte, weniger aggressive Beschleunigungsverhalten bei höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten. Es äussert sich in einer quadratischen Abhängigkeit der mittleren Beschleunigung von der Geschwindigkeit (siehe Korrelation Beschleunigungsparameter in Kapitel 3.2.3). Durch eine entsprechende Koordinatentransformation liess sich die Tendenz entfernen. Diese wurde so gewählt, dass der Modellparameterraum ein orthogonales Koordinatensystem bildet, in denen die Daten des Feldversuchs parametrisierbare, symmetrische Verteilungen folgen.

Abbildung 21 zeigt die Rohdaten des Feldversuchs für den Korrekturfaktor für Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Tendenz ist nicht überraschend: die erforderliche Radlast steigt mit der Geschwindigkeit im Quadrat; der Punkt (1, 1), Parität mit dem WLTC wird von der Ausgleichsgerade durchlaufen. Hier beobachten wir also den Einfluss der aerodynamischen Kraft, welche nur indirekt vom Beschleunigungsverhalten beeinflusst wird. Letzteres verursacht die deutlich sichtbare vertikale

Streuung um die Ausgleichsgerade und lässt sich durch $r_{dynamic}$ erklären. Abbildung 21 zeigt die analogen Daten für den zweiten Korrekturfaktor, die Strassentopographie.

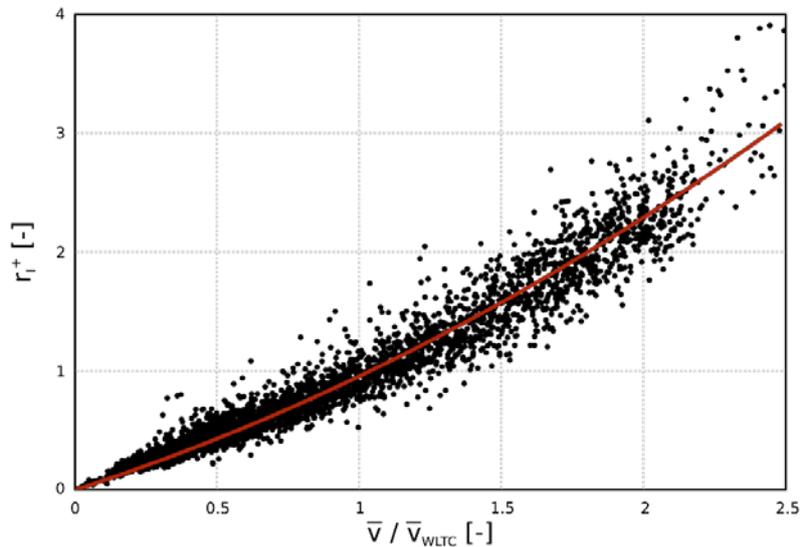


Abbildung 20: In Einzelfahrten des Feldversuchs beobachtete Radlast relativ zum WLTC als Funktion der mittleren Geschwindigkeit (auch relativ zum WLTC) und dazugehörige quadratische Ausgleichskurve. Die Streuung um das Regressionsmodell geht auf das Beschleunigungsverhalten zurück (siehe Kapitel 3.2.3). Quelle: adaptiert von [15].

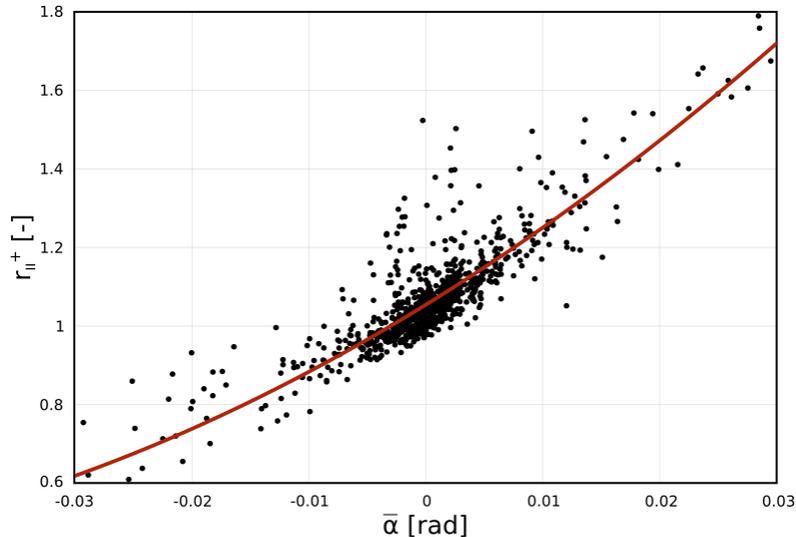


Abbildung 21: In Einzelfahrten des Feldversuchs beobachtete Radlast relativ zum WLTC als Funktion der mittleren Steigung und dazugehörige quadratische Ausgleichskurve (siehe Kapitel 3.2.3). Man beachte, selbst bei $\alpha = 0$, netto Null Höhenunterschied, erhöht die Strassentopographie die Radlast um durchschnittlich 7%. Quelle: adaptiert von [15].

Als Anwendungsbeispiel vergleicht Abbildung 22 (links) die gemessenen Verbrauchsdaten des CNG Fahrzeugs (Audi g-tron) mit den Ergebnissen unseres Realverbrauchsmodell. Dabei wurde für alle Modellparameter der im Feldversuch beobachtete Durchschnitt angenommen, mit Ausnahme der mittleren Geschwindigkeit. Ein realistisches Einsatzgebiet wäre also z.B. die Berechnung der CO2 Ersparnis beim Antriebswechsel in eine Firmenflotte, mit Fahrtbüchern als einziger Datenquelle. Es

zeigt sich der bei verbrennungsmotorischen Antrieben allgemein bekannte starke Anstieg des spezifischen Verbrauchs zu tiefen Geschwindigkeiten.

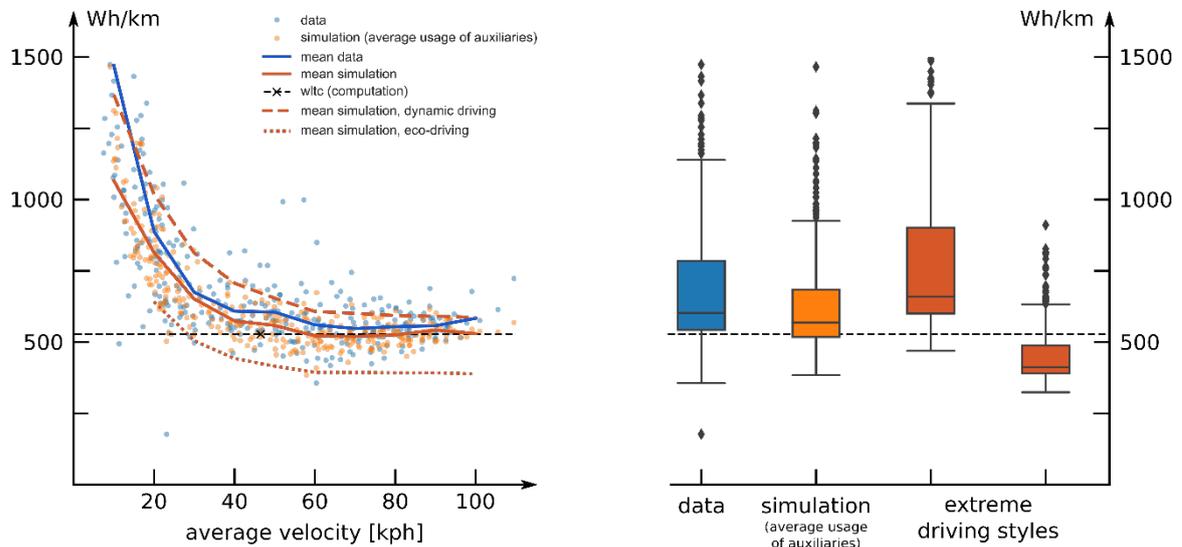


Abbildung 22: Nachrechnung des Energiebedarfs des Audi g-tron. Links: Abhängigkeit zur mittleren Geschwindigkeit im Experiment (blau) und in der Simulation (rot). Die gestrichelte und gepunktete Linie zeigt den Energiebedarf bei besonders aggressivem resp. gemütlischem Beschleunigungsverhalten. Rechts: Streuung des Energiebedarfs über den Geschwindigkeitsbereich bei unterschiedlichen Fahrstilen. Quelle: [15]

Das Modell beschreibt das Experiment im Mittel gut, unterschätzt aber tendenziell den Verbrauch (siehe Abbildung 22 rechts). Der Grund sind abweichende Werte auf den festgehaltenen Parametern, insbesondere der Nebenaggregatslast. Würden die effektiv gemessenen Werte aus dem Feldtest für jede Fahrt eingesetzt würde sich der Fehler minimieren; aber das widerspricht dem Zweck dieses Anwendungsbeispiels.

Als zweites Anwendungsbeispiel zeigen die gestrichelte und gepunktete Linien in Abbildung 22 den mittleren Einfluss des Dynamik Parameters. Dieser wurde auf das untere und obere Quartil der im Feldversuch gesichteten Werte gesetzt, um «eco-driving» und aggressives Fahren zu simulieren. Die Annahme dabei ist, dass Fahrer im unteren Quartil eco-driving konsequent umsetzen. Die Simulation zeigt, dass ein solcher Fahrstil im Median ungefähr 30% Verbrauchsreduktion gegenüber der unveränderten Simulation erzielt. Abbildung 22 links zeigt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit immer noch bestehen bleibt; sprich die Bremsverluste bei instationärem, innerstädtischem Verkehrs lassen sich nicht komplett vermeiden, verlieren aber relativ an Gewicht.

Über die zwei Anwendungsbeispiele hinaus kann, im Gegensatz zu spezialisierten Simulationswerkzeugen, prinzipiell jeder Modellparameter gezielt und sinnvoll verändert werden um fast jede erdenkliche Massnahme zu simulieren. Zunächst sind das technologische Parameter, die den Effekt möglicher technische Verbesserungen darstellen. So könnte z.B. der Effekt einer durch Leichtbau induzierten Gewichtsreduktion, einer durch verbesserte thermische Isolation der Kabine reduzierte Nebenaggregatslast (bei gleichzeitig erhöhtem Gewicht), einer anderen Reifenwahl oder eines höheren Reifendrucks simuliert werden. Voraussetzung ist jeweils die Übersetzung in sinnvolle Parameterwerte, sprich wieviel Gewichtsreduktion ein gewisses Leichtbaumaterial ermöglicht oder der Zusammenhang des Rollreibungskoeffizienten vom Fülldruck [19].

Auf der anderen Seite stehen die Parameter die den Kontext des Fahrzeugbetriebes beschreiben. Das sind z.B. die Durchschnittsgeschwindigkeit und die durchschnittliche Steigung, aber auch z.B. die

mittlere Temperatur, welche auf die Nebenaggregatslast wirkt (siehe Kapitel 4.4.2). Für ein Einzelfahrzeug beschreiben sie im Wesentlichen einen räumlichen Kontext (z.B. Bergregion vs. Flachland), aber z.B. auch Fahrerverhalten (wie am Anwendungsbeispiel gesehen). Auch hier sind unter Umständen weitere Simulationswerkzeuge erforderlich, da z.B. die Durchschnittsgeschwindigkeit auch aus der Interaktion vieler Fahrzeuge auf der Verkehrsinfrastruktur entsteh. Eine Verknüpfung mit Verkehrsflussmodellen wäre also sinnvoll um den Effekt verkehrlicher Massnahmen auf den Energiebedarf abbilden, insb. wenn von schnellem Technologiewechsel in Zukunft ausgegangen wird.

Im Endeffekt ist unser Modell also ein sehr flexibles Werkzeug. Auf sich alleine gestellt kann es natürlich nicht alle Fragen der Energiewende in der Mobilität beantworten. Aber dank seiner intuitiven, orthogonalen Parameter lässt es sich einfach mit anderen Simulationswerkzeugen zu Systemanalysewerkzeugen kombinieren.

4.4.1 Einfluss nicht-antriebsrelevanter Nebenaggregate

Der Vergleich der Bordnetze aller in ESMOBIL-RED untersuchten Fahrzeuge ergab, dass selbst mit einer Hochvoltbatterie ausgerüstete Fahrzeuge ein 12 Volt Bordnetz samt Bleibatterie besitzen, welches alle Nebenaggregate versorgt — jene Geräte, die zwar aktive Energie beziehen, aber nicht direkt zum Vortrieb des Fahrzeugs beitragen (siehe Kapitel 3.2.3). Die wichtige Ausnahme war das Heiz- und Kühlsystem, welches entweder direkt elektrisch ab dem Hochvoltbus versorgt wurde, oder mit Abwärme und mechanischer Energie (für den Klimakompressor) direkt vom Verbrennungsmotor. Deswegen wurde bei allen Antriebsformen die Nebenaggregatslast in zwei Etappen gemessen: zunächst die Last am Einspeisepunkt in das 12 Volt-Netz, und dann separat die Heiz- und Kühllast.

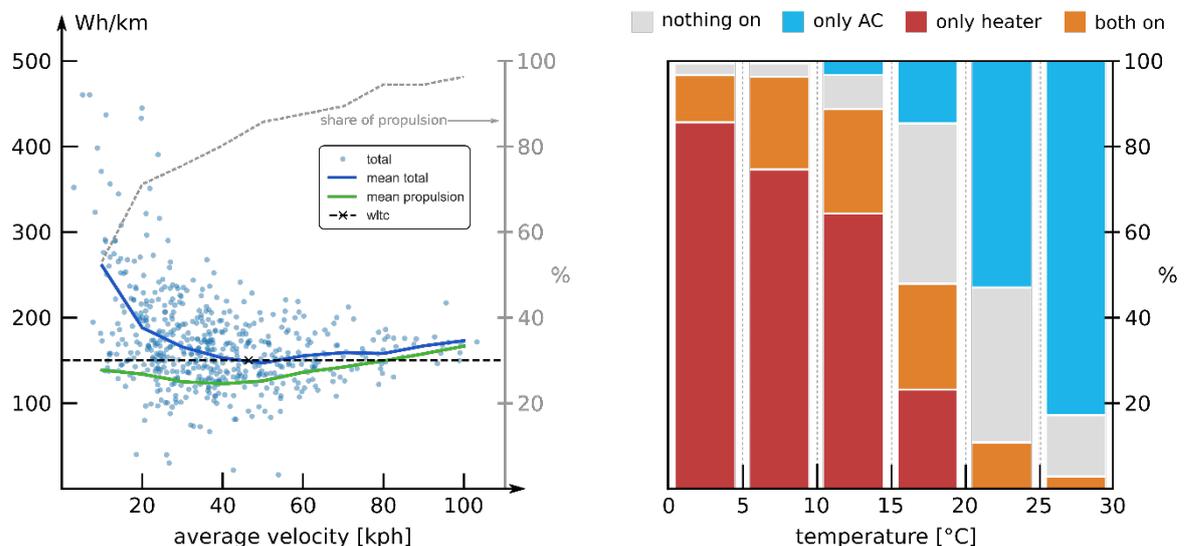


Abbildung 23: Links: Energiebedarf im Feldtest nach Durchschnittsgeschwindigkeit (Punkte), mittlerer Antriebsenergiebedarf (grün) und Gesamtbedarf inklusive Nebenaggregate (blau), sowie Anteil der Antriebs an der Gesamtlast (grau auf rechter Achse). Rechts: Anteil der Fahrten nach Aussentemperatur an denen das Kühlgerät (AC), die Heizung oder beide zusammen Energie bezogen (oder nicht). Quelle: [15]

In allen Feldmessungen lag am 12 Volt Netz eine von der Umgebungstemperatur nahezu unabhängige Bandlast von durchschnittlich 240 W beim BEV und 500 W bei allen anderen Antrieben. Wie zu erwarten war die Heiz- und Kühllast stark temperaturabhängig, mit einem Minimum zwischen 20 bis 25°C und einem signifikanten Anstieg zu höheren und tieferen Temperaturen. Abbildung 23

rechts zeigt wie links und rechts von diesem Temperaturfenster der Heizungs- resp. Kühlbetrieb dominiert; das Verhalten ist aber nicht trivial, wie der überlappende Betrieb belegt.

Das hat mit der einzigartigen Thermodynamik der Fahrzeugkabine (siehe Kapitel 4.4.2): um als «both on» zu qualifizieren, reicht je ein Messpunkt (sprich grob eine Sekunde) mit einem Heiz- und Kühlenergiebedarf aus. Das kommt insbesondere bei moderat-kühlen Temperaturen vor: prinzipiell wird geheizt; aber z.B. eine plötzliche Richtungsänderung kann zu direkter Sonneneinstrahlung und damit unangenehm hohen Temperaturempfinden führen. Moderne Klimasteuerungen messen die Sonneneinstrahlung und reagieren gegebenenfalls mit dem Kühlgerät.

Die zweite wichtige Ursache ist Feuchtigkeitskontrolle: wenn die Luftfeuchtigkeit in der Kabine einen kritischen Wert übersteigt, dann kondensiert Wasserdampf an den Scheiben. Eine beschlagene Frontscheibe ist ein Sicherheitsrisiko. Viele Klimasteuerungen halten deswegen präventiv die Luftfeuchtigkeit unter einem vordefinierten Schwellwert [21]. Ironischerweise sind die Hauptverursacher des Problems die Passagiere: über Atemluft und Schweiß gibt der menschliche Körper permanent Wasserdampf an seine Umgebung ab; bei Regen kommen häufig noch Ausdünstungen trocknender, regennasser Kleidung und angesaugtes Wasser dazu. Die einfachste Massnahme gegen ein rasches Aufkonzentrieren im kleinen Luftvolumen der Fahrzeugkabine ist ein erhöhter Frischluftmassenstrom. Jedoch ist die nominelle Lüfter- und Heizleistung meist nur relativ moderaten Kombination hoher Aussenfeuchte, tiefer Aussentemperatur und hoher Belegungsgrade gewachsen. Der einzige Ausweg ist dann, das Klimagerät seriell zum Heizer hinzuschalten. Das Klimagerät wirkt dabei als Entfeuchter: beim Abkühlen auf knapp oberhalb 0°C im Klimaverdampfer kondensiert Wasserdampf aus der Luft. Der Energieaufwand ist beträchtlich, da die Luft nach dem Kühlen wieder auf Solltemperatur erwärmt werden muss (wobei auch ein erhöhter Frischluftmassenstrom alleine schon zu einer erhöhten Heizlast führt). Noch energieintensiver ist nur das Abtauen einer Eis- oder Schneeschicht von den Scheiben alleine mittels des Heizlüfters. Dies sind seltene Ereignisse; das Effizienzsteigerungspotential ist dementsprechend gering, auch da sie sich wegen ihrer Sicherheitsrelevanz schwer vermeiden lassen.

Im Endeffekt zeigt sich, dass alleine das Wetter die Heiz- und Kühllast bestimmt. In Kombination mit der Last am 12 Volt Netz kann die Nebenaggregatslast über eine Fahrt hinweg also als Bandlast betrachtet werden, deren Wert alleine von der Aussentemperatur abhängt. Somit ist der mittlere Einfluss der Nebenaggregatslast klimaabhängig und schwankt saisonal. Die mittlere Antriebslast hingegen hängt von der Durchschnittsgeschwindigkeit ab. Für das in Abbildung 23 abgebildete Elektrofahrzeug entspricht die Nebenaggregatslast im Betrag der Antriebslast bei 10 km/h. Mit steigender Geschwindigkeit wächst die Antriebslast relativ zur Nebenaggregatslast und wird bei Geschwindigkeiten über 80 km/h dominant. Das Resultat ist ein, ähnlich dem in Abbildung 22 dargestellten verbrennungs-motorischen CNG Antrieb, zu tiefen Geschwindigkeiten ansteigender spezifischer Gesamtenergiebedarf. Intuitiv ist das ein Ausdruck der Tatsache, dass die Nebenlastenergie sich über Zeit akkumuliert, wogegen die Antriebslast primär über Distanz wächst. Im Gegensatz zu verbrennungsmotorischen Antrieben tritt dieses Verhalten beim Elektroantrieb aber erst durch die Nebenaggregatslast auf. Es lohnt sich also in die Vermeidung dieser Lasten zu investieren.

4.4.2 Phänomenologische Modellierung der Heiz- und Kühllast

In Kapitel 4.4.1 wurde eine Wetterabhängigkeit der Heiz- und Kühllast festgestellt. Um ein tieferes Verständnis der Ursachen zu entwickeln, wurde ein am ETHZ-LAV entwickeltes Modell [22] des HKL Systems und der Thermodynamik der Fahrzeugkabine auf die Messdaten angewandt. Das Modell beschreibt die Fahrzeugkabine als einen Satz homogener thermischer Massen, die die inneren und äusseren Teile der Kabine (wie das Dach, die Sitze, etc.) sowie die darin gefangene Luft repräsentieren. Die Massen kommunizieren untereinander über Konvektion, Wärmeleitung und

Strahlung. Das HKL System kann Luft wahlweise aus der Kabine oder der Umgebung ansaugen und in die Kabine leiten; dabei lässt sich die Temperatur über die Klima- und Heizungswärmetauscher verändern. Ein geschlossener Regelkreis steuert diesen Prozess an und zwingt die Lufttemperatur im Kabineninnern auf eine konfigurierbare Solltemperatur.

Entgegen dem HKL Betrieb in Gebäuden, verbringen Fahrzeuge die meiste Zeit abgestellt im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung, nur um dann kurzfristig für die Dauer einer Fahrt auf Komforttemperatur aufgewärmt resp. abgekühlt zu werden. Dabei muss nicht nur die Kabinenluft auf Temperatur gebracht werden, sondern alle Gegenstände die mit ihr in Kontakt kommen. Deswegen sollte der Heiz- und Kühlenergiebedarf nicht nur, wie in Gebäuden, vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Hülle und der Temperaturdifferenz von der Komfort- zur Umgebungstemperatur abhängen, sondern auch der Dynamik der Aufwärmung der sogenannten inneren Massen wie z.B. Sitzen, dem Armaturenbrett und so weiter.

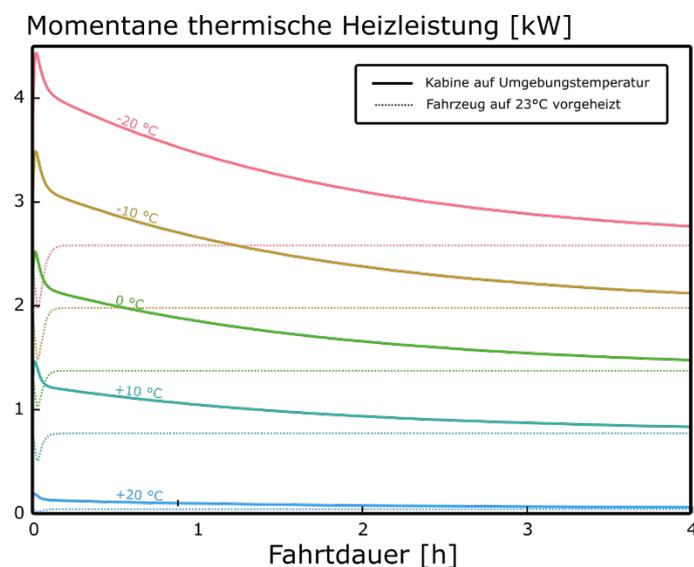


Abbildung 24: Simulierter momentaner Heizbedarf über eine lange Fahrt, bei konstanter Aussentemperatur. Dabei beginnt die Kabine die Fahrt im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung (durchgezogene Linien) oder bereits auf Komforttemperatur (23°C) vorgewärmt (gepunktete Linien).

Um das zu überprüfen wurde das Modell über Abklingversuche auf den VW e-Golf Fahrzeug kalibriert. Dazu wurde das Fahrzeug in der Klimakammer zuerst vollständig auf die kontrollierte Umgebungstemperatur abgekühlt; anschliessend wurde ein Heizlüfter im Innenraum aktiviert, um die Antwort der Innenraumtemperatur auf den Heizenergieeintrag zu beobachten. Das so kalibrierte Modell wurde mit den von der e-Golf Bordelektronik gemessenen Wetterdaten (Umgebungstemperatur) aufgesetzt und mit der Energiemessung verglichen. Abbildung 27 bestätigt die sehr gute Übereinstimmung im Mittel, wenn auch in einzelnen Fällen sehr starke Abweichungen aufgetreten sind. Wir vermuten die Ursache in nicht beobachtbaren Phänomenen, wie Fahren mit geöffneten Fenstern oder dem Einsatz des Frontscheibenenteisers.

Abbildung 24 veranschaulicht den dynamischen Effekt der Aufwärmung der inneren Massen über den momentanen Heizenergiebedarf: wurde das Fahrzeug in der Simulation bei Fahrtbeginn bereits auf Komforttemperatur vorgeheizt (gepunktete Linien), so pendelte sich der Leistungsbedarf beim stationären Verlust durch die Hülle ein. War die Anfangstemperatur der Kabine jedoch tiefer, so muss der Wärmeverlust an die kalten thermischen Massen im Inneren durch zusätzlichen Heizenergieeintrag kompensiert werden. Dieser Prozess braucht Zeit und erhöht die

Leistungsnachfrage über den stationären Wärmeverlust hinaus. Der Unterschied zwischen dem vorgeheizten und dynamischen Fall ist zu Fahrtbeginn am grössten und nimmt dann exponentiell ab. Das heisst im Mittel über eine Fahrt ist der Effekt umso wichtiger, je kürzer die Fahrtdauer. Die zu Fahrtbeginn in Abbildung 24 beobachtbaren Spitzenlasten sind der Versuch der HKL-Steuerung, die kalte Kabinenluft möglichst schnell durch Wärmere zu ersetzen. Damit divergiert die Bedarfskurve von einem exponentiellen Abfall. Mit Ausnahme extrem kurzer Fahrten (unter 5 Minuten) ist der Unterschied energetisch vernachlässigbar.

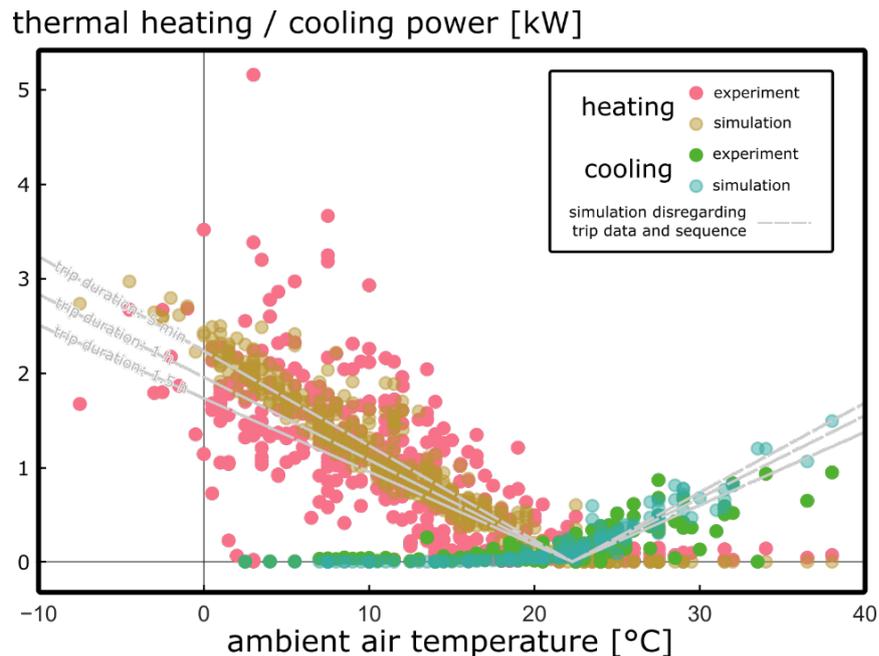


Abbildung 25: Simulierter, mittlerer Heiz- und Kühlenergiebedarf des physikalischen Fahrzeugkabinenmodells bei der effektiv aufgezeichneten Aussentemperatur, verglichen mit den im Feldversuch aufgezeichneten mittleren Energiebedarf. Graue Linien: Heiz- und Kühlenergiebedarf als Funktion der Fahrtdauer, bei konstanter Umgebungstemperatur und angenommener eingestellter 23°C Solltemperatur.

Wird für eine gegebene Fahrtdauer der Mittelwert über den momentanen Wärmebedarf in Abbildung 24 genommen, so ergeben sich die grauen Kurven in Abbildung 25. Sie zeigen den Effekt der Fahrtdauer deutlich, allerdings nur bei sehr tiefen Temperaturen. Die Kurven vernachlässigen im Feldversuch aufgezeichnete Sekundendaten, wie lokale Temperaturschwankungen oder die Wahl einer anderen Komforttemperatur durch die Fahrzeuginsassen. Deshalb zeigt der Vergleich mit den Messwerten und der mit den detaillierten Feldversuchsdaten nachgerechneten Wärmeenergiebedarf z.T. signifikante Abweichungen. Da die durchschnittliche Unterwegszeit in der Schweiz im Auto unter 35 Minuten liegt [4] und Temperaturen weit unter null im Schweizer Flachland selten sind, kann der Unterschied über eine breite Flotte vernachlässigt werden.

Der Heizenergiebedarf kann somit, ähnlich zu Heizgradtagen im Gebäudebereich, proportional zur Differenz der Aussentemperatur zur Komforttemperatur modelliert werden. Die Proportionalitätskonstante beinhaltet dabei nicht nur den stationären konvektiven und konduktiven Wärmeübergang durch die Fahrzeughülle, sondern auch den mittleren dynamischen Energiebedarf zur Aufwärmung der inneren Massen. Mit diesem Wissen konnte der Kapitel 4.4.1 oben Nebenaggregatsenergie aufgeteilt werden in die Konstantlast der Konsumenten am 12 Volt Bordnetzes sowie den temperatur-abhängigen Teil des HKL-Systems.

4.4.3 Realverbrauchsfaktoren

Das in Kapitel 4.4.1 erläuterte Modell schätzt den mechanischen, elektrischen und gegebenenfalls thermischen Energiebedarf um ein Fahrzeug unter Realbedingungen zu betreiben (inkl. seiner nicht-antriebsrelevanten Nebenaggregate). Mit den in Kapitel 4.3 hergeleiteten Willans-Geraden übersetzen wir das in den resultierenden Endenergiebedarf für alle verfügbaren Antriebsformen an. Abbildung 26 links zeigt die Abhängigkeit des Realverbrauchs mit der mittleren Fahrtgeschwindigkeit für das in der Schweiz repräsentative Mittelklassefahrzeug; analog zu den Ausführungen in Kapitel 4.4.1 sind alle anderen Einflussfaktoren beim über den Feldversuch beobachteten Mittelwert fixiert.

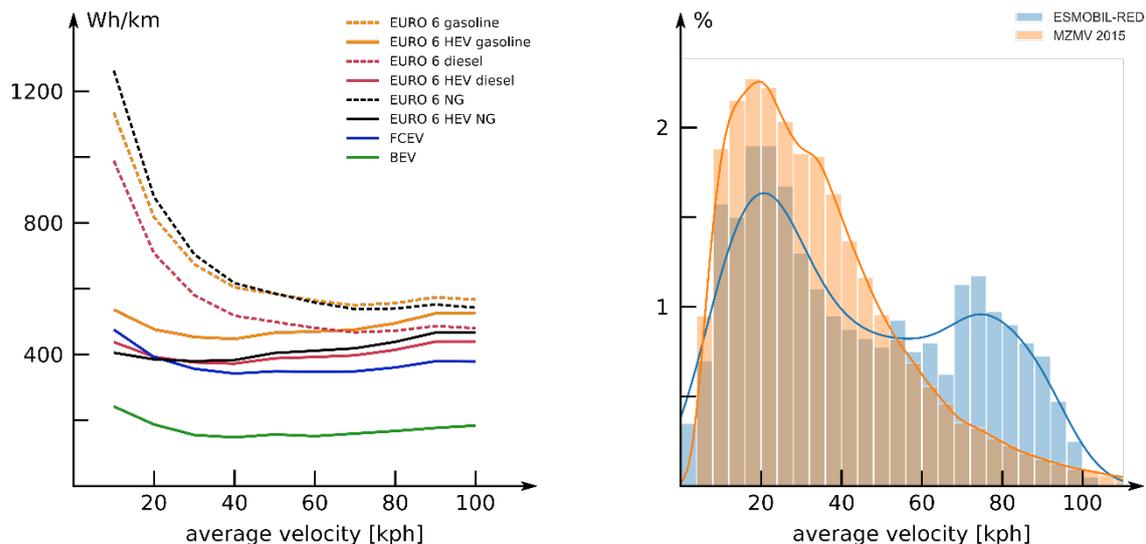


Abbildung 26: Links: Modellierte Verbrauchsangaben über alle im Feldversuch aufgezeichneten Fahrprofile (inkl. Nebenaggregateinfluss) für alle untersuchten Antriebsarten. Rechts: Nutzungsverteilung von Fahrzeugen im Projekt und repräsentativ für die Schweiz (MZMV 2015). Quelle: [15]

Wie in Kapitel 4.4.1 diskutiert, ist eine solche parametrische Darstellung von Interesse bei verkehrlichen und fahrzeugtechnischen Bewertungsaufgaben. Als Kernfrage dieses Projektes interessierte uns aber allgemein, wie gross die Abweichung bei alternativen Fahrzeugen zwischen dem Realverbrauch und dem Normverbrauch ist. Dafür bezifferten wir den sogenannten Realverbrauchsfaktor: er misst die mittlere Erhöhung des Verbrauchs unter Realbedingungen, relativ zum Normverbrauch gemäss WLTP. Wir berechneten den Mittelwert über die gesamte Schweizer Flotte, in dem wir den Faktor als Mittel des geschwindigkeitsabhängigen Realverbrauchs (Abbildung 26 links) betrachteten, gewichtet nach der auf Schweizer Strassen erwarteten Durchschnittsgeschwindigkeitsverteilung. Letztere entnahmen wir der national repräsentativen Befragung des *Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (MZMV)* als Verteilung der mittleren PW-Etappengeschwindigkeit. Abbildung 26 rechts vergleicht sie mit der Verteilung der mittleren Geschwindigkeit über alle im ESMOBIL-RED Feldversuch aufgezeichneten Fahrten. Die in Kapitel 4.2.1 angedeutete Verzerrung zu hohen Geschwindigkeiten ist deutlich ersichtlich.

Um die das Ausmass der nicht-Repräsentativität der Feldstudie zu verdeutlichen, zeigt Tabelle 2 die berechneten Realverbrauchsfaktoren für die Verteilung im ESMOBIL-RED Feldversuch und den Mikrozensus.

Es zeigt sich, dass der Realverbrauchsfaktor der konventionellen Antriebe leicht über 1.2 liegt, was sich mit den Erkenntnissen des ICCT [12] deckt. Ähnliche Werte wurde bei allen regenerationsfähigen, alternativen Antrieben beobachtet. Beim Elektroauto war die Abweichung besonders hoch, wenn die Ladeverluste mitberücksichtigt wurden. Analog den Willans-Koeffizienten in

Kapitel 4.3.1 gilt für Plug-in Hybride der Wert des entsprechenden HEV im Hybridbetrieb und der BEV Wert für den Elektrobetrieb.

Tabelle 2: Realverbrauchsfaktoren nach Technologie, Fahrzeugnutzung (Verteilung in mittlerer Geschwindigkeit) und Betrachtung der Mittelung

Geschwindigkeit gemäss:	Feldversuch	Mikrozensus
EURO 6 gasoline	1.17	1.22
EURO 6 diesel	1.16	1.22
EURO 6 CNG	1.13	1.20
EURO 6 HEV gasoline	1.35	1.30
EURO 6 HEV diesel	1.36	1.31
EURO 6 HEV CNG	1.39	1.32
FCEV	1.30	1.28
BEV* (inkl. Ladeverluste)	1.27	1.25

*) inklusive Verluste im Ladegerät und der Batterie (siehe Kapitel 4.3.2)

Die Diskrepanz zwischen den beiden Gewichtungsmethoden (Mikrozensus oder ESMOBIL-RED Feldversuchdaten) war gering. Wenigstens energetisch sind die Feldtestdaten also eine brauchbare Approximation. Bei konventionellen Antrieben führte der höhere Anteil tieferer Geschwindigkeiten des Mikrozensus gegenüber dem Feldversuch erwartungsgemäss zu erhöhten Realverbrauchsfaktoren (im Schnitt 5 Prozentpunkte). Bei rekuperationsfähigen Fahrzeugen war es genau umgekehrt, wobei der Unterschied bei rein elektrischen Fahrzeugen marginal war (unter 2 Prozentpunkten). Bei Hybriden produzierte der Mikrozensus im Schnitt um 5 Prozentpunkte tiefere Faktoren. Die augenscheinliche Ursache ist, dass die Verbrauchskurven der Hybride in Abbildung 26, als einzige Technologie im Feld, ihr Verbrauchsmaximum bei den höchsten Geschwindigkeiten erreichen. Das liegt am Zusammenspiel zwischen dem gegenüber dem konventionellen Fahrzeug erhöhten Gewicht und der tieferen elektrischen Nebenaggregatslast (das HKL System kann direkt ab dem Motor mit thermischer und mechanischer Energie versorgt werden).

4.5 Optimale Flottenzusammensetzung

Abbildung 27 zeigt, welchen Antrieb jeder Fahrzeughalter je nach Fahrleistung an einem gegebenen Tag wählen sollte, wenn die ganze Flotte über Nacht ausgetauscht würde um ein Maximum an CO₂ einzusparen. Zur Erinnerung: wie in Kapitel 3.3 diskutiert, kann dies als bestmöglicher Zustand am Ende der Energiewende im PW-Sektor verstanden werden, wenn die Nachfrage sich nicht verändert. Jetzt ist der Punkt aber nicht diesen Endzustand vorherzusagen — bis dahin ist alles möglich. Es geht darum aus heutiger Sicht sinnvolle Ziele zu setzen.

In der Darstellung sind WTW (well to wheel) Emissionen angegeben, sprich die Betriebsemissionen zuzüglich der Emissionen bei der Bereitstellung des Energieträgers, wie dem Eigenbedarf der Raffinerie und der Elektrizitätsproduktion. Mögliche Veränderungen der Stromversorgungssituation in der Schweiz werden über die Stellvertretervariable der mittleren CO₂-Intensität der zum PW-Betrieb eingesetzten Elektrizität erfasst. Im Folgenden verwenden wir den Begriff Elektrizitätsmix und CO₂-Intensität der eingesetzten Elektrizität deshalb synonym.

In Abbildung 27 ergeben sich 6 Regionen aufgeteilt auf 3 Regimes. Über rund 600 g/kWh sind Erdgas-Hybride in allen Fällen die CO₂-effizienteste Lösung (Region I). Unabhängig des Elektrizitätsmixes unterbieten sie konventionelle Diesel- und Benzinantriebe. Über 600 g/kWh wird es zusätzlich effizienter, Gas an Bord zu verbrennen als den Umweg über den Elektrizitätssektor in Kauf zu nehmen. In der Übergangsregion zwischen 450–600 g/kWh (Region II) wird Parität mit einem Gaskraftwerk erreicht, was auf gewissen Distanzen elektrischen Antrieben einen, meist nur marginalen, Vorteil gibt.

Der erste Regimewechsel erfolgt unterhalb 450 g/kWh. Hier wechselt die Flottenzusammensetzung von verbrennungsmotorischen Antrieben (Region I) zu Vollelektrifizierung. Dazu kommen BEVs für durchschnittliche Mobilitätsbedürfnisse zum Einsatz (Region V), sowie Gas-PHEV für Viel- (Region III) und Wenigfahrer (Region VI).

Vielfahrer (Region III) profitieren von einer CO₂ Reduktion durch den Elektrizitätseinsatz des PHEV, fallen dann aber auf Erdgas zurück. Der Hauptgrund für ihre Wahl war die im speziellen Fall unzureichende Reichweite des BEV, gemäss unserer heuristischen Antriebsauslegung (siehe Kapitel 3.3). Alternativ konnte, in einem vom Elektrizitätsmix und der Reichweite abhängigen Grenzbereich, der in der Regel (siehe Kapitel 3.3) leichtere PHEV einen CO₂-Vorteil auf das BEV ausspielen, trotz minimalem Gaseinsatz. PHEV haben also eine Berechtigung. Das heisst nicht, dass sie zwingend erforderlich sind. Unsere Auslegeordnung orientiert sich an heutigen Designvorstellungen. So könnten technologischer Fortschritt oder eine dichte Ladeinfrastruktur den BEV Anteil weiter erhöhen.

Auffällig ist die PHEV-Wahl für Wenigfahrer in Region VI: diese PHEV fahren nie im reinen Verbrennungsmodus. Ihre gegenüber BEV kleinere Batterie macht sie leichter und damit minimal effizienter; für den rein CO₂-fokussierten Algorithmus ist das ausschlaggebend. Faktisch sind diese PHEV also BEV mit kleineren Batterien. Aus Kundensicht scheint das irrational: ein BEV sollte immer das preisgünstigere rein-elektrische Fahrzeug sein. Hintergrund ist, dass unser Algorithmus kein Kaufverhalten abbildet. Die Aussage ist nicht, dass ein gewisser Antrieb für eine bestimmte Person das Optimum darstellt. Die Idee ist, dass der gegebene Satz Technologien über die Schweizer Flotte mit ihren täglichen Anforderungen in der gegebenen Konfiguration das CO₂-Optimum erreicht. Ob und wie man Kunden zu den entsprechenden Einzelkäufen überzeugt, ist eine andere Frage. Unsere Interpretation von Region VI ist deswegen, dass es ökologische Gründe gibt, innerhalb der BEV Technologie über Varianten mit kürzerer Reichweite nachzudenken; es heisst auf keinen Fall, dass auf kurzen Strecken (und einem Elektrizitätsmix unter 450 g/kWh) Gas eingesetzt werden sollte.

Der zweite Regimewechsel passiert unterhalb 250 g/kWh: hier übernehmen Brennstoffzellen-PHEV (Region IV) die Rolle der Gas-PHEV für Vielfahrer (Region III). 250 g/kWh ist damit der Punkt, wo die Emissionen der Stromproduktion tief genug sind, dass sie den zusätzlichen Elektrizitätsbedarf wegen der Verluste der Wasserstoffproduktion gegenüber Gasverbrennung kompensieren. Analog zu Region III könnten Infrastrukturausbau und technologischer Fortschritt diese PHEV überflüssig machen. Es sei daran erinnert, dass wir hier einen hypothetischen Endzustand der Energiewende im PW Sektor in ferner Zukunft anschauen. Das soll also nicht heissen, dass PHEV in der Übergangsperiode als Brückentechnologie keine wichtige Rolle zu spielen hätten.

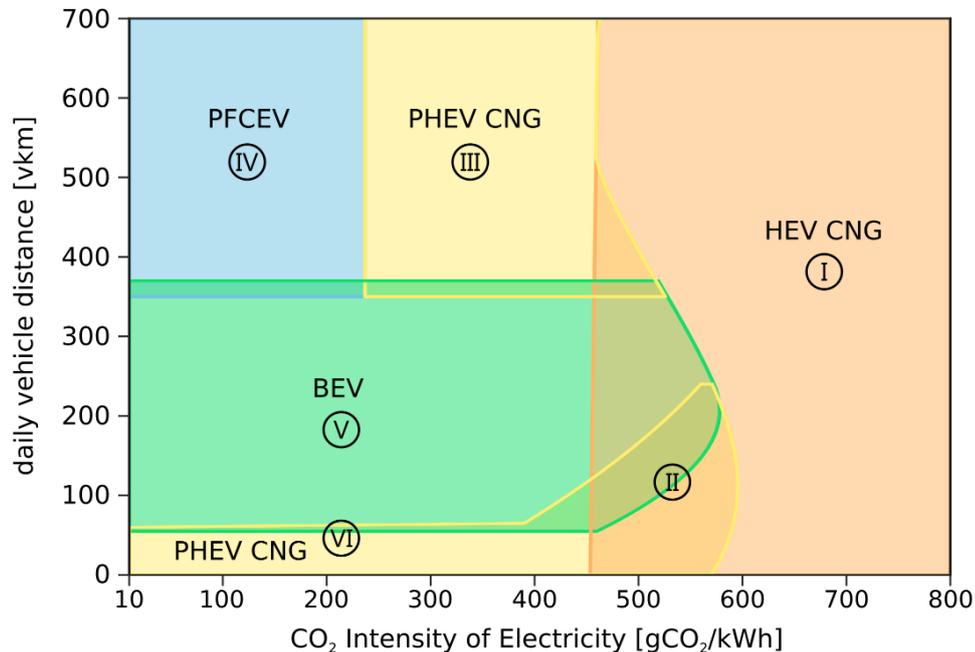


Abbildung 27: CO₂-optimale Antriebstechnologie abhängig von der täglichen Fahrdistanz und CO₂-Intensität der Ladeelektrizität. Quelle: [18].

Die auf grossen Distanzen durch PHEV benötigten chemischen Treibstoffe in Region III und IV war sehr gering. Das wirft die Frage auf, ob es sich lohnt die notwendige Infrastruktur aufzubauen respektive aufrecht zu erhalten. Der ideale Weg wäre wohl, die betroffenen Fahrer zu überzeugen auf den ÖV auszuweichen. Die einfachere und für diese Analyse interessantere Alternative wäre schlicht eine suboptimale Reduktion zu akzeptieren. Um das zu erforschen zeigt Abbildung 28 das Reduktionspotential und den Elektrizitätsbedarf der CO₂-optimalen PW-Flotte bei verschiedenen Elektrizitätsmixes, wenn bei der Antriebswahl gewisse Technologien ausgeschlossen wurden.

Alle Varianten, inkl. der vorangehend Diskutierten mit allen Technologien, zeigen den gleichen Verlauf: die marginale CO₂-Reduktion ist anfänglich relativ gering gegenüber dem marginalen zusätzlichen Elektrizitätsbedarf aber wächst immer schneller an. Dies entspricht der progressiven Substitution von Gas-HEV mit PHEV und BEV. Der nichtlineare Effekt entsteht, da nicht nur immer mehr Fahrzeuge elektrifiziert werden, sondern gleichzeitig die CO₂-Intensität für alle bereits elektrifizierten Fahrzeug abnimmt. Ab ca. 400 g/kWh gehen die Kurven in allen Varianten in die Vertikale über. Das entspricht einer vollelektrifizierten Flotte, deren CO₂-Billanz direkt von der CO₂-Intensität der Elektrizitätsmix abhängt. Stehen PHEV-Brennstoffzellenfahrzeuge zur Verfügung, so wechseln Vielfahrer ab ca. 200-300 g/kWh fast übergangslos auf Wasserstoff-PHEV, was sich in einen zusätzlichen Elektrizitätsbedarf für Wasserstoffelektrolyse übersetzt

Ohne Wasserstoff ergab sich eine minimal tiefere Reduktionswirkung, da Vielfahrer immer noch auf Erdgashybride setzen mussten; hingegen steigt der Elektrizitätsbedarf bei tiefen CO₂-Intensitäten nicht an. Standen nur HEV und Gas-PHEV zur Verfügung, war die maximale Reduktionswirkung bedeutend tiefer, jedoch bei fast 30% reduziertem Zusatz-Elektrizitätsbedarf. Wurde Gas als Treibstoff ausgeschlossen, führte das ab 200 g/kWh nahe an die beste Reduktionswirkung, bei nur leicht erhöhtem Elektrizitätsbedarf.

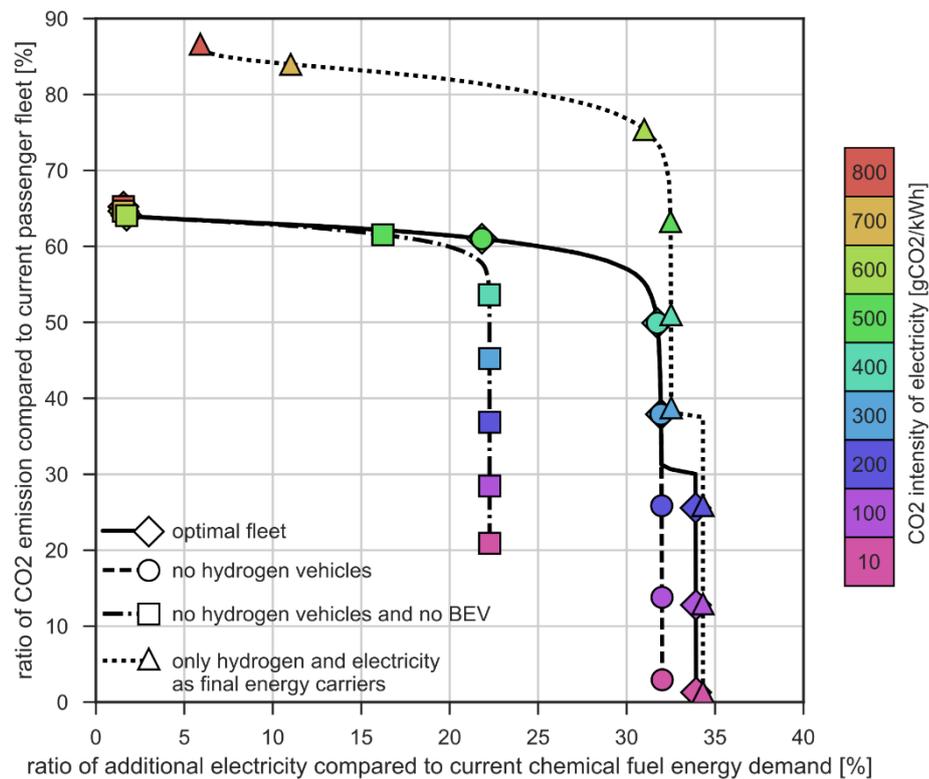


Abbildung 28: CO₂-Reduktionen und Energiebedarf über die optimale Flotte, und alternative Pfade. Quelle: [18].

Wir beobachten, dass die optimale Flottenkonfiguration unterhalb einem Elektrizitätsmix von 400 g/kWh in jedem Fall Vollelektrifizierung (zuzüglich Plug-in Hybride) war, wenn auch verschiedene Elektrifizierungspfade in Frage kamen. Unterhalb dieser Schwelle führte eine Verbesserung der CO₂-Intensität zu einer proportionalen CO₂-Reduktion, selbst bei gleichbleibender Flottenkonfiguration. Der Schweizer Konsumentenmix liegt seit Jahren weit unter 200 g/kWh und damit weit unter dem Schwellenwert. Das schafft einen Puffer gegen den bevorstehenden Atomausstieg (siehe Kapitel 1.1.1). Vollelektrifizierung ist also ein erstrebenswerter Endzustand für die Schweiz, welcher gegenüber Veränderungen des Elektrizitätsmixes robust ist. Nichtsdestotrotz muss das Ziel des Elektrizitätssektors bleiben, die CO₂-Intensität so tief wie möglich zu bringen, da die effektive Reduktionswirkung proportional zu ihr ist.

4.6 Flottenszenarien

Kapitel 4.5 identifizierte die Vollelektrifizierung als sinnvolle Dekarbonisierungsstrategie für die Schweizer Flotte. Wie in Kapitel 1.1.3 diskutiert, bleibt die Frage, ob dieser Zustand schnell genug erreicht werden kann um die Klimaziele der Schweiz zu erreichen. Dazu betrachten wir im Folgenden die Resultate der in Kapitel 3.4.3 vorgestellten Szenarienanalysen der Schweizer Flotte.

Abbildung 29 zeigt die kumulierten, direkten CO₂ Emissionen der PW Flotte im Referenzszenario ab 2018 bis zum Erreichen einer netto emissionsfreien Flotte in 2054. Die drei Szenarien T1-T3, welche die aktuellen Flottenziele der EU widerspiegeln, haben das Budget von 110 Mt bis über 100 % überschritten. Nur Szenario C mit seinem radikalen Absenkpfad konnte den Zielwert annähernd erreichen. Es erreichte bereits 2035 stagnierende kumulative Emissionen, sprich netto null Emissionen. Das ist fast 20 Jahre vor Szenario T1

Einer der Hauptursachen sind die Emissionen der vor 2019 immatrikulierten Fahrzeuge: sie beanspruchten 54 Prozent des Budgets auf sich alleine. Da jedes neuzugelassene Fahrzeug im Schnitt für über ein Jahrzehnt in der Flotte bleibt, müssen die mittleren spezifischen Emissionen zukünftig neuzugelassener Fahrzeuge einem extrem steilen Absenkpfad folgen, um mit dem verbleibenden Budget auszukommen (siehe auch Kapitel 4.5 **Error! Reference source not found.** über die Zusammensetzung der Neuwagenflotte).

Wenn die Budgetziele erreicht werden sollen, ergeben sich 2 Pfade: zunächst kann man versuchen, den Marktanteil der Elektromobilität zu erhöhen. Dabei ist das verwendete Szenario (extrapolierte Marktentwicklung in Norwegen) bereits als sehr optimistisch zu bewerten. Alternativ kann an der bestehenden Flotte angesetzt werden: Abwrackprämien beschleunigen die Flottenerneuerung und können damit das eingeschlossene CO₂ reduzieren. Alternativ können Diesel- respektive benzinähnliche synthetische Treibstoffe aus erneuerbaren Energieträger konventionelle Fahrzeuge in Null-Emissionsfahrzeuge umfunktionieren.

Zu alle dem muss gesagt werden, dass das Budget selbst nicht als absolutes Mass angesehen werden darf. Zunächst liegt der Grenzwert im 2°C Ziel oberhalb aller Szenarien und macht die bestehende EU Flottenszenarien zu einem zielführenden Weg. Des Weiteren ist das Budget keine harte Grenze. Ein Überschreiten bedeutet lediglich, dass der Schweizer PW-Sektor nicht mehr seinen proportionalen Anteil erfüllt und so jemand anders potentiell höheren Aufwand betreiben muss.

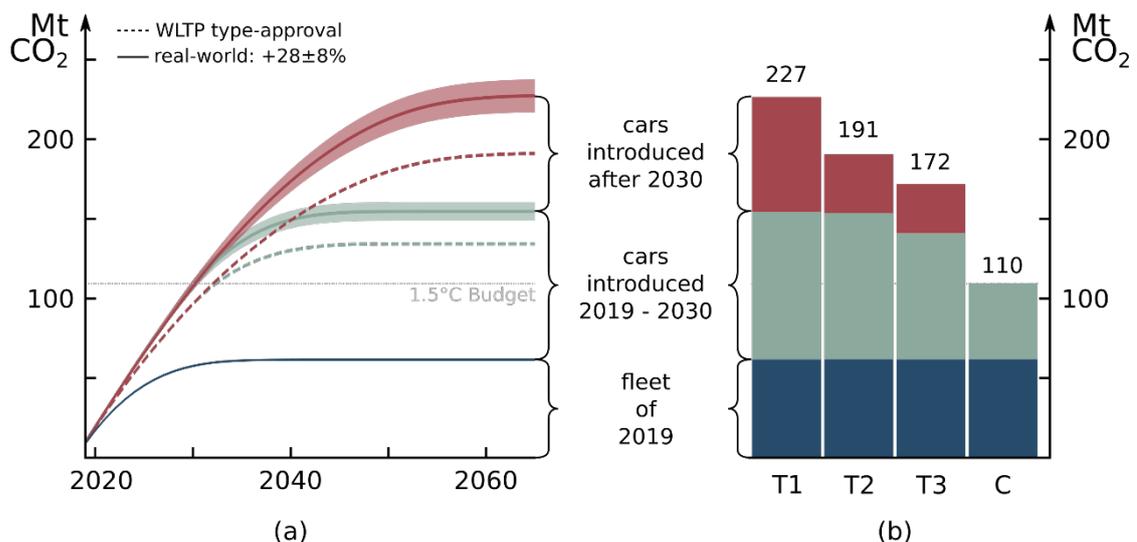


Abbildung 29: Links: Kumulierte, direkte CO₂ Emissionen der PW-Flotte im Referenzszenario T1. Die gestrichelte Linie nimmt Normverbräuche an, die durchgezogene Linie Realverbräuche (siehe Kapitel 3.2.3) und die eingefärbte Fläche zeigt die Varianz des Realverbrauchs. Rechts: Gesamtemissionen bis 2065 in allen Szenarien (siehe Tabelle 1). Die Farben zeigen die CO₂ Emissionen der Unterflotte der vor 2019 (blau), zwischen 2019 bis 2030 (grau) und nach 2030 (rot) zugelassenen Fahrzeuge.

5 Schlussfolgerungen und Fazit

ESMOBIL-RED verdeutlichte die grosse Abweichung zwischen Norm- und Realverbrauch: im Schnitt liegt zwischen beiden ein Faktor 1.2 bis 1.3 (gemäss WLTP). Auch elektrisch angetriebene Fahrzeuge bleiben von diesem Effekt nicht verschont.

Der in ESMOBIL-RED entwickelte mittlere «Willans»-Ansatz zeigte sich als ein flexibles Instrument für Verbrauchsabschätzungen, das sowohl auf beliebige Fahrzeuge als auch Fahrsituationen angewendet werden kann. Von der Norm abweichende Fahrsituationen zeigten sich als die Hauptursache für Abweichungen zwischen Norm- und Realverbrauch: relevant war dabei nicht nur das Fahrverhalten, sondern auch die Topographie. Abweichendes Fahrverhalten konnten wir über die relative Durchschnittsgeschwindigkeit und die mittlere, positive Beschleunigung quantifizieren; den Einfluss der Topographie über die durchschnittliche, positive Steigung. Es sei angemerkt, dass dieser Effekt unabhängig ist vom Antrieb — auch alternative Antriebsarten sind also von einer Diskrepanz zwischen Norm- und Realverbräuchen betroffen. Allerdings reagieren nicht alle Antriebe gleich sensibel auf eine erhöhte Antriebslast.

Der Energiebedarf nicht-antriebsrelevanter Nebenaggregate wurde als zweite, wesentliche Fehlerquelle zur Norm identifiziert. Diese zusätzliche Last liess sich aufteilen in eine konstante Bandlast und den temperaturabhängigen Beitrag des Heiz-, Kühl-, und Lüftungssystem (HKL). Da konventionelle Fahrzeuge mit Abwärme heizen, sind sie nur von der Kühllast betroffen, die auf Grund der lokalen Wetterbedingungen im Experiment tief ausfiel. Batterieelektrische Fahrzeuge zeigten insbesondere bei tiefen Temperaturen einen erhöhten Energiebedarf.

Die Szenarienanalysen zeigten, dass die Schweizer PW Flotte fast vollständig elektrifizierbar ist. Selbst mit Strom aus Gaskraftwerken lassen sich die CO₂-Emission gegenüber der heutigen Situation reduzieren – unter Vernachlässigung der investierten Energie bei der Produktion der Fahrzeuge und der notwendigen Infrastruktur. Wurde hingegen die Dynamik berücksichtigt, mit welcher Neufahrzeuge in die Flotte kommen, zeigte sich, dass die in der Vergangenheit verkauften Fahrzeuge lange in der Flotte bleiben. Das über ihre Lebensdauer emittierte CO₂ ist ein grosses Hindernis bei der Dekarbonisierung der Flotte. Aus klimapolitischer Sicht ist es also erstrebenswert nicht nur die Neuwagenflotte zu reglementieren, sondern auch eine schnelle Umwälzung der bestehenden Flotte und die Einführung erneuerbarer synthetischer Treibstoffe.

Der ESMOBIL-RED Ansatz bewährte sich damit als flexibles, rechnerisch effizientes Modell für Energieeffizienz betrachtungen auf Flottenebene. Sofern technische Grundparameter bekannt sind erlaubt es den Energiebedarf eines beliebigen Fahrzeugs zu schätzen. Dabei ist das Modell nur so gut wie seine Kalibrierung: umso genauer technische Parameter wie z.B. das Gewicht oder die Aerodynamik bekannt sind, umso genauer die Vorhersage. Obere Grenzen sind gesetzt durch die Auflösung des Willans-Modells selbst, welches den Antrieb über die getestete Leistungsspanne approximiert. Bei sehr tiefen oder sehr hohen Lasten ist mit signifikanten Abweichungen zu rechnen. Das gilt auch für die Auflösung: unser Ansatz gilt für den ganze Antrieb über gemittelte Fahrten mehrere Minuten. Für sehr kurze oder gar momentane Betrachtungen, wie z.B. für reglungstechnische Anwendungen, ist der Ansatz nicht geeignet (dafür könnten aber Willans-Approximationen der Komponenten benutzt werden). Sind diese Bedingungen erfüllt kann ein beliebiges Fahrprofil mit dem Modell verwendet werden, inklusive im Betrieb erhobene Realdaten (evtl. Messrauschen muss vorher bereinigt werden). Sinnvolle Applikationen sind also eher langsame, nutzerorientierte Applikationen wie die Schätzung der verbleibenden Reichweite oder die Vorberechnung des erwarteten Ladebedarfs in einer Smart-Charging Lösung.

Sind keine Realdaten verfügbar, so kann das Realverbrauchsmodell den WLTC für erwartete Störgrossen wie die effektive Durchschnittsgeschwindigkeit, das Beschleunigungsverhalten und die

Strassentopographie korrigieren. Das Modell stützt sich dabei auf die Empirie des Flottenversuches. In seinen Grundzügen, z.B. bei der Beschreibung des Einflusses der Geschwindigkeit oder der Aussentemperatur ist das Modell durchaus phänomenologisch und deswegen extrapolierbar. Allerdings richtet sich die Parametrisierung komplett nach dem Feldversuch. Was also z.B. ein besonders defensives oder aggressives Fahrverhalten darstellt ist nur so repräsentativ wie der Feldversuch selbst. Bei einem Einsatz z.B. im Flottenmanagement sollten also unbedingt zusätzliche Daten im Betrieb erhoben werden um die Repräsentativität zu gewährleisten.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Der Fokus von ESMOBIL-RED war die Entwicklung des flexiblen Energiemodells für alle gängigen Antriebsformen sowie die Methodikentwicklung auf der Flottenseite. Dazu gehören auch in diesem Bericht weniger detailliert beschriebene Aspekte wie die Beschreibung der Nachfrage und die Regressionsanalyse auf den Realverbrauchsdaten. Die direkt aus dem Projekt entstandenen wissenschaftlichen Publikationen (siehe Kapitel 9) gehen tiefer ins Detail.

Die Abschätzung des Energiebedarfs realer und hypothetischer Flotten hat diverse Applikationen, sowohl in der Energieforschung, der strategischen Planung in Industrie und Politik aber auch in konkreten praktischen Anwendungen.

Auf akademischer Seite eröffnet der ESMOBIL-Ansatz das Studium der Energieintegration zukünftiger Mobilitätsformen. Erster Nutzer ist das CCEM Projekt «Electricity Based Mobility». Es verwendet den ESMOBIL Flotten- und Fahrzeugansatz zur Bestimmung marginaler CO₂-Emissionen der Ladelektrizität in der Schweiz. In diesem Rahmen erforscht eine Doktorarbeit am ETHZ-LAV die in ESMOBIL-RED vernachlässigte Möglichkeit, Elektroautos auch während des Tages nachzuladen, beispielsweise an öffentlichen oder durch den Arbeitgeber zur Verfügung gestellten Ladestationen. Eng damit verknüpft ist eine Zusammenarbeit mit dem ETHZ-PSL und Adaptricity im Rahmen des SCCER mobility. Dabei wird eine vereinfachte Variante des ESMOBIL Ansatzes mit der Adaptricity Verteilnetzsimulation kombiniert, um die Widerstandsfähigkeit des Verteilnetzes gegenüber einer unbekanntem Elektromobilitätslast zu überprüfen. Eine weiterführende Anwendung ist das ETH/Audi-Projekt «future mobility». Es erweitert das Energiemodell um die Grauemissionen der Fahrzeugproduktion und öffnet den Horizont von der Schweiz auf den europäischen Kontext. Im Fokus steht die Rolle sogenannter «e-fuels» oder «power-fuels» bei der Erreichung der europäischen Klimaziele. Dabei wird insbesondere die Beschreibung der Nachfrage auf Europa erweitert.

Aktuell läuft in diesem Kontext eine Reihe Studentenprojekte am ETHZ-LAV, die das ESMOBIL-RED Energiemodell mit Kosten- und LCA-Modellen erweitern. Ist der Energiebedarf bis bekannt, lassen sich die Betriebskosten einfach schätzen. Dank dem ESMOBIL-Ansatz sind zukünftige Technologieentwicklungen dabei leicht abzubilden; umgekehrt können auch technologische Anforderungen überprüft werden, wie welche Kapazität (und damit Kosten) die Batterie eines BEV haben muss um gewisse Leistungsanforderungen zu erfüllen. Mittels Listenpreisen und geeigneten Annahmen (z.B., dass der Preis von Li-ION Zellen den Preis eines Elektroantriebs bestimmt), sowie des ESMOBIL-RED Flotten-Ansatz (dem in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Kohortenmodell) entsteht in der Kombination ein Energie-ökonomisches Modell des PW-Sektors. Der Gedanke dabei ist, den Prozess des Herstellers abzubilden, unter der Annahme, der Neuwagenmarkt entwickle sich zum kostenminimalen Antriebstechnologiemix. Ziel ist es, so die Wirkung aktueller Regularien zu explorieren; denkbar ist aber auch, kostenminimale Pfade zu normativen z.B. klimapolitischen Zielen zu suchen.

Entlang der Linie des Energieimpaktes zukünftiger Mobilitätssysteme sind viele weitere Anwendungsfälle denkbar. Im Projekt identifizierte Themen sind das effektive Reduktionspotential von

Plug-in Hybriden, unter Berücksichtigung des im Bericht diskutierten «utility factor», die Rolle von Biomasse als CO₂-arme alternative Primärenergiequelle für die Mobilität und die Rolle von Leichtbau und allgemein fahrzeugtechnischer Innovation im Autobau. Zum Teil bereits angegangen ist die Ausweitung des Ansatzes auf andere Transportmodi, wie den Schwerverkehr sowie den Flug- und Schiffverkehr. All diese Teilbetrachtungen sind Schritte auf dem Weg zu einer Gesamtbeschreibung des Transportsystems, inklusive seiner techno-ökonomischen Rückkopplung mit dem Energiemarkt.

Auf praktischer Seite hat sich mit dem Prototyp der «Mobility Companion App» der Energie360° AG ein erster praktischer Anwender gefunden. Die App ermöglicht potentiellen Elektromobilitätskunden simulativ zu überprüfen, ob und inwiefern ein Elektroauto für sie (auf Grund ihrer gemessenen Fahrbedürfnisse) in Frage kommt. Dazu sammelt das System im Hintergrund technische Daten über das Fahrzeug und appliziert ein Willans-Modell darauf. Die Umkehrung dieses Ansatzes, sprich die Willans- und Fahrzeugparameter automatisch aus Felddaten zu lernen macht es möglich eine detaillierte Fahrzeugcharakterisierung ohne zeitaufwändige Rollenprüfstandversuche (während denen das Fahrzeug nicht im Betrieb sein kann) zu erhalten. Nützlich ist das z.B. bei der Flottenplanung und im Flottenmanagement, beim Monitoring von Mobilitätslösungen oder bei der Planung und dem Betrieb von Ladestationen und Wasserstoffinfrastruktur, inklusiver eventueller, zugehöriger Produktionsmittel und Stromnetzanbindungen. Zuverlässige Energieangaben und die Möglichkeit, andere Bedarfsszenarien oder Hardwarekonfigurationen zu simulieren sind hier eine unverzichtbare Planungsbasis.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Audi Fahrzeuge, der A3 g-tron und der A3 e-tron, wurden mit der Unterstützung der Audi AG in Ingolstadt organisiert. Passend zu den Fahrzeugen wurden von Audi die Datenlogger und die entsprechenden Signalkonfigurationen zusammengestellt. In einem Kapitel eines in Zusammenarbeit mit Audi und der Hochschule Coburg verfassten Buches, wurde ein vergleichbarer Willans-Ansatz verwendet um für verschiedene Antriebstechnologien Realverbrauchsdaten zu ermitteln. Diese Zahlen legen den Grundstein für die Berechnung von sogenannten CO₂- Vermeidungskosten (Kostenaufwand zur Vermeidung von einem Gramm CO₂). Die Veröffentlichung des Buches ist für Ende 2019 vorgesehen.

Wir bedanken uns für die freundliche Unterstützung der AMAG AG, welche uns Informationen zu den Wartungszyklen ihrer Kundenflotte lieferte. Dem BFS, dem ASTRA und dem ARE danken wir für den Zugriff auf die Basisdatensätze dieses Projektes, allen voran der Mirkozenus Mobilität und Verkehr. Wie bereits im Ausblick erwähnt, wurde der ESMOBIL-RED Ansatz oder vereinfachte Darstellungen in anderen Forschungsprojekten im Rahmen des SCCER mobility und dem CCEM verwendet, sowie von Energie 360° für ein Innovationsprojekt ausgesetzt. Um den Ansatz über das Projekt hinweg auch anderen Forschern zugänglich zu machen, fließen abgeleitete Varianten der ESMOBIL-RED Fahrzeugmodelle in die Energiedatenbank der SCCER Joint Activity CEDA.

8 Kommunikation

Küng L., SCCER mobility webinar: <https://video.ethz.ch/play/7b60b089-2227-44f0-99c2-cad45307af0c/1dd777cd-d1d7-423f-91ab-9004b679e268.html>

Georges G., Talk at 2018 SCCER mobility annual conference: https://www.sccer-mobility.ch/export/sites/sccer-mobility/p_supporting_measures/Annual-Conferences/AC2018/dwn_AC18/Georges_SCCER-Mobility_AC_11Sept2018.pdf

9 Publikationen

Küng, L., Bütler, T., Georges, G. and Boulouchos, K., 2018. Decarbonizing passenger cars using different powertrain technologies: Optimal fleet composition under evolving electricity supply. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, pp.785-801.

L. Küng, T. Bütler, G. Georges, & K. Boulouchos. Approach to estimate on-road energy demand of conventionally and alternatively propelled passenger cars from type approval driving cycle. Accepted for publication at *Applied Energy*

L. Küng, M. Held, G. Pareschi, M. Bolla, G. Georges, & K. Boulouchos. Technologies and CO2 policy targets for passenger cars to stay within 1.5°C carbon budget. Under review at *Environmental Science and Technology*

Küng, L., Georges, G., Pareschi, G., Çabukoglu, E. and Boulouchos, K., 2017, May. Challenges of decarbonizing the Swiss transport system. In *17th Swiss Transport Research Conference (STRC 2017)*. ETH Zurich.

Held, M., Küng, L., Çabukoglu, E., Pareschi, G., Georges, G. and Boulouchos, K., 2018. Future mobility demand estimation based on sociodemographic information: A data-driven approach using machine learning algorithms. In *18th Swiss Transport Research Conference (STRC 2018)*. STRC.

Çabukoglu, E., Georges, G., Küng, L., Pareschi, G. and Boulouchos, K., 2018. Battery electric propulsion: An option for heavy-duty vehicles? Results from a Swiss case-study. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 88, pp.107-123.

Çabukoglu, E., Georges, G., Küng, L., Pareschi, G. and Boulouchos, K., 2019. Fuel cell electric vehicles: An option to decarbonize heavy-duty transport? Results from a Swiss case-study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, pp.35-48.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Umwelt BAFU, "Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂ Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013-2020)," no. April, pp. 1–21, 2016.
- [2] Bundesamt für Statistik (BfS) and Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), *Verkehrsverhalten der Bevölkerung*. 2017.
- [3] Bundesamt für Statistik (BFS), "Strassenfahrzeugbestand: Personenwagen ab 1990," 2019. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.assetdetail.7226867.html>. [Accessed: 23-Aug-2019].
- [4] Bundesamt für Statistik, "Taschenstatistik Mobilität und Verkehr," Bern, 2015.
- [5] A. Justen and N. Mathys, "Transport Outlook 2040 - development of passenger and freight transport in Switzerland," 2016.
- [6] M. Raubal *et al.*, "Towards an Energy Efficient and Climate Compatible Future Swiss Transportation System," 2017.
- [7] Bundesamt für Energie (BFE), "Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2015," Bern, 2016.
- [8] UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), "Greenhouse Gas Inventory Data." [Online]. Available: https://di.unfccc.int/flex_annex1.
- [9] BFE, "Neue Inverkehrsetzungen von Strassenfahrzeugen nach Monaten." [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassen-neu-inverkehrsetzungen.assetdetail.1646672.html>. [Accessed: 25-Jan-2017].
- [10] European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), "The Automobile Industry Pocket Guid," 2019.
- [11] IPCC, "IPCC Special Report: Global Warming of 1.5°C."
- [12] U. Tietge, S. Díaz, P. Mock, A. Bandivadekar, J. Dornoff, and N. Ligterink, "From Laboratory to road: A 2018 update of official and 'real-world' fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe," 2018.
- [13] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [14] T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, 1992.
- [15] L. Küng, T. Bütler, G. Georges, and K. Boulouchos, "How much energy does a car need on the road?," *Appl. Energy*, vol. 256, no. October, p. 113948, 2019.
- [16] BFS, *Mobilität in der Schweiz - Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2010*. 2010.
- [17] M. Bolla, M. Held, L. Küng, G. Georges, and M. Held, "Vehicle motion patterns for energy research: Comparison of annual mileage using vehicle- and person-based data," in *18th Swiss Transport Research Conferenc*, 2018.
- [18] L. Küng, T. Bütler, G. Georges, and K. Boulouchos, "Decarbonizing passenger cars using different powertrain technologies: Optimal fleet composition under evolving electricity supply," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 95, no. September, pp. 785–801, 2018.

- [19] R. N. Jazar, "Tire and Rim Fundamentals," in *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Boston, MA: Springer US, 2008, p. 1015.
- [20] H. Großmann, *Pkw-Klimatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [21] H. Großmann, *Pkw-Klimatisierung*, 2nd ed. Springer Vieweg, 2013.
- [22] G. Georges, "Investigation of the Propulsive and Non-Propulsive Energy Demand of Passenger Cars with Emphasis on Electric Propulsion Systems," 2014.