

UNTERWEGS ZU EINER FLOTTE AUS ELEKTROAUTOS

Der Treibstoffverbrauch von Personenwagen (PW) liegt erfahrungsgemäss deutlich über den Herstellerangaben. Diese Abweichung zwischen «Etikette» und «Strasse» gilt für fossile Antriebe mit Benzin und Diesel – sie gilt aber gleichermassen für neue elektrische, teilelektrische und andere alternative Antriebe, wie eine neue Studie von ETH Zürich und Empa zeigt. Die Erkenntnisse helfen, wirklichkeitsnahe Szenarien zu Verbrauch und Emissionen der Schweizer PW-Flotte zu erstellen.



Einer der fünf Fahrzeugtypen, die das Forscherteam von ETH Zürich und Empa auf den Realverbrauch hin untersucht hat: Der Hyundai ix35 Fuel Cell ist mit einer Brennstoffzelle ausgestattet, die Wasserstoff ohne Verbrennung in Strom umwandelt, welcher den Elektromotor antreibt. Foto: Empa

Wer mit dem Auto unterwegs ist, kann meist auf dem Armaturenbrett verfolgen, wie viel Treibstoff er gerade verbraucht. Und wer nicht auf das Display achtet, wird an den Verbrauch erinnert, wenn die nächste Tankfüllung ansteht. Wer ein neues Auto anschafft, macht immer wieder die Erfahrung, dass der tatsächliche Treibstoffverbrauch deutlich über den Herstellerangaben liegt. Die Hersteller stützen sich bei ihren Angaben nämlich auf Werte, die im Labor gewonnen wurden. Dort wird der Verbrauch mit normierten Prüfstandtests bestimmt, die die reale Fahrzeugnutzung nur unzureichend abbilden.

Der Prüfzyklus NEDC («New European Driving Cycle»), der in den letzten Jahren in der EU und der Schweiz zur Anwendung kam, hat den tatsächlichen Verbrauch im Mittel um 40% unterschätzt. Mit dem Prüfzyklus WLTP («World harmonized Light vehicles Test Cycle»), der ab 2020 zur Anwendung kommt, dürfte die Diskrepanz zwar schrumpfen, für Benzin- und Dieselmotoren aber immer noch rund 20 bis 30 Prozent betragen, wie verschiedene Studien gezeigt haben. Diese Abweichungen sind für Autofahrerinnen und Autofahrer ärgerlich. Sie drohen aber auch politische Massnahmen etwa in der Klimapolitik zu untergraben. Die Verbrauchslimi-

ten basieren nämlich aktuell auf diesen Normwerten. Liegen die Normwerte aber systematisch zu tief, entfalten politische Vorgaben nicht die angestrebte Wirkung.

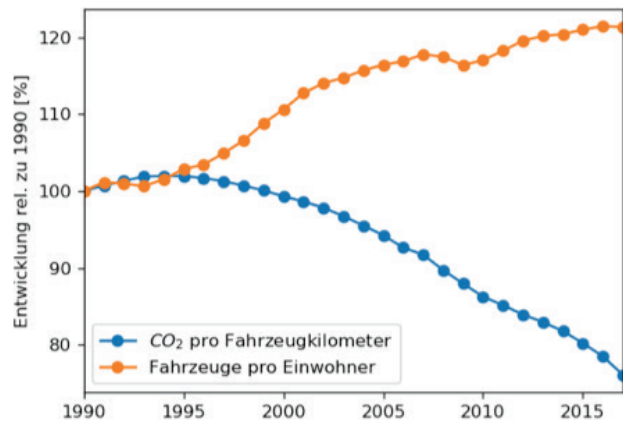
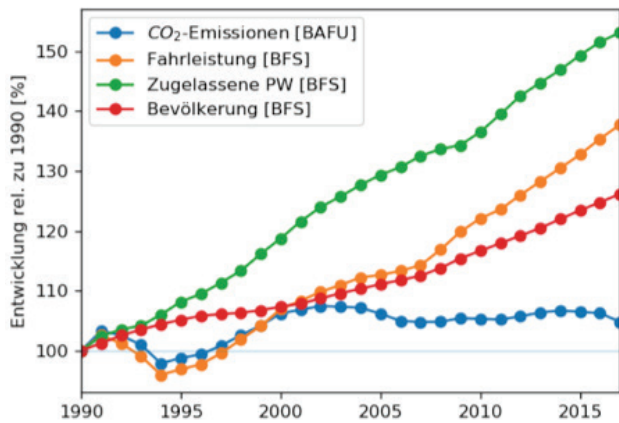
Fünf Antriebssysteme untersucht

Dass der Realverbrauch von Benzin- und Dieselmotoren über den Herstellerangaben liegt, ist seit langem bekannt. Nur wenig untersucht ist diese Thematik bei Elektroautos und anderen alternativen Antrieben auf der Grundlage von Erdgas und Wasserstoff. Diese Lücke hilft nun ein Forscherteam der Eidgenössisch Technischen Hochschule (ETH) Zürich und der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf zu schliessen. Die Wissenschaftler untersuchten fünf Antriebssysteme, mit denen sich heute die Hoffnung auf einen klimafreundlicheren Verkehr verbindet. Die kürzlich abgeschlossene Untersuchung wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) finanziell unterstützt.

Ein Pfeiler der Studie war eine an der Empa stationierte Testflotte, bestehend aus fünf Fahrzeugen mit modernem Antrieb: Ein Elektrofahrzeug (VW e-Golf), ein Plug-In Hybrid (Audi A3 e-tron), ein Vollhybrid (VW Jetta), ein Gasfahrzeug (Audi A3 g-tron) und ein Brennstoffzellenfahrzeug (Hyundai

	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
Fahrtstrecke im Feldtest	38'600 km	39'000 km	26'100 km	10'000 km	33'800 km

Fünf Fahrzeugtypen mit neuartigen Antrieben standen im Zentrum des Forschungsprojektes von ETH Zürich und Empa (v.l.n.r.): mit Compressed natural gas (CNG) betanktes Gasfahrzeug, Vollhybrid, mit Benzin oder Diesel betankter Plug-in-Hybrid, reines Elektrofahrzeug sowie ein Brennstoffzellen-Fahrzeug, dessen Elektromotor mit Strom angetrieben wird, der mittels Brennstoffzelle aus Wasserstoff gewonnen wird. Grafik: Schlussbericht ESMOBIL-RED



In den letzten 30 Jahren sind in der Schweiz die CO₂-Emissionen weniger stark gestiegen als die Bevölkerung, die zugelassenen Personenwagen und die gefahrenen Kilometer. Grafik: Schlussbericht ESMOBIL-RED

ix35 Fuel Cell). Der Verbrauch der fünf Fahrzeuge wurde auf dem Rollenprüfstand gemessen (insgesamt 13 vordefinierte Fahrzyklen, darunter WLTC), zudem wurden sie von Anfang 2016 bis Herbst 2018 an der Empa in den Feldversuch geschickt. Die Fahrzeuge absolvierten in 3000 Fahrten insgesamt 115'000 km. Dabei wurde eine Reihe von Verbrauchsdaten aufgezeichnet.

Vier Einflussfaktoren

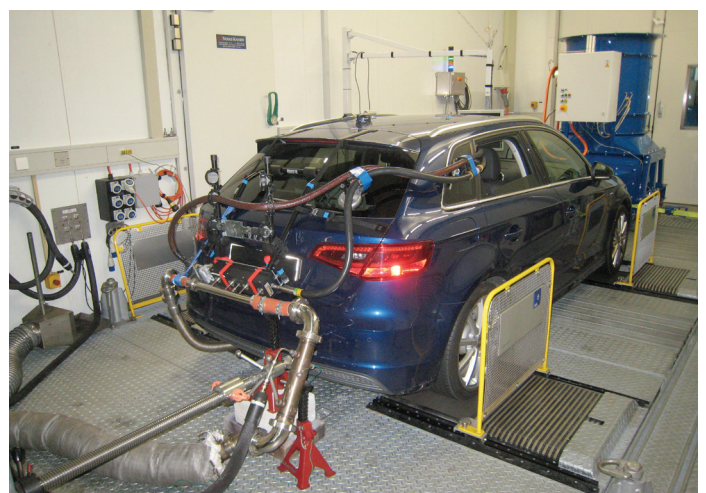
«Wir konnten bei Auswertung dieser Daten zeigen, dass auch bei diesen alternativen Antrieben der tatsächliche Verbrauch 20 bis 30% über den Herstellerangaben liegt, also im gleichen Ausmass wie bei Benzin- und Dieselaautos», fasst Co-Autor Dr. Lukas Küng ein Hauptergebnis der Studie zusammen. Wie gross diese Abweichung ist, hängt von der individuellen Situation ab. Küng und seine Forscherkollegen konnten zeigen, dass sich die Abweichungen zwischen Realverbrauch und Herstellerangaben hauptsächlich mit vier nutzerspezifischen Einflussfaktoren erklären lassen.

Der wichtigste Faktor ist die Durchschnittsgeschwindigkeit. Wer mit seinem Auto hauptsächlich innerhalb der Stadt pendelt, benötigt eine geringere Antriebsleistung als ein Pendler, der täglich Strecken mit hoher Geschwindigkeit auf der Autobahn zurücklegt. Der zweite Faktor ist das Beschleunigungsverhalten. Wer seinen Fahrstil nach «Eco-drive» ausrichtet ist sparsamer unterwegs als ein sogenannt «dynamischer» Fahrer. Der dritte Faktor ist die Topografie, in der ein Autofahrer hauptsächlich unterwegs ist: Fahrten in der Ebene sind sparsamer als im Hügel- oder Bergland. Der vierte Einflussfaktor ist schliesslich die Aussentemperatur: Bei mittlerer Temperatur ist der Verbrauch der Nebenaggregate (Heizung, Klimaanlage) geringer als bei Hitze oder Tiefsttemperaturen.

Modell der Schweizer Fahrzeugflotte

Den Forschern von ETH und Empa geht es in ihrer Studie nicht darum, den Verbrauch eines einzelnen Autofahrers möglichst exakt zu bestimmen. Vielmehr hatten sie das Ziel, auf der Grundlage dieser Erkenntnisse ein Modell zu entwickeln, mit dem sich der Energieverbrauch der nationalen PW-Flotte verlässlich abschätzen lässt. Dies gelingt ihnen, indem sie bestimmte Grunddaten der eingesetzten Fahrzeuge (wie Gewicht, Grösse und Bereifung) heranziehen und diese mit Informationen zur Fahrzeugnutzung kombinieren.

Wie jeder einzelne sein Auto nutzt, lässt sich kaum erfassen, allerdings liegen Umfrageergebnisse der Schweizer Bevölkerung zu ihrem Mobilitätsverhalten vor, nämlich im sogenannten «Mikrozensus Mobilität und Verkehr» des Bundesamts für Statistik. Die Forscher zogen die Daten des Jahres 2015 heran



Erdgasfahrzeug vom Typ Audi A3 Sportback g-tron auf dem Rollenprüfstand der Empa im Dübendorf. Hier erfolgt die Kalibrierung für eine Abgasmessung im realen Strassenverkehr. Hinten am Fahrzeug ist ein Portable Emission Measurement System (PEMS) montiert. Foto: Empa

JE «SAUBERER» DER STROM...

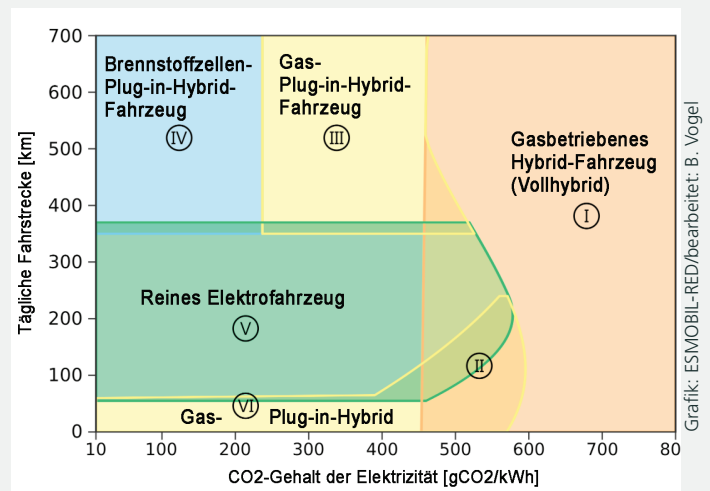
Die Elektrifizierung der PW-Flotte senkt den CO₂-Ausstoss – sofern die Fahrzeuge mit «sauberem» Strom betankt werden. Die ESMOBIL-RED-Wissenschaftler haben errechnet, welche Fahrzeuge bei einem bestimmten «CO₂-Gehalt» des Stroms den geringsten CO₂-Ausstoss verursachen. Der Strom, der heute aus Schweizer Steckdosen kommt, ist relativ CO₂-arm (ca. 150 g CO₂/kWh). In diesem Fall sind reine Elektromobile für mittlere Tagesdistanzen (50 bis 350 km) der CO₂-ärmste Fahrzeugtyp. Bei grösseren Tagesdistanzen muss – weil reine Elektroautos noch nicht die erforderlichen Reichenweiten haben – auf Plug-in-Hybride ausgewichen werden, die den getankten Wasserstoff über Brennstoffzellen in Strom umwandeln. Wer täglich weniger als 50 km unterwegs ist, fährt mit einem gasbetriebenen Plug-In-Hybrid am CO₂-ärmsten. Dazu sagt Lukas Küng: «Für kurze Distanzen um die 50 km/Tag sind entweder Elektroautos mit kleinen, leichten Batterien oder (ebenfalls mit einer leichten Batterie ausgestattete) Plug-in-Hybride, welche Distanzen unter 50 km rein elektrisch zurücklegen können, die CO₂-ärmsten Fahrzeuge. Unsere Berechnung ist kein Plädoyer für den Einsatz von Gasfahrzeugen auf kurzen Distanzen; wir wollen vielmehr darauf hinweisen, dass schwere Elektroautos mit grossen Batterien für Tagesdistanzen von unter 50 km, die in der Schweiz 80% der täglichen Autofahrten ausmachen, bezüglich CO₂-Ausstoss suboptimal sind.»

Anders als in der Schweiz ist die Situation in Deutschland, das seinen Strom zu einem Teil mit Kohle- und Gaskraftwerken erzeugt. Noch in den frühen 1990er Jahren lag dort der «CO₂-Gehalt» des Stroms bei 760 g CO₂/kWh. Damals war es also klimapolitisch sinnvoller, mit einem Gas-Hybrid herumzufahren als mit einem konventionellen Benzin- oder Dieselauto; der Gas-Hybrid war aber auch ökologischer als ein Plug-in-Hybrid oder ein reines Elektromobil, da der Strom noch stark «CO₂-haltig» war. In der heutigen Situation (knapp 500 g CO₂/kWh) ist es auch in Deutschland aus klimaschützerischen Erwägungen sinnvoll, auf ein Elektromobil umzusteigen, zumindest bei mittleren Tagesdistanzen. Sinkt der «CO₂-Gehalt» durch weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien dereinst unter 450 g CO₂/kWh, sind Elektroautos oder Plug-in-Hybride die CO₂-ärmsten Fahrzeugtypen.

Es ist wichtig anzumerken, dass die oben ausgeführten Überlegungen ein Stück weit theoretischer Natur sind, da zurzeit keine gasbetriebenen oder Brennstoffzellen-Plug-in-Hybride hergestellt werden. Dazu Lukas Küng: «Wir zeigen ein hypothetisches Optimum. Kommerziell verfügbare Plug-in-Hybride verfügen über konventionelle Benzin- oder Dieselmotoren. Dies beeinflusst jedoch lediglich die langen Distanzen über 350 km, welche nicht sehr häufig sind.» BV

und konnten damit ein aussagekräftiges Modell entwickeln. Dieses zeigt auf, wie sich Verbrauch und CO₂-Emissionen der Schweizer Fahrzeugflotte verändern abhängig davon, welche Antriebssysteme genutzt werden.

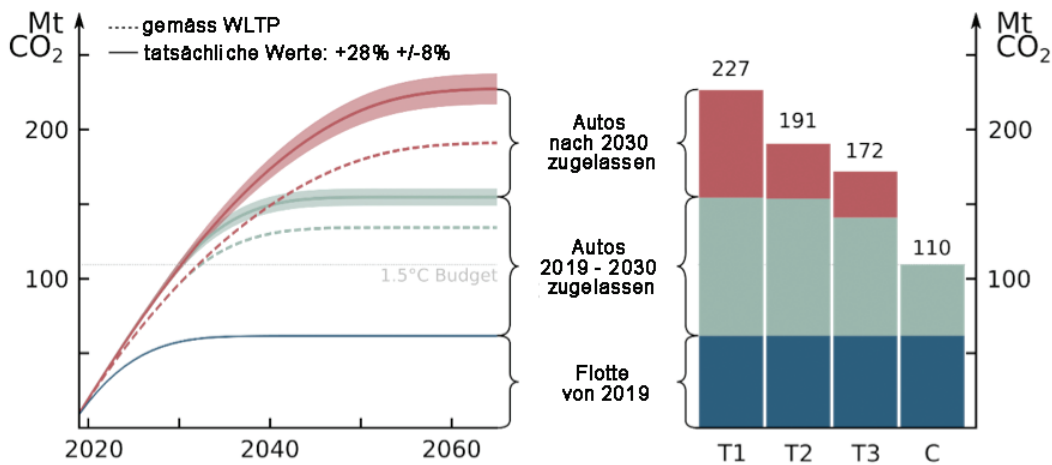
Mit diesem Modell stellen die Forscher ein Werkzeug bereit, mit dem sich der Energieverbrauch bzw. der CO₂-Ausstoss des motorisierten Individualverkehrs der Schweiz für verschiedene Zukunftsszenarien berechnen lässt, nämlich ab-



hängig davon, welche Antriebssysteme in welcher Zahl auf Schweizer Strassen unterwegs sind. Eine wichtige Erkenntnis: «In der Schweiz hat sich eine vollelektrifizierte Flotte als effiziente und robuste Dekarbonisierungsstrategie erwiesen», schreiben die Wissenschaftler im Schlussbericht.

Ersatz der fossilen Antriebe beschleunigen

Aber ist es nicht eine Binsenwahrheit, dass man auf Elektroautos setzen muss, will man den CO₂-Ausstoss senken?



Links: Kumulierte, direkte CO₂-Emissionen der PW-Flotte im Referenzszenario T1. Die gestrichelte Linie nimmt Normverbräuche an, die durchgezogene Linie Realverbräuche, und die eingefärbte Fläche zeigt die Varianz des Realverbrauchs. Rechts: Gesamtemissionen bis 2065 in allen vier Szenarien. Die Farben zeigen die CO₂-Emissionen der Teilflotte der vor 2019 (blau), zwischen 2019 und 2030 (grau) und nach 2030 (rot) zugelassenen Fahrzeuge. Nur Szenario C ist mit dem Ziel vereinbar, die Erderwärmung auf +1.5°C zu begrenzen. Grafik: Schlussbericht ESMOBIL-RED/bearbeitet B. Vogel

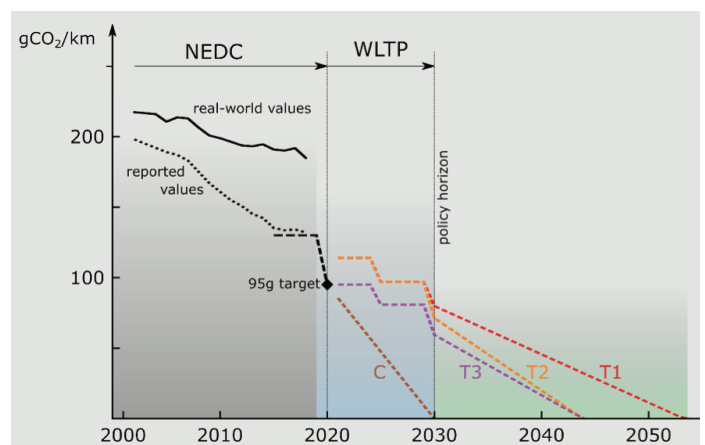
Nein, denn diese Strategie ist nur sinnvoll, wenn der Strom zur Betankung der Elektromobile mit geringen CO₂-Emissionen produziert werden konnte. Diese Bedingung sei für die Schweiz erfüllt, haben die Berechnungen der Wissenschaftler ergeben, in die sie den «CO₂-Gehalt» des in der Schweiz produzierten bzw. in die Schweiz importierten Stroms berücksichtigten. «Elektrifizierung ist der Weg, den wir gehen müssen», fasst Lukas Küng diese Erkenntnis knapp zusammen.

In der Schweiz gibt es rund 4,5 Millionen Personenwagen, pro Jahr werden 300'000 alte Autos durch neue ersetzt. Es dauert somit 15 Jahre, bis die ganze Flotte erneuert ist. Um die Fahrzeugflotte «sauber» zu machen, reiche es nicht aus, vermehrt Elektroautos einzusetzen. Vielmehr müsse die Politik parallel auf eine schnellere Substitution fossil angetriebener Autos hinwirken, zum Beispiel mit «Abwrackprämien» (wobei die Wissenschaftler bei diesem Vorschlag ohne graue Energie rechneten). Parallel dazu sollte die Verbreitung CO₂-armer Treibstoffe (e-fuels, Biotreibstoffe) verstärkt gefördert werden.

➤ **Schlussbericht** zum Forschungsprojekt «Realverbrauch konventionell und elektrisch angetriebener Fahrzeuge abbildendes, energiesystemisches Modell des schweizerischen Mobilitätssektors zur Bewertung von Nachhaltigkeitsmassnahmen» (ESMOBIL-RED) unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=37078>

➤ **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Dr. Luca Castiglioni (luca.castiglioni[at]bfe.admin.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Mobilität.

➤ Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Mobilität finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-mobilitaet.



Mit dem bisher in EU und Schweiz angewandten Prüfzyklus NEDC wurde der CO₂-Ausstoss der Neuwagenflotte deutlich unterschätzt. Die Grafik zeigt eine Schätzung des künftigen CO₂-Ausstosses für vier verschiedene Szenarien, wobei der neue Prüfzyklus WLTP zugrunde gelegt wird. Die Szenarien T1, T2, T3 und C unterscheiden sich im Richtwert für den CO₂-Ausstoss im Jahr 2020 sowie im Tempo der geforderten CO₂-Verminderung. Bei Szenario T1 erfolgt die CO₂-Reduktion am gemächlichsten, bei Szenario C am schnellsten. Grafik: Schlussbericht ESMOBIL-RED