

dossier.

Nachhaltigere Mobilität

Vergleich der Antriebsarten | An unterschiedlichen Antriebstechnologien wird gearbeitet, um Personenwagen «grüner» zu machen. Auf welchen Energieträger soll man setzen, damit die Transformation der Mobilität in Fahrt kommt?

Une mobilité plus durable

Comparaison des types de propulsion | Différents travaux sont en cours pour rendre les voitures de tourisme plus « vertes ». Sur quelle source d'énergie miser pour mettre en route la transformation de la mobilité ?



RADOMÍR NOVOTNÝ

Ein Blick in die Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018 verrät, dass der Verkehr die einzige Verbraucherkategorie ist, deren Energieverbrauch im letzten Jahr gestiegen ist. Er stieg zwar nur um 2% – verglichen mit der jährlichen Zunahme von 12,5%, die man bei den Erdölprodukten zwischen 1950 und 1970 verzeichnen konnte, ist dies eigentlich nicht viel. Aber in allen anderen Sektoren sank der Verbrauch 2018 – bei den Haushalten sogar um 5,4%. Auch bezüglich Gesamtverbrauch nimmt die Mobilität nun mit einem Anteil von 37,8% den Spitzenplatz ein. Und was den Verbrauch an Erdölprodukten betrifft, findet die Gesamtenergiestatistik (S. 19) deutliche Worte: «Während sich der Anteil der Erdölbrennstoffe am Gesamtenergieverbrauch seit der ersten Erdölkrise mehr als halbiert hat, ist jener der Erdöltreibstoffe deutlich gestiegen.» Will man also den Ausstoss klimarelevanter Gase reduzieren, setzt man den Hebel mit Vorteil bei der Mobilität an. Da 2018 in der Schweiz 4,6 Mio. Personenwagen immatrikuliert waren, entfalten technische Verbesserungen hier eine Breitenwirkung, die eine schnellere Erreichung der Klimaziele verspricht.

Um die Emissionen im Verkehr zu senken, wäre – nebst effizienteren Verbrennungsmotoren, einer Reduktion der Fahrstrecken und der Fahrzeugmasse – eine Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger naheliegend. Aber wie viel dies für die Umwelt wirklich bringt, wird in wissenschaftlichen Studien, aber vor allem in der Presse kontrovers diskutiert. Man trifft zuweilen auf die Ansicht, dass Elektroautos einen höheren Ausstoss an Treibhausgasen verursachen als fossil betriebene Autos. Was stimmt also?

Zahlreiche Umweltauswirkungen

Die Mobilität wirkt sich auf vielfältige Weise auf die Umwelt aus. Nebst den zentralen Aspekten wie CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf gibt es auch andere wie die Feinstaubbelastung und Luftschadstoffe. Diese Umweltaspekte wurden am Paul-Scherrer-Institut durch Brian Cox untersucht. Er berücksichtigte dabei die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge, von der Bereitstellung der Rohstoffe und der Treibstoffe über die Nutzung bis zum Recycling. Basierend auf seiner Dissertation wurden vom Bundesamt für Energie das Faktenblatt «Umweltauswirkungen von Personenwagen – heute und morgen» sowie ein Hintergrundbericht [1] veröffentlicht, der die getroffenen Annahmen, die verwendeten Daten und die Berechnungsmethoden erläutert.

In der Studie geht Cox von einem für alle Antriebsarten identischen Personenwagen aus, vergleichbar etwa mit einem VW Golf. Die grundlegenden Designparameter der behandelten Fahrzeuge werden dabei fix definiert, alle anderen Parameter wie Treibstoffverbrauch werden von der Fahrzeugmasse, dem Luft- und dem Rollwiderstand, den Fahrprofilen sowie dem Verbrauch für Heizung, Kühlung usw. abgeleitet. Die Studie geht von einer Heiz- bzw. Kühlleistung aller Fahrzeuge im Jahresmittel von 200 bis 400 W aus. Künftige Elektroautos dürften mit Wärmepumpen ausgestattet sein, die den Verbrauch der Heizung deutlich reduzieren.

Il suffit d'un coup d'œil à la Statistique globale suisse de l'énergie 2018 pour constater que le trafic est la seule catégorie dont la consommation d'énergie a augmenté au cours de l'année dernière. Cette hausse n'a certes été que de 2% – ce qui est peu comparé à l'augmentation annuelle de 12,5% enregistrée pour les produits pétroliers entre 1950 et 1970 – mais elle a en même temps baissé dans tous les autres secteurs, et même de 5,4% dans les ménages. En termes de consommation totale, la mobilité est désormais aussi en tête avec une part de 37,8%. Et en ce qui concerne la consommation de produits pétroliers, la Statistique globale de l'énergie (p. 18) est claire: «Si la part à la consommation énergétique globale des combustibles dérivés du pétrole a diminué de plus de 50% depuis la première crise pétrolière, celle des carburants a nettement progressé.» Ainsi, si nous voulons réduire les émissions de gaz ayant une incidence sur le climat, il est judicieux de se pencher sur le secteur de la mobilité. Dans la mesure où 4,6 millions de voitures de tourisme étaient immatriculées en Suisse en 2018, les améliorations techniques ont ici un effet à grande échelle, offrant la perspective d'une réalisation plus rapide des objectifs climatiques.

Le passage des sources d'énergie fossiles aux sources d'énergie renouvelables serait – en plus des moteurs à combustion plus efficaces et d'une réduction des distances parcourues et du nombre de véhicules – un moyen évident de diminuer les émissions générées par les transports. Toutefois, la question de savoir dans quelle mesure cela profite réellement à l'environnement est controversée dans les études scientifiques, et avant tout dans la presse. Il arrive parfois même de lire que les voitures électriques produisent plus d'émissions de gaz à effet de serre que les voitures à carburant fossile. Alors qu'en est-il vraiment?

De nombreux impacts environnementaux

La mobilité affecte l'environnement de diverses manières. En plus des émissions de CO₂ et des besoins en énergie primaire, elle est aussi à l'origine d'émissions de particules fines et de polluants atmosphériques. Brian Cox a étudié ces aspects environnementaux à l'Institut Paul Scherrer. Ce faisant, il a pris en considération le cycle de vie complet des véhicules, de la fourniture des matières premières et des carburants jusqu'au recyclage, en passant par leur utilisation. Sur la base de sa thèse, l'Office fédéral de l'énergie a publié la fiche d'information «Incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain» ainsi qu'un rapport de fond [1] expliquant les hypothèses retenues, les données utilisées et les méthodes de calcul.

Dans son étude, Brian Cox se base sur une voiture de tourisme identique, comparable à une Golf VW, pour tous les systèmes de propulsion. Les paramètres de base de la conception des véhicules examinés sont définis de manière fixe; tous les autres paramètres, comme la consommation de carburant, sont déduits à partir du poids du véhicule, de la résistance à l'air et au roulement, des profils de conduite ainsi que de la consommation pour

Zeit zum Umdenken

Sogar Unternehmen, bei denen die Motorengeräusche identitätsstiftend sind, schwenken langsam in Richtung elektrischer Antrieb um.

L'heure est venue de se réorienter

Même les entreprises dont l'identité se fonde sur le bruit des moteurs se dirigent lentement vers la propulsion électrique.



Die Studie untersucht einerseits die aktuelle Situation, aber ebenso detailliert die Situation 2040. Hier genügt der Blick auf Erstere, eigentlich das Worst-Case-Szenario, denn für 2040 sind die Prognosen bei sämtlichen Antriebsarten besser, da sie alle kontinuierlich optimiert werden.

Ordnet man Antriebssysteme in die Kategorien «potenziell nachhaltig» und «nicht nachhaltig» ein, fallen Elektroautos, mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenautos, mit E-Fuels angetriebene Fahrzeuge und Plug-in-Hybride in die erste Kategorie, alle anderen in die zweite.

Die Energie zum Fahren

Betrachten wir zunächst den Aspekt der Mobilität, mit dem man beim Tanken oder Laden konfrontiert wird: die Energie zum Fahren. Sie hat unabhängig vom Energieträger eine spezifische Wirkungskette, die mit der Erzeugung der Antriebsenergie beginnt und mit dem Bewegen des Fahrzeugs endet, auch Well-to-Wheel genannt. Die Betrachtung dieser Wirkungskette zeigt auf, wie effizient die Primärenergie in der jeweiligen Antriebsart genutzt wird. Diese Kette kann in zwei Teilketten aufgeteilt werden: in die Energieversorgung der Fahrzeuge (Well-to-Tank) und in die Energienutzung in den Fahrzeugen selbst (Tank-to-Wheel).

Die Energie, die aufgewendet werden muss, damit Fahrzeuge «einen vollen Tank» haben, schwankt je nach Primär-

le chauffage, la climatisation, etc. L'étude se base sur une puissance moyenne annuelle de chauffage, respectivement de refroidissement, de 200 à 400 W pour tous les véhicules. Les futures voitures électriques seront probablement équipées de pompes à chaleur qui permettront de réduire considérablement la consommation du chauffage.

L'étude examine la situation actuelle, mais aussi la situation en 2040 de manière détaillée. Il suffit ici de se concentrer sur la première, soit le pire scénario, car les prévisions pour 2040 sont meilleures pour tous les types de propulsion, ceux-ci ne cessant d'être optimisés.

Si les systèmes de propulsion devaient être classés dans les catégories «potentiellement durables» et «non durables», les voitures électriques, à pile à combustible à hydrogène, à e-carburants et les hybrides rechargeables entreraient dans la première catégorie, les autres dans la seconde.

L'énergie pour conduire

Considérons en premier lieu l'aspect de la mobilité auquel tout un chacun est confronté au moment de faire le plein de carburant ou d'électricité: l'énergie nécessaire pour se déplacer. Celle-ci est caractérisée, quelle que soit sa source, par une chaîne spécifique d'impacts qui commence avec la production de l'énergie motrice et se termine avec le dépla-



Unbeschwert reisen

Mobile Ladelösungen reduzieren die Reichweitenangst bei Elektroautos.

Voyager sans souci

Les solutions de recharge mobile rassurent les conducteurs de voitures électriques.

energiequelle und nach Energieform, die im Auto eingesetzt wird. Fossile Treibstoffe sind bei der Bereitstellung der Energie am effizientesten, während die Power-to-Gas-Technologie am schlechtesten abschneidet.

Bezüglich Energieeffizienz des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel) ist das Elektroauto im Schnitt mit 63,3% allen anderen Antriebsarten klar überlegen. Die Kette «Batterien – Leistungselektronik – Elektromotoren» ist deutlich effizienter als die Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellen bzw. die thermodynamisch-chemischen Prozesse von Verbrennungsmotoren. Zudem profitieren elektrische angetriebene Autos davon, dass beim Bremsen Energie wieder zurückgewonnen werden kann. Das Brennstoffzellenauto bringt es auf einen Wirkungsgrad von einem Drittel, der effizienteste Verbrenner, das Diesello, auf knapp ein Viertel der Primärenergie.

Ökobilanz-Betrachtungen

Bei der Well-to-Wheel-Betrachtung werden gewisse Aspekte wie die Herstellung der Fahrzeuge und das Recycling ausgeblendet. Beim Elektroauto ist es die Ökobilanz der Speicherbatterien, die wegen dem Energieverbrauch während der Produktion dominiert, siehe Beitrag auf S. 19. Die hier als Basis genutzte Studie von Cox geht von rund 150 kg CO₂-Äquivalente pro kWh aus, was für heutige Elektroautos zu hoch ist. Aktuelle Werte liegen bei der Hälfte davon.

Die produktionsbedingten Umweltauswirkungen bei Wasserstoffautos hängen von der Brennstoffzelle und ihrem Platingehalt ab. In der Studie ist die Brennstoffzelle so dimensioniert, dass sie 60% bis 90% der Gesamtleistung des Autos leistet. Bezüglich Lebensdauer der Brennstoffzellen sind zudem kaum Erfahrungswerte verfügbar. Gespeichert wird der Wasserstoff in den Fahrzeugen bei 700 bar in Tanks aus Aluminium, Kohlenstofffasern und rostfreiem Stahl. Pro kWh wiegt ein solcher Tank heute knapp 0,6 kg.

Die Studie kommt zum Schluss, dass Elektroautos und Plug-in-Hybride mit dem Schweizer Strommix die kleinsten Treibhausgasemissionen erzeugen. Sie weisen besonders für stark genutzte Fahrzeuge wie Taxis und Fahrzeugflotten die beste Treibhausgasbilanz auf. Bei wenig genutzten Personewagen ist es schwieriger, die höheren Emissionen der Fahrzeugproduktion zu kompensieren.

Die Herstellung von Plug-in-Hybriden ist leicht umweltfreundlicher als die von Elektroautos, denn sie kommen mit einer kleineren Batterie aus.

Vorteile alternativer Antriebe

Wenn Elektroautos mit Ökostrom betrieben werden, gibt es keine Abgase. Wird Strom aus fossilen Quellen genutzt, verlagern sie die Abgase aus den dicht bevölkerten Gebieten in Gebiete mit geringerer Personendichte und leisten auch in diesem weniger günstigen Fall einen Beitrag zu einer besseren Luftqualität in Städten. Zudem beschränken sich die akustischen Emissionen auf Roll- und Luftgeräusche sowie bei gewissen Modellen auf das «Zwitschern» der Umrichter und den künstlich erzeugten Zusatzklang, der Fussgänger bei langsamer Fahrt warnt.

ement du véhicule, aussi connue sous le nom de « well-to-wheel ». La prise en considération de cette chaîne d'effets montre dans quelle mesure l'énergie primaire est utilisée efficacement dans le type de propulsion respectif. Elle peut être divisée en deux chaînes partielles: l'alimentation en énergie des véhicules (well-to-tank) et l'utilisation de l'énergie dans les véhicules (tank-to-wheel).

L'énergie requise pour que les véhicules aient « un réservoir plein » varie selon la source d'énergie primaire et la forme d'énergie utilisée dans la voiture. Les carburants fossiles sont les plus efficaces lors de l'étape de la mise à disposition de l'énergie, tandis que la technologie Power-to-Gas est la moins performante.

Concernant l'efficacité énergétique du véhicule (tank-to-wheel), la voiture électrique est clairement supérieure à tous les autres types de propulsion, avec une moyenne de 63,3%. La chaîne « batteries – électronique de puissance – moteurs électriques » est bien plus efficace que l'utilisation d'hydrogène dans les piles à combustible ou les processus thermodynamiques et chimiques des moteurs à combustion. De plus, les voitures à propulsion électrique bénéficient du fait que de l'énergie peut être récupérée lors du freinage. La voiture à pile à combustible atteint un rendement d'un tiers et le moteur à combustion le plus efficace, la voiture diesel, de près d'un quart de l'énergie primaire.

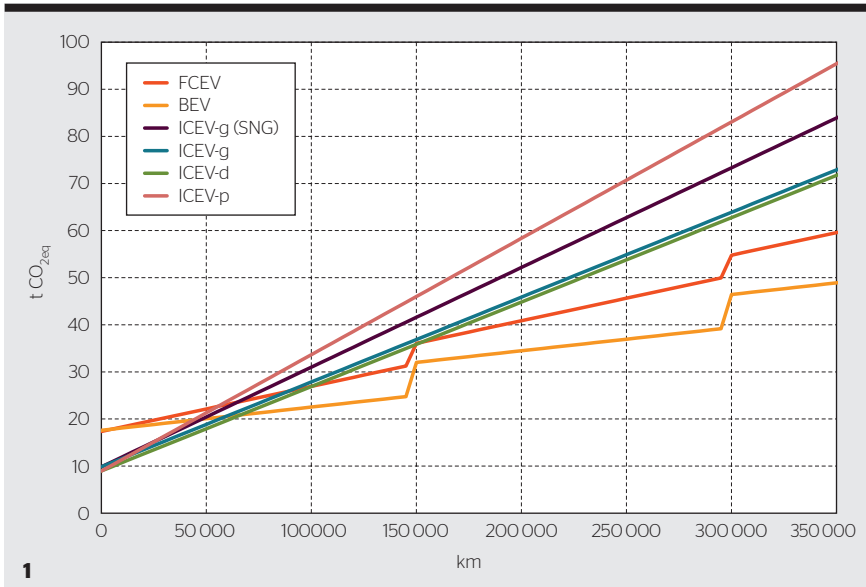
Considérations relatives au bilan écologique

L'analyse de la chaîne « well-to-wheel » ne prend pas en considération certains aspects tels que la fabrication des véhicules et le recyclage. Dans le cas de la voiture électrique, c'est le bilan écologique de la batterie qui domine en raison de la consommation d'énergie nécessaire à sa production, voir l'article en page 23. L'étude de Brian Cox utilisée ici en tant que référence table sur environ 150 kg d'équivalents CO₂ par kWh, ce qui est trop élevé pour les voitures électriques les plus récentes: les valeurs actuelles sont deux fois plus basses.

Les impacts environnementaux liés à la production des voitures à hydrogène dépendent de la pile à combustible et de sa teneur en platine. Dans l'étude, celle-ci est dimensionnée de sorte à fournir 60 à 90% de la puissance totale de la voiture. En outre, il n'existe guère de valeurs empiriques concernant la durée de vie des piles à combustible. L'hydrogène est stocké dans le véhicule à 700 bars, dans des réservoirs en aluminium, en fibres de carbone et en acier inoxydable. Un tel réservoir pèse actuellement à peine 0,6 kg par kWh.

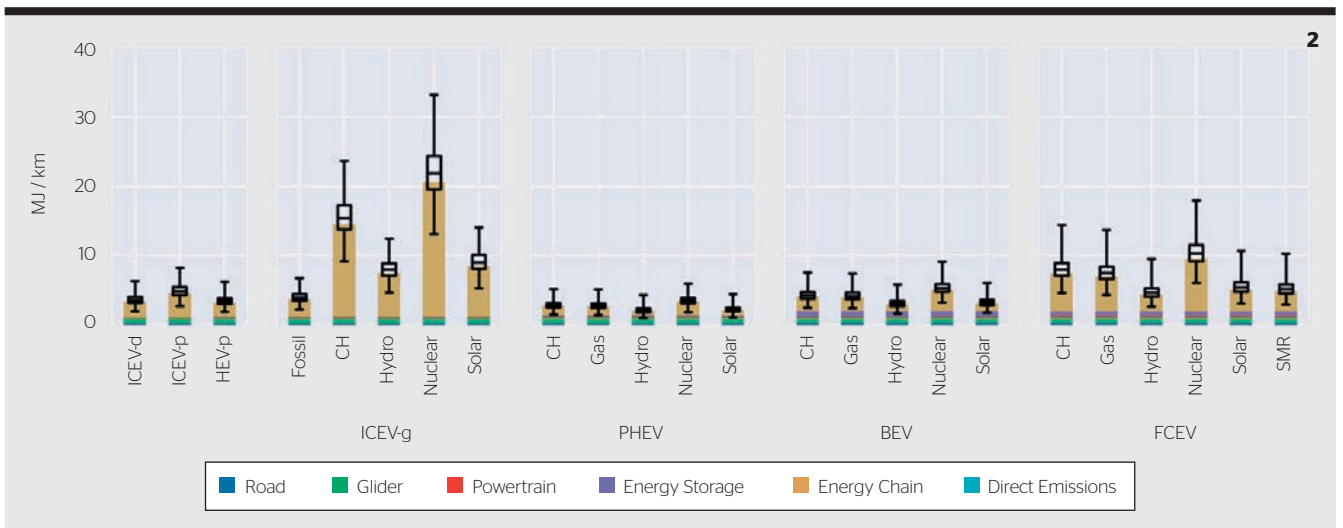
L'étude arrive à la conclusion qu'avec le mix électrique suisse, les voitures électriques et les hybrides rechargeables génèrent le moins d'émissions de gaz à effet de serre: elles présentent le meilleur bilan, et ce, particulièrement pour les véhicules très sollicités comme les taxis et ceux des flottes. Dans le cas des voitures de tourisme peu utilisées, il est moins évident de compenser les émissions plus élevées générées lors de la production des véhicules.

Quant aux hybrides rechargeables, leur fabrication est légèrement plus écologique que celle des voitures électriques, car elles sont dotées d'une batterie plus petite.



1 Treibhausgasemissionen während der gesamten Fahrzeug-Lebensdauer, unter der Annahme, dass Lithium-Batterien 150 kg CO₂-Äquivalente pro kWh verursachen. Aktuelle Werte liegen deutlich tiefer.

Émissions de gaz à effet de serre pendant toute la durée de vie du véhicule, en partant du principe que les batteries au lithium génèrent 150 kg d'équivalents CO₂ par kWh. Les valeurs actuelles sont nettement plus basses.



Antriebsart Type de propulsion	Basis Base	Minimum	Maximum
Wirkungsgrad Antrieb Efficacité de la propulsion «tank-to-wheel» / %			
ICEV-d - Dieselauto Voiture diesel	23,2	20,5	27,4
ICEV-p - Benzinauto Voiture à essence	20,8	18,2	24,9
ICEV-g - Erdgasauto Voiture au gaz naturel	19,2	16,9	23,2
HEV-p - Hybrid, mit Benzin Hybride, à essence	28,1	25,0	31,2
PHEV-c - Plug-in-Hybrid, nur Benzinbetrieb Mode seulement à essence	23,8	20,3	28,1
PHEV-e - Plug-in-Hybrid, nur Batteriebetrieb Mode seulement électrique	63,6	55,8	73,2
BEV - Elektroauto Voiture électrique (battery electric vehicle)	63,6	55,8	73,2
FCEV - Wasserstoffauto Voiture à hydrogène	33,6	28,6	39,5
Reichweite Autonomie / km			
ICEV-d	656	302	1189
ICEV-p	524	235	923
ICEV-g	512	275	866
HEV-p	753	406	1305
PHEV-c	602	309	1035
PHEV-e	51	17	120
BEV	173	54	406
FCEV	468	188	893

2 Primärenergiebedarf pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebstechnologien und Treibstoffe. SMR: Wasserstoff aus Erdgas-reformierung (Steam Methane Reforming).

Besoins en énergie primaire par kilomètre de véhicules pourvus de différentes technologies de propulsion et pour différents carburants. SMR : hydrogène issu du reformage du méthane.

Ein weiterer Vorteil bei Elektro- und Wasserstoffautos ist das hohe Drehmoment elektrischer Antriebe bereits ab Stillstand, das zudem ohne Gangwechsel entfaltet werden kann, denn Elektromotoren haben einen grossen Drehzahlbereich. Da Kupplung und Getriebeöl fehlen und man beim Bremsen durch die Rekuperation die Bremsbeläge schont, reduziert sich zudem der Wartungsaufwand. Serviceintervalle können verlängert werden, die entsprechenden Kosten sinken.

Einschränkungen und Hürden

Elektroautos sind zunächst teurer als konventionelle Autos, aber man profitiert längerfristig von tieferen Energie- und Wartungskosten. Zur ökonomischen Hürde gesellt sich bei Elektroautos noch die relativ lange Ladezeit, oft gepaart mit geringerer Reichweite. An gewissen Orten gibt es zwar Schnellladestationen, aber meist lädt man sein Fahrzeug langsam auf. Integriert man das Laden aber in den Alltagsablauf, beispielsweise über Nacht in der eigenen Garage oder tagsüber auf dem Firmenparkplatz, ist die lange Ladezeit unproblematisch. Zudem erhält man da viel Energie fürs Geld. Anders sieht es mit den Tarifen unterwegs aus, denn da ist das Spektrum der Strompreise beträchtlich. Vom kostenlosen Laden bis zu hohen Pauschaltarifen findet man alles.

Bei Brennstoffzellenautos profitiert man zwar vom schnellen Auftanken und der grösseren Reichweite. Aber Letztere ist nötig, um an eine der wenigen Wasserstofftankstellen in der Schweiz zu gelangen.

Die Investitionen fokussieren

Soll man gleichzeitig in zwei potenziell nachhaltige Antriebstechnologien investieren? Für gewisse Anwendungsfälle wie für Lastwagen ist Wasserstoff sicher sinnvoll, aber sonst ist es eine Nischenlösung, um überschüssigen Strom mittels Elektrolyse in einen speicherbaren Energieträger umzuwandeln und zu nutzen. Da sich der Überschuss in der Schweiz in Grenzen hält, das Ausbaupotenzial der erneuerbaren Energien limitiert ist und der Strombedarf durch den Umstieg auf Wärmepumpen zum Heizen von Gebäuden steigen dürfte, wäre es naheliegend, die Investitionen auf die Elektromobilität zu bündeln, also auf die effizientere Antriebstechnologie mit der besser ausgebauten Ladeinfrastruktur. Dies könnte zu einem schnelleren Durchbruch der nachhaltigeren Mobilität führen.

Referenz | Référence

[1] Brian Cox, Christian Bauer, Die Umweltauswirkungen von Personenwagen: heute und morgen. PSI, 2018.



Autor | Auteur

Radomir Novotný ist Chefredaktor Electrosuisse.
Radomir Novotný est rédacteur en chef Electrosuisse.
 → Electrosuisse, 8320 Fehraltorf
 → radomir.novotny@electrosuisse.ch

Avantages des propulsions alternatives

Lorsque les voitures électriques sont alimentées par de l'électricité verte, il n'y a pas d'émissions polluantes. Si elles utilisent de l'électricité produite avec des sources fossiles, elles déplacent alors les émissions des zones plus peuplées vers les zones à plus faible densité de population et contribuent ainsi à une meilleure qualité de l'air dans les villes. En outre, les émissions acoustiques se limitent au bruit de roulement et de l'air et, dans certains modèles, au « murmure » des convertisseurs et au son généré artificiellement pour avertir les piétons lorsque la voiture roule à faible vitesse.

Un autre avantage des voitures électriques et à hydrogène est le couple élevé des entraînements électriques, déjà à partir de l'arrêt, qui peut de plus se déployer sans changement de vitesse, les moteurs électriques étant dotés d'une grande plage de régimes. Étant donné qu'il n'y a ni embrayage ni huile de transmission, et que la récupération d'énergie lors du freinage ménage les plaquettes de frein, l'entretien est aussi réduit. Les intervalles entre les services peuvent être prolongés et les frais diminués.

Limitations et obstacles

Dans un premier temps, les voitures électriques sont plus chères que les voitures conventionnelles, mais à long terme, les coûts pour l'énergie et l'entretien sont moins élevés. Les voitures électriques ont aussi une durée de recharge relativement longue, souvent associée à une autonomie plus restreinte. Il existe bien des stations de recharge rapide à certains endroits, mais en général, les véhicules sont rechargés lentement. Cependant, en intégrant la recharge du véhicule dans la routine quotidienne, la nuit dans son garage ou la journée sur le parking de l'entreprise, la recharge lente ne pose aucun problème et, de plus, n'exige aucune action supplémentaire. Et dans ce cas, on obtient beaucoup d'énergie pour son argent. La situation est différente avec les systèmes de tarification lorsque l'on est en route. L'éventail des prix de l'électricité s'étend alors de la recharge gratuite aux tarifs forfaitaires élevés.

Les voitures à pile à combustible permettent de faire le plein rapidement et disposent d'une plus grande autonomie. Toutefois, celle-ci est aussi nécessaire pour se rendre à l'une des rares stations-service d'hydrogène de Suisse.

Concentrer les investissements

Devons-nous investir simultanément dans deux technologies de propulsion potentiellement durables? Dans certains cas, comme pour les camions, l'utilisation d'hydrogène est certainement judicieuse, mais il s'agit sinon d'une solution de niche pour convertir par électrolyse le courant excédentaire en un vecteur d'énergie stockable et l'utiliser plus tard. Or, cet excédent est limité en Suisse, le potentiel d'expansion des énergies renouvelables est restreint et les besoins en électricité devraient augmenter en raison du passage aux pompes à chaleur pour le chauffage des bâtiments: il serait donc logique de concentrer les investissements sur l'électromobilité, soit sur la technologie de propulsion la plus efficace et l'infrastructure de recharge la mieux développée. Cela pourrait constituer un pas décisif vers une mobilité plus durable.