

... über Forschung, Entwicklung und Anwendung der Antriebstechnologien
 ... über Analyse und Beurteilung von Motoren- und Antriebskonzepten
 ... über die Aspekte der Energie
 ... über Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Elektroautos fahren weiter – bei gleichbleibendem Preis

Erich Schwizer, TCS Emmen

Vor zehn Jahren haben ein auf Elektrik umgebauter Renault Twingo oder ein Think City etwa 46'000 Franken gekostet. Etwa zu diesem Preis wurden dann 2011 auch die ersten Fahrzeuge des Trios Mitsubishi i-MiEV, Citroën C-Zero und Peugeot i-On angeboten. Ihr Komfort, Fahrgefühl und geringe Geräuschkulisse waren «wie in einer anderen Welt». Und schon vier Jahre später kosteten sie etwa

12'000 Franken weniger. Die Firma Think gab es nicht mehr.

Angesichts dieser Entwicklung und der neuen Modelle auf dem Markt beschloss der TCS, die heute angebotenen Elektroautos mit denjenigen von 2015 zu vergleichen. Dazu wurden 14 Modellvarianten von 11 Marken betrachtet – rückwirkend und mit Informationen aus verschiedenen Quellen.

Angebot 2015	Reichweite ca.	Kaufpreis ca. CHF	Preis/km RW CHF
Minimum ¹⁾	100 km	25'650.–	195.– ¹⁾
Maximum ¹⁾	331 km	99'750.–	494.– ¹⁾
Mittelwert	127 km	43'500.–	343.–

¹⁾ Das Modell mit der kürzesten/längsten Reichweite (RW) ist nicht das gleiche Modell, was dasjenige mit dem günstigsten/höchsten Preis pro km RW.

Von den Reichweitenangaben, damals im NEFZ, wurde jeweils ein Drittel abgezogen, um die Vergleichbarkeit mit 2020 (WLTP-Angaben) zu vereinfachen. Auf der Datengrundlage 2020 im TCS Katalog

www.tcs.ch/autosuche und Preislisten wurde die Entwicklung der Neuwagenpreise und Reichweiten analysiert. Untersucht wurden 30 Modelle von 16 Marken aus dem sich ständig verändernden Fahrzeugangebot.

Einige Beispiele (Stand Mitte September 2020)

Angebot 2020	Reichweite ca.	Kaufpreis ca. CHF	Preis/km RW CHF
Hyundai Kona ⁴⁾	449 km	45'990.–	102.–
Kia e-Soul ⁴⁾	452 km	47'400.–	105.–
Mitsubishi i-MiEV	105 km ³⁾	22'000.–	220.–
Peugeot 2008 Electric Active ⁴⁾	428 km	42'650.–	100.–
Porsche Taycan 4S	429 km	135'700.–	316.– ²⁾
Seat Mii electric	255 km	24'100.–	95.– ²⁾
Tesla Model 3 St.- Range Plus ⁴⁾	409 km	45'980.–	112.–
Tesla Model S Long Range	610 km ³⁾	98'390.–	161.–
<i>Mittelwert aus 30 Modellen</i>	<i>331 km</i>	<i>55'200.–</i>	<i>167.–</i>

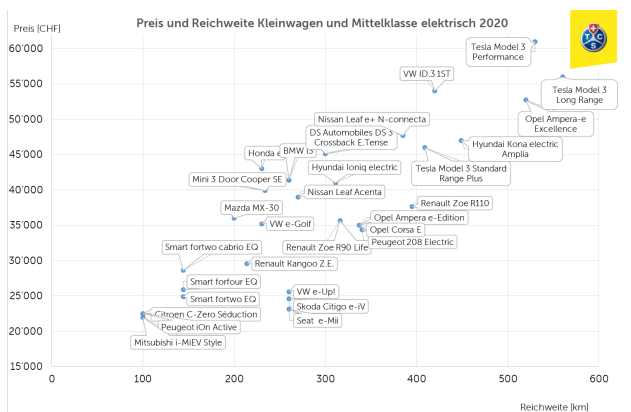
- 2) günstigster/höchster Preis pro km RW
- 3) kürzeste/längste RW
- 4) >400 km RW für <50'000 Franken

Ergebnis: Einige der Hersteller haben seit 2015 ihre Modelle über mehrere Stufen der Entwicklung angepasst und – entweder bei gleichbleibender Reichweite – den Preis weiter gesenkt (z. B. Mitsubishi, Peugeot, Citroen von ca. 34'000 auf ca. 22'000 Franken) oder – bei gleichbleibendem Preis – die Reichweite vergrößert (z.B. Renault Kangoo von 106 km 2015 auf 214 km 2020).

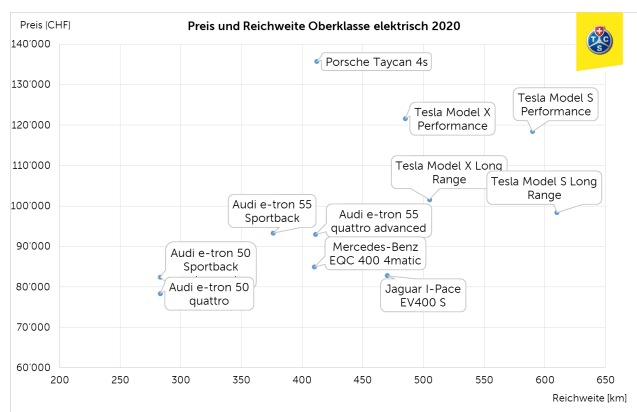
FAZIT: Seit 2015 hat sich der Mittelwert der Reichweiten fast verdreifacht, von 127 km auf 331 km. Gleichzeitig wurde der Preis pro Kilometer Reichweite halbiert von CHF 343 auf CHF 167.

Modelle mit mehr als 500 Kilometer Reichweite kosten nach wie vor über 50'000 Franken. Für den gleichen Betrag, der vor zehn Jahren für die besten Elektroautos investiert werden musste, erhält man heute ein Modell mit mehr als 400 km Reichweite nach WLTP.

Im Vergleich mit einem Auto mit Verbrennungsmotor der Preisklasse unter fünfzigtausend Franken, das je nach Jahreszeit und «Heimweh» etwa 42 Liter auf 770 bis 970 Kilometer verbraucht, fehlt zwar noch etwas Reichweite, aber die Richtung stimmt.



Fahrzeuge von 20'000 bis 65'000 Franken mit Reichweiten von 100 bis 560 km, Stand 22. Sept. 2020



Elf Modellvarianten von fünf Marken der Ober- und Luxusklasse von 75'000 bis 140'000 Franken mit Reichweiten von 280 bis 610 km, Stand 22. Sept. 2020. Preis und Reichweite divergieren stärker als in der Kleinwagen- und Mittelklasse.

Wasserstoff-betriebene Nutzfahrzeuge: eine Lösung zum fossil-freien Strassentransport

Meinrad Signer, MSCO

Seit ein paar Monaten sind Wasserstoff-betriebene Lastwagen von *Hyundai* in der Schweiz unterwegs, zurzeit sind es 21 und schon Ende Februar sollen es 46 sein. Die Antriebseinheit besteht aus Brennstoffzelle, Batterie und Elektromotor. Der Wasserstoff wird bei einem Laufkraftwerk bei Gösgen umweltfreundlich produziert.

Die treibende Kraft hinter diesem wegweisenden Projekt ist *H2energy*, ein kleines aber innovatives und kreatives Unternehmen im Grossraum Zürich. Sie haben es fertiggebracht, ein System aufzubauen, welches Produktion und Verteilung von Wasserstoff (mit *Alpiq* und *Linde*), einen Nutzfahrzeughersteller (*Hyundai*), einen Service Partner (*Auto AG*), viele namhafte Transportfirmen (inklusive *Coop* und *Migros*) und Energiefirmen (Tankstellen) umfasst. Somit konnte die berühmte «Huhn-Ei-Diskussion» eliminiert werden. Dieses von *H2energy* aufgebaute System kann als einmalig bezeichnet werden; in dieser Form ist selten ein derartiges Projekt aufgebaut worden. Die Auszeichnung mit dem *Watt d'Or Preis 2021* des Bundesamts für Energie BFE ist wohlverdient.

Die heutige grüne 2-Megawatt-Wasserstoffproduktion liefert 300 t H₂ pro Jahr; das reicht für 40 bis 50 Lastwagen, welche mit 350 bar betankt werden. Projekte für drei weitere Anlagen sind für 2021 geplant. Auch das Tankstellennetz wird auf 8 bis 10 Einheiten im 2021 ausgebaut werden. Die Betankung eines Fahrzeuges beansprucht eine ähnliche Zeit wie beim Diesel.

Die *Hyundai Xcient 4x2 Lastwagen* sind seit Monaten auf unseren Strassen anzutreffen, Solo 19 t, 36 t mit Anhänger. Die Antriebseinheit besteht aus zwei Brennstoffzelleneinheiten mit zusammen 190 kW, einem Batterie-Pack von 73 kWh (1 t), einem Elektromotor mit 350 kW und einem *Allison-Automatikgetriebe*. Die 34,5 kg Wasserstoff sind in 350 bar Druckbehältern gespeichert und ermöglichen einen Aktionsradius von zirka 400 km. Die gesamte Technik ist sauber angeordnet und installiert, benötigt jedoch noch sehr viel Platz. Für zukünftige Lösungen müssen einige Komponenten optimiert werden (zum Beispiel e-Achse). Dann wird es auch möglich werden,

Sattelzugmaschinen zu realisieren. Die Testfahrt ist ein Erlebnis, die Beschleunigung ist erwartungsgemäss sehr gut, und nur wenige Fahrwindgeräusche sind in der Kabine wahrnehmbar; eine neue Erfahrung in einem Lkw. Es erübrigt sich zu bemerken, dass natürlich keine Schadstoffemissionen entstehen; je nach Wetterbedingungen kann eine kleine Wasserdampfwolke beobachtet werden. Das sind also Zero-Emission-Vehicles (ZEV): kein CO₂, keine Schadstoffe.

Wie weiter in der Schweiz und Europa? – Gegen Ende 2021 werden weitere 70 Lkw's erwartet und – wie erwähnt – wird die Produktionskapazität von H₂ ausgebaut werden. Ziel ist es, in der Schweiz 1600 H₂-Lkw's im Jahre 2025 auf der Strasse vorzufinden. *Hyundai* wird die Produktionskapazität auf 2000 H₂-Lkw's / Jahr steigern. Projekte in Deutschland / Europa sind von *H2energy* geplant. Die kürzlich vereinbarte Verbindung (Joint Venture) von *H2energy* mit *Trafigura* wird den H₂-Projekten einen weiteren signifikanten Schub verleihen, da auch die Finanzierung breit abgestützt werden kann.

Kürzlich haben Europas Nutzfahrzeughersteller beschlossen, ab 2040 nur noch Zero-Emission-Trucks zu produzieren und zu verkaufen. *Daimler* hat schon früher bekannt gegeben, dass 2039 der letzte Verbrennungsmotor für Europa vom Band läuft. Es wird erwartet, dass europäische Brennstoffzellen Lkw's im Zeitraum 2023 bis 2025 auf dem Markt erhältlich sein werden, das heisst in Serienproduktion. Die rasche Einführung dieser Zukunfts-Lkw's ist stark beeinflusst durch die CO₂-Reduktionsziele der EU für Lkw's. Unklar ist die Kostenstruktur der ZEV; in der Schweiz funktioniert das durch die Befreiung von der LSV. Diese ehrgeizigen Ziele können mit klassischen Verbrennungsmotoren nicht erreicht werden. Auf der anderen Seite will die EU die Abgasemissionen von Pkw und Lkw mit einer Euro 7/VII Norm extrem verschärfen, welche zumindest für Nutzfahrzeuge heute technisch nicht darstellbar ist. Die Industrie müsste also hunderte von Millionen in Verbrennungsmotoren investieren, welche dann ein paar Jahr später im Museum landen infolge der Kohlenstoff-freien Energiestrategie und parallel ebenso hunderte Millionen für die ZEV.

Als alter Verbrennungsmotoriker frage ich mich, wie das mit dem Verbrennungsmotor weiter geht. Wandert er ins Museum, hat der Wasserstoffmotor eine Chance, sind Treibstoffe wie OME und DME oder e-fuels eine Alter-

native? All diese Konzepte sind aber nicht ZEV. Und was wird mit dem non-road Sektor (Baumaschinen, Landwirtschaft)? – Diskussionsstoff für die Zukunft und unsere kommenden SSM-Vortragstagungen.

Der Strassengüterverkehr auf dem Weg zur CO₂-Neutralität

Ueli Wolfensberger

DAF Trucks, Daimler Trucks, Ford Trucks, IVECO, MAN Truck & Bus, Scania und Volvo Group sind die Nutzfahrzeugmitglieder der Vereinigung ACEA (European Automobile Manufacturers Association). Diese Hersteller haben sich unter dem Dach der ACEA mit führenden Wissenschaftlern des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) zusammengetan und in einer gemeinsamen Erklärung vom Dezember 2020, unterschrieben von den Direktoren des PIK und der Hersteller, den Fahrplan und die Bedingungen für die Umgestaltung des Strassengüterverkehrssystems skizziert.

Diese enthält einige bemerkenswerte Aussagen: Die Verfasser kommen zum Schluss, dass bis 2040 alle verkauften neuen Lkw fossilfrei sein müssen, um bis 2050 eine CO₂-Neutralität zu erreichen. Sie sind nicht nur überzeugt, dass es notwendig ist, sondern sie wissen, dass es möglich ist, und sie sind bereit, es zu tun. Die Hersteller werden stark in neue Lösungen investieren, vorab in Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), in Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge und auch in alternative Treibstoffe.

Voraussetzung für einen schnellen Übergang zu neuen Lösungen ist die entsprechende Infrastruktur, ein Lade- beziehungsweise Betankungsnetzwerk mit genügender Kapazität. Die Fahrzeughersteller wollen in Kooperation mit den Betreibern bei dieser Entwicklung eine aktive Rolle spielen.

Neben Investitionen der Nutzfahrzeugindustrie sind auch politische Optionen wie Straßenbenutzungsgebühren und ein Energiebesteuerungssystem auf der Grundlage von Kohlenstoff- und Energiegehalt entscheidend. Laut ACEA und PIK könnte ein solides CO₂-Emissionspreissystem eines der wirksamsten Instrumente sein, da sich emissionsfreie Fahrzeuge nicht durchsetzen, solange Diesel billiger bleibt. Alle Energieträger, sei es Elektrizität, Wasserstoff oder Treibstoff, müssen schnell dekarbonisiert werden. Das wird hauptsächlich mit einer Kohlenstoffsteuer gelingen, die in allen Fällen die ganze Well-to-Wheel-Kette berücksichtigt. Wissenschaft und Fahrzeughersteller sind sich einig, dass der CO₂-Preis viel höher sein muss als heute um zu CO₂-Neutralität zu gelangen.

„Wir sind bereit; ein Nullemissions-Transportsystem ist möglich!“

Weitere Informationen:

- Pressemitteilung des PIK: <https://www.acea.be/press-releases/article/all-new-trucks-sold-must-be-fossil-free-by-2040-agree-truck-makers-and-clim>

<https://www.acea.be/uploads/publications/acea-pik-joint-statement-the-transition-to-zero-emission-road-freight-trans.pdf>

Dimethylether als Treibstoff für Langstrecken-Nutzfahrzeuge

Patrik Soltic, Empa

Im Bereich der Personenwagen befinden wir uns schon seit etlichen Jahren auf einem an die EU-Vorschriften angelehnten Absenkpfad der CO₂-Flottenmittelwerte, wobei hohe Sanktionen bei Nichteinhaltung fällig werden. Auch im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge (Liefer-

wagen und leichte Sattelschlepper bis 3.5 Tonnen) sind 2020 ebenfalls an die EU angelehnte Flottengrenzwerte eingeführt worden. Als nächstes stehen CO₂-Absenkungen bei schweren Nutzfahrzeugen an. In diesem Bereich werden die Grenzwerte nicht in absolu-

ten Zahlen definiert, sondern relativ zum Stand 2019: im Jahr 2025 sollen die CO₂-Emissionen in Durchschnitt der relevantesten Segmente um 15% und im Jahr 2030 um 30% reduziert werden.

In der EU sind aktuell um die 300 Millionen Personenwagen und um die 4 Millionen Nutzfahrzeuge zugelassen. Die Personenwagen sind für 62% der CO₂-Emissionen im Strassenverkehr verantwortlich, die Nutzfahrzeuge für 38%. Mit anderen Worten: 1.3% der Strassenfahrzeuge sind Nutzfahrzeuge, diese machen aber 38% der CO₂-Emissionen aus. Von den Nutzfahrzeugen wiederum produzieren Fahrzeuge über 30 Tonnen rund 85% der Tonnen-Kilometer. Dies macht deutlich, dass die schwersten Nutzfahrzeuge sehr CO₂-relevant sind, weil sie einerseits viel Energie pro Kilometer benötigen und andererseits viele Kilometer zurücklegen.

Die aktuellen Vorschriften im Strassenverkehrsbereich betrachten lediglich Auspuff CO₂-Emissionen (sogenannte Tank-to-Wheel Emissionen). Diese politisch gewollte Ausblendung der vorgelagerten Prozesse macht Elektrofahrzeuge zur Erreichung der Flottenziele sehr attraktiv. Sie gehen mit Null CO₂-Emissionen, ungeachtet der Stromherkunft und ihrer Kilometerleistung, in die Rechnung ein. Diese Betrachtungsweise wird mit Sicherheit im Segment der leichten Fahrzeuge mit tiefen Kilometerleistungen zu einem anhaltenden Attraktivitätsgewinn der Elektroantriebe führen, weil diese technisch vergleichsweise einfach realisierbar sind. Im Bereich der schweren, energieintensiven Langstreckenfahrzeuge hingegen ist keine zu chemischen Energieträgern alternative Technologie absehbar. Um dort die CO₂-Absenkungen zu erreichen, stehen uns also im Wesentlichen zwei Pfade zur Verfügung: die Effizienzsteigerung des Energiewandlers sowie der Umstieg auf alternative chemische Energieträger.

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge war eine möglichst hohe Effizienz schon immer viel stärker im Fokus der Hersteller als im Bereich der Personenwagen, denn die Treibstoffkosten dominieren oftmals die Betriebskosten von Nutzfahrzeugen. Moderne Nutzfahrzeug-Dieselmotoren nähern sich aktuell einem Wirkungsgrad von 50% und weitere Effizienzgewinne werden aus thermodynamischen Gründen zunehmend schwierig. Der grössere Hebel als Effizienzgewinne sind darum kohlenstoffarme oder erneuerbare Treibstoffe.

Erneuerbare Treibstoffe müssen grosstechnisch hergestellt werden. Als chemische Bausteine eignen sich dafür typischerweise Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O). Vergleichsweise kosteneffizient lassen sich daraus eher kurzkettige Moleküle herstellen, dies also zum Beispiel: H₂ (Wasserstoff), CH₄ (Methan), CH₃-O-H (Methanol), C₂H₅-O-H (Ethanol), CH₃-O-CH₃ (Dimethylether, DME) oder NH₃ (Ammoniak). Da Ammoniak aus Sicherheitsgründen für den Strassenverkehr eher nicht in Frage kommt, bleibt Wasserstoff sowie die Kohlenwasserstoffe für die Nutzung in Verbrennungsmotoren.

Aus den aufgelisteten Kohlenwasserstoffen ist einzig DME so zündwillig, dass es im Dieselmotor eingesetzt werden kann (Cetanzahl >55). Dies macht DME zu einem attraktiven Treibstoff für Langstreckenfahrzeuge.

Die physikalischen Eigenschaften von DME sind sehr ähnlich zu Propan/Butan. Es ist unter atmosphärischen Bedingungen gasförmig und unter geringem Druck flüssig. Das heisst, es lässt sich vergleichsweise einfach in einem Fahrzeugtank mitführen und die Betankungsanlagen sind kostengünstig. DME wird in einem praktisch verlustfreien katalytischen Prozess aus Methanol hergestellt. Es wird heute bereits in grossen Mengen produziert und in industriellen Prozessen sowie oftmals auch als Treibmittel in Spraydosen eingesetzt. Aktuell wird der Grossteil von DME aus fossilen Quellen (Erdgas, Kohle) erzeugt. Pilotprojekte haben gezeigt, dass es sich auch effizient aus biogenen Quellen wie Holz, Schilf, Klärschlamm oder Biogas oder, nicht durch Biomasse-Verfügbarkeit begrenzt, mittels Power-to-X Technologie erzeugen lässt. Im Forschungsstadium sind noch Technologien, welche DME mittels sogenannter sorptionsgestützter Katalyse direkt aus CO₂ und Wasserstoff, also ohne den heute üblichen Umweg über Methanol, erzeugen.

In einem aktuell laufenden und vom Bundesamt für Energie geförderten Kooperationsprojekt von FPT Motorenforschung AG Arbon, Empa Dübendorf und Motorex Langenthal wird das Potenzial von DME in einem modernen Dieselmotor für schwere Nutzfahrzeuge erforscht. Da DME Sauerstoff enthält, zeigt sich, dass die dieselmotorische Verbrennung russfrei erfolgt. Dies ermöglicht völlig andere Prozessparameter als bei der Dieselerbrennung. So können wir beispielsweise sehr hohe Abgasrückführaten realisieren, um die NO_x-Emissionen zu unterdrücken, und haben trotz-

dem kein Russproblem. Dies führt dazu, dass DME ein sehr guter Treibstoff ist, um auch zukünftige Schadstoffemissionsvorschriften mit vergleichsweise einfacher Abgasnachbehand-

lung zu erreichen. Es ist also durchaus vorstellbar, dass DME in Zukunft zu einem wichtigen Baustein der CO₂-armen und schadstofffreien Langstreckenmobilität werden kann.

Weitere Informationen:

- BioDME Herstellung: <http://www.biodme.eu/>

<https://www.energie.de/et/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/dimethylether-dme-neue-power-to-x-anlage-erzeugt-emissionsarmen-diesel-ersatz-2019766/>

In Kürze

- Eine Tochterfirma der *Brugg Kabel AG* liess zwei Kabel patentieren, mit denen Batterieautos innert wenigen Minuten vollständig aufgeladen werden können. Mit einem der beiden Kabel, mit dem ein Ladestrom bis 500 Ampère möglich ist, kann innert 14 bis 16 Minuten Strom für 300 Kilometer nachgeladen werden. Mit dem zweiten, gekühlten Kabel soll in acht Minuten Strom für 500 Kilometer geladen werden können. Voraussetzung ist natürlich, dass Stromzapfsäule und Batterie solche Ladegeschwindigkeiten zulassen.
- Die Südtiroler Firma *Prinoth* startet diesen Winter die Testphase mit dem Pistenfahrzeug *Leitwolf h2MOTION*, ein mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betriebenes Konzeptfahrzeug. Mit vergleichbarer Leistung wie eine konventionelle Pistenraupe (400 kW) wird eine Betriebsdauer von bis zu vier Stunden erwartet.
- Auch eine batterieelektrische Variante mit halber Leistung (200 kW), der *Husky eMOTION*, ist im Test; hier wird mit einer Betriebsdauer von bis zu drei Stunden gerechnet.

Veranstaltungen und Termine

*** *Covid-19 bringt alles durcheinander!* ***

Die SSM-Fachtagung in Sursee musste leider abgesagt werden. Wir freuen uns auf die nächste Tagung im Herbst 2021.

März/April 2021

SSM-Forum Technik

Thema und Einzelheiten werden auf unserer Homepage publiziert.

Die Einladung an die SSM-Mitglieder folgt per E-Mail .