

E-Mobilität - schlechter als geglaubt?

In den Medien wird darüber gestritten, ob ein Elektromobil aus dem Blickfeld der Umwelt besser oder gar schlechter sei, als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Stimmt das wirklich? Und wie sieht die Bilanz der E-Mobilität aus, wenn neben der Fahrenergie auch die graue Energie des Fahrzeuges, der Batterie und der Infrastruktur mitberücksichtigt wird? E-Mobilität kann es schon heute mit Verbrennungsmotoren aufnehmen. Die Automobilität – fossil oder elektrisch - ist jedoch einer unserer grössten Ressourcenfresser.

Von den einen wird das Elektromobil als individuelles Fahrzeug der Zukunft gefeiert, andere glauben dass das Fahrzeugs der Zukunft weiterhin mit Verbrennungsmotor arbeitet: das Elektromobil bringe keinen Vorteil bezüglich Energie und CO₂-Ausstoss, ist viel zu teuer und das Laden der Batterie dauert zu lange. Was stimmt nun wirklich?

Von Fahrenergie bis Infrastruktur

Die hier eingesetzte Methodik ist nicht eine detaillierte wissenschaftliche Studie wie die TA-Suisse Studie der EMPA, trotzdem sollte sie verlässlich und „richtungssicher“ sein, das bedeutet, dass bei aller Unschärfe die Grössenordnungen stimmen und sie damit den handelnden Menschen ermöglicht, intelligente Entscheide zu treffen. Ich habe diese Methodik bereits in meinem Buch „Kraftwerk Schweiz“ verwendet. Allerdings habe ich mich im Buch bei der Mobilität nur auf die Fahrenergie konzentriert; in diesem Beitrag wird das Modell verbessert und auch die graue Energie des Fahrzeuges und der Batterie mitberücksichtigt. Ich gehe auch auf die graue Energie der Infrastruktur ein.

So wird gerechnet

Wenn wir zwei unterschiedliche Antriebssysteme wie ein Fahrzeug mit Verbrennungsantrieb mit einem Fahrzeug mit Elektroantrieb miteinander vergleichen wollen, so müssen wir beide Systeme auf dieselbe Basis stellen. Da ist einmal der Fahrzeugtyp: Kleinwagen, Mittelklassewagen oder Off-Roader? Ebenfalls gehen wir davon aus, dass beide Fahrzeugsysteme nach dem heutigen

Stand der Technik entwickelt wurden. Für unseren Vergleich wählen wir das schweizerische Durchschnittsauto: 1400 kg Gewicht, 100 PS (75 kW), 5 Sitzplätze, 15'000 km Jahresfahrtdistanz, Total 200'000 km im Verkehr, beim Elektrofahrzeug eine Reichweite mit geladener Batterie von 400 km. Bei beiden Fahrzeugen gehen wir von einem Gewicht des eigentlichen Automobils (ohne Antriebsstrang) von 1000 kg aus; dazu kommt beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor der Antriebsstrang mit Motor, Getriebe, Kardanwelle, Differential mit Total 400 kg Gewicht.

Prognosen für 2025 heute schon Realität

Beim Elektrofahrzeug wiege, der Antrieb mit 2 Elektromotoren (elektronisches Differential) und Leistungselektronik 100kg; zusätzlich kommt das Gewicht der Batterie dazu. Der Sportwagen Tesla Roadster verwendet eine Batterie mit 10 kg Gewicht pro kWh (100 Wh pro kg) und Kosten von 1000\$ pro kWh. Die Batterie speichert 56 kWh und ist also etwa 560 kg schwer; damit ist der komplette Antriebsstrang eines Fahrzeuges mit dieser Batterie etwa 660 kg schwer. Bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor beträgt das Gewicht 400 kg. Der aktuelle Tesla Model S hat eine Batterie mit einer Energiedichte von etwa 5 kg pro kWh (200 Wh pro kg) und einem Preis von etwa 500\$ pro kWh. Speichern wir wieder 56 kWh so verringert sich das Gewicht des gesamten Antriebsstrangs inklusive Batterie auf 380 kg; etwa gleichviel wie beim Verbrennungsmotor. Bereits heute werden Batterien mit 4 kg pro kWh (250 Wh pro kg) im neuen elektrischen Renault verbaut. Der Preis liegt unter 200 € pro kWh und soll in Kürze noch halbiert werden. Die TA-Suisse Studie sagt diese Werte, die bereits heute real sind, für etwa 2025 voraus. Experten gehen davon aus, dass in Kürze das Elektrofahrzeug den Markt dominieren wird.

Vergleichbarer CO₂-Rucksack – bei gleicher Distanz notabene

Wie viel CO₂ steckt nun in einem Fahrzeug? Der CO₂ Fussabdruck beträgt laut der EMPA 4.3kg CO₂ pro kg Fahrzeug und 6 kg CO₂ pro kg Batterie. Das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor hat einen CO₂-Rucksack von 6t. Bei einem vergleichbaren Fahrzeug mit alter Batterie haben wir einen CO₂ Rucksack von 4.7t für das Fahrzeug und 3.4t für die Batterie also insgesamt 8.1t; verwenden wir die aktuelle Batterie-Technologie so hat die Batterie einen CO₂ Rucksack von 1.7t und damit belastet das Elektrofahrzeug die Umwelt in derselben Größenordnung wie das ausgereifte Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Elektrofahrzeuge können in ihrem Lebenszyklus locker 1 Mio km zurück legen, da der Verschleiss des Elektromotors viel geringer ist als beim Verbrennungsmotor. Damit wird auch der CO₂-Ausstoss des eigentlichen Fahrzeuges auf ein Fünftel reduziert. Für unsere weiteren Berechnungen rechnen wir auch beim Elektrofahrzeug dieselbe Fahrtdistanz wie beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor; wir rechnen also zu Ungunsten des Elektrofahrzeuges. In Zukunft wird die graue Energie im Elektrofahrzeug geringer sein als im Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

Der spezifische Brennstoffverbrauch wird normalerweise mit dem NEFZ-Test (Neuer Europäischer Fahrzeugtest) bestimmt. In diesem Test „fährt“ das Fahrzeug auf dem Prüfstand eine Strecke von 10 km mit 5 Beschleunigungen 0 km/h auf 50 km/h und einer Beschleunigung auf 80 km/h. Die Beschleunigung ist relativ moderat mit 28 Sekunden Beschleunigungszeit. Dieser Test ist für den Vergleich verschiedener Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor untereinander geeignet.

Wirkungsgrad Antriebsmotor entscheidend

Der Energieverbrauch des Fahrzeuges für den NEFZ-Test kann mit der „Praktikerformel“ abgeschätzt werden. Die notwendige Energie Rad auf Strasse ist dabei von der gefahrenen Distanz, vom Fahrzeuggewicht und von einer Konstante (0.9 kWh pro 100 kg Fahrzeuggewicht und 100 km Fahrdistanz) abhängig. Dabei spielt die Antriebsart (Verbrennungsmotor oder Elektroantrieb) keine Rolle. Wenn wir jetzt wissen wollen, wieviel Energie wir benötigen, so müssen wir den Wirkungsgrad des Antriebsmotors mit berücksichtigen.

Benzinmotor 27%...

Der Benzinmotor hat einen maximalen Wirkungsgrad von 34%; in der Realität ist dieser Wert von der Tourenzahl des Motors abhängig, er liegt in der Praxis zwischen 15% und 27%. Wenn Fahrzeuge übermotorisiert sind (was heute oft der Fall ist), z.B. ein Motor mit 350 PS für ein Fahrzeug von 1400 kg, so ist der Wirkungsgrad meist schlecht. Für unser Durchschnittsauto rechnen wir mit 27% Motorwirkungsgrad (sehr hoch, kann kaum noch gesteigert werden). Bei einem Energiegehalt von etwa 10 kWh pro Liter Benzin verbraucht unser Durchschnittsauto für den NEFZ 4.7 Liter Benzin auf 100 km.

...Elektromotor über 90%

Der Wirkungsgrad des Elektromotors liegt beim NEFZ inklusive des notwendigen Wechselrichters bei über 90% (Elektromotor alleine 95% Wirkungsgrad), und das über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Ausserdem haben Elektromotoren den grossen Vorteil, dass sie das höchste Drehmoment auch im Stillstand erzeugen. Deshalb sind Elektromotoren optimal für den Einsatz in einem Fahrzeug geeignet. Elektrisch betriebene Fahrzeuge verfügen über eine sensationelle Beschleunigung: ein Testauto mit Elektromotoren der ETH hält den Weltrekord und beschleunigt in 1.5 Sekunden über 30 Meter auf 100 km/h! Bei der Effizienzbetrachtung des Elektromobils muss zusätzlich das Ladegerät inklusive Batterie mitberücksichtigt werden; gemeinsam haben Sie einen Wirkungsgrad von etwa 90%. Unser theoretisches Elektrofahrzeug benötigt für den NEFZ auf dem Prüfstand etwa 145 Wh/km beziehungsweise 15 kWh für 100km (dies entspricht etwa 1.5 Liter Benzin). Energiemässig ist das Elektromobil beim NEFZ etwa 3 Mal effizienter.

In der Realität

Nun wollen wir ja nicht auf dem Prüfstand sondern in der Realität fahren. Ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor benötigt in der Realität mehr als 30% mehr Energie als im Prüfstand; für unser Fahrzeug landen wir also bei 6.1 Liter pro 100 km. Weshalb ist das Benzinfahrzeug in der Realität so viel schlechter?

- Der NEFZ ist sehr günstig für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ausgelegt
- wenn von 0 auf 50 km/h in 28 Sekunden beschleunigt wird, wäre das so langsam, dass in der Realität nachfolgende Fahrzeuge die Hupe nutzen würden. Schnelles Beschleunigen ist schlecht für den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors.
- es gibt in der Schweiz kaum eine Strecke von 10 km, auf der nur 6 Mal beschleunigt werden muss. (In urbanen Gebieten kann es vorkommen, dass alle paar 100 m komplett abgebremst werden muss.) Dabei wandelt sich die gesamte kinetische Energie des Fahrzeuges in Wärme.
- Die Motorfahrzeuge sind stark übermotorisiert. Zu leistungsstake Motoren sind bei tiefen Geschwindigkeiten äusserst ineffizient.
- In der Realität haben wir vor allem bei hohen Geschwindigkeiten einen hohen Luftwiderstand und deshalb einen zusätzlichen Energieverbrauch, den es im Prüfstand nicht gibt.
- Seit dem VW-Skandal wissen wir, dass Fahrzeuge zugunsten des NEFZ manipuliert werden: auf den ersten 10 km (Prüfdistanz) wird auf das Aufladen der Batterie verzichtet. Elektrische Energie im Auto wird für Anlasser, Licht, Signalisation und Bordelektronik genutzt. Die Erzeugung ist ineffizient, da der Generator direkt an den schlechten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gekoppelt ist. In Deutschland haben Untersuchungen gezeigt, dass ein Auto mit Verbrennungsmotor in der Realität durchschnittlich 42% mehr Treibstoff verbraucht als beim NEFZ; wir rechnen hier mit 30%.
- Wenn das Fahrzeug auf einen Berg fährt, so wird potentielle Energie gespeichert. Bei einer Höhendifferenz von 100m auf 10km (in der Schweiz üblich) entspricht die gespeicherte potentielle Energie nahezu 30% der Fahrenergie; sie wird zum grossen Teil beim abwärts fahren in Bremsenergie (Wärme) verwandelt.

Beim Elektrofahrzeug ist der Unterschied zwischen NEFZ und Realität nur etwa 5%. Die Gründe dafür liegen vor allem in der Möglichkeit zur Rückgewinnung der Energie:

- Die Effizienz des Elektromotors ist über den gesamten Arbeitsbereich hoch.

- In der Realität wird in urbaner Umgebung mit vielen Start/ Stop im Elektromobil dank der Energierückgewinnung meist ohne Bremse gefahren; damit wird die im Fahrzeug gespeicherte dynamische Energie nicht durch die Bremse in Wärme verwandelt, wie dies beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor der Fall ist, sondern in die Batterie zurück gespeist.
- Verluste bei hohen Geschwindigkeiten durch Luftwiderstand gibt es auch bei Elektrofahrzeugen.
- Umwandlung von elektrischer Energie der Batterie in das lokale Stromnetz im Auto ist dank den eingesetzten Wechselrichtern mit etwa als 95% Wirkungsgrad hoch effizient.
- Viele Gegner des Elektroautos sagen, dass im Winter die Innenraumheizung viel Energie verbraucht. Mit diesem Argument hatten sie in der Vergangenheit Recht. Heutige Elektromobile wie das Model S von Tesla nutzen eine Wärmepumpe und sind besser Wärme - isoliert als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (beim Verbrennungsmotor entsteht sehr viel Abwärme, deshalb wird oft auf gute Wärmedämmung verzichtet).
- Heutige Fahrzeuge verfügen über hocheffiziente LED-Beleuchtung und energieeffiziente Computersysteme.
- Die potentielle Energie beim Bergfahren kann mit dem Elektromobil zum grossen Teil wieder rückgewonnen werden.

Die hier berechneten Werte für die Elektromobilität stimmen recht genau mit der Praxis überein, dies haben mir mehrere Nutzer der Elektromobilität bestätigt. Darunter ist auch ein Fahrer, der mit seinem Tesla Model S in 2 Jahren rund 70'000 km zurückgelegt hat; darunter viele Berg und Tal Fahrten und Auslandsreisen nach Polen und Jugoslawien. Vergleichen wir den realen Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen mit benzinbetriebenen Fahrzeugen, so sind Elektrofahrzeuge in der Realität etwa 4 Mal energieeffizienter.

Das Auto ein „Stehzeug“

Es wird gesagt, dass das Landen eines Elektromobils viel länger dauert als das Betanken eines Benzinfahrzeuges. Das ist korrekt, wenn Elektrofahrzeuge ebenso betrieben werden wie Benzinfahrzeuge. Wenn wir aber unser Verhalten ändern, so gibt es für Elektrofahrzeuge mit dem „Betanken“ keine Probleme. Im Alltag fahren wir täglich durchschnittlich 20 – 30 km. Wenn das Auto an einer gewöhnlichen Steckdose eingesteckt ist, so wird es etwa mit 2.5kW geladen (entspricht etwa 16 km pro Stunde). Das Fahrzeug ist eigentlich kein Fahrzeug, sondern ein „Stehzeug“, es ist nur während 2 Stunden unterwegs und steht 22 Stunden auf einem Parkplatz. Jetzt müssen wir nur noch dafür sorgen, dass jeder

Parkplatz über eine gewöhnliche Steckdose verfügt und das Auto ist immer geladen. Dank diesem Vorgehen muss das elektrische Netz nur in Ausnahmefällen ausgebaut werden. Sollten wir trotzdem einmal mit dem Elektromobil nach Hamburg fahren wollen, so lohnt es sich, nach etwa 300 km einen Halt einzuschalten und für eine halbe Stunde ein Kaffee zu trinken. Eine Schnelladestation kann in einer Stunde mit 120 kW bis zu 650 km nachladen.

CO₂ Ausstoss für die Fahrt

Nun wollen wir den CO₂ Ausstoss für die Fahrt berechnen. Benzin produziert 317 g CO₂ pro kWh; ein Liter Benzin hat etwa 10 kWh Energiegehalt und produziert deshalb etwa 3.17 kg CO₂. Wie ist es möglich, dass 1 Liter Benzin mit ein Gewicht von weniger als einem Kilogramm 3.17 kg CO₂ produziert? Benzin ist hoch konzentrierter Kohlenstoff und für die Bildung des Kohlendioxids werden bei der Verbrennung pro Kohlenstoffatom zwei Sauerstoffatome, die schwerer als Kohlenstoff sind, der Luft entnommen. Berechnen wir für unser Fahrzeug den CO₂ Ausstoss für den NEFZ so erhalten wir 148 g CO₂ pro km (siehe Tabelle unten) und zusammen mit der grauen Energie (auf 200'000 km umgerechnet) im Fahrzeug 178 g CO₂ pro km. Dieser Werte werden üblicherweise durch die Fahrzeughersteller kommuniziert. Nun fahren wir mit den Fahrzeugen ja nicht auf dem Prüfstand, sondern in der Realität. Hier sind wir etwas schlechter und erhalten 192 (223 inklusiv Fahrzeug) g CO₂ pro km.

EROI bestimmt CO₂-Rucksack von Benzin

Bis jetzt sind wir davon ausgegangen, dass das Benzin durch eine magische Hand an die Tankstelle gebracht wurde. Das ist in der Realität aber nicht möglich und das Benzin hat einen CO₂ Rucksack. Um die Grösse dieses Rucksacks abzuschätzen, müssen wir uns zuerst mit dem EROI (Energy Return on Investment) beschäftigen. Der EROI gibt das Verhältnis der Energie an, die wir bei der Energiegewinnung hinein stecken müssen und wie viel wir anschliessend nutzen können. Ursprünglich (1930) betrug der EROI für Öl etwa 1:100; oft konnten die Ölquellen schon 10m unter der Oberfläche angebohrt werden. Im Verlauf der Zeit musste immer höherer Aufwand betrieben werden um ans Öl heranzukommen: 1990 war der EROI in den USA noch 1:43, 15 Jahre später 1:18; gehen wir „Off-Shore“ so haben wir einen EROI von etwa 1:10, bei Fracking 1:5 bis 1:7 und bei Ölsand 1:2. Wie schlecht muss es um die Ölquellen bestellt sein, dass wir jetzt bereits daran gehen, Ölsand abzubauen! Wenn wir das Öl gewonnen haben, so ist es noch nicht bei uns an der Tankstelle: zuerst muss es raffiniert werden (80% Effizienz) und dann noch zu uns transportiert werden (95% Effizienz). Zusätzlich kommt beim Abbau noch die graue Energie in den Maschinen (etwa 10%) dazu: Fördereinrichtungen, Pipeline, Pumpen, Öl-Tanks, Raffinerie, Öltransportschiffe, Verteillastwagen, Tankstellen, etc. Unser Durchschnittsauto produziert also in der Realität nicht wie von den Autoherstellern angegeben 148 g CO₂ pro km, sondern fast das Doppelte!!! Rund die Hälfte des CO₂ Ausstosses entsteht dabei im Ausland, bei

der Gewinnung und in der Raffinerie. Fahren wir mit Treibstoff, der aus Ölsand gewonnen wurde, so produzieren wir rund ein halbes Kilogramm CO₂ pro Kilometer und sind wir mit dem ineffizienten Off-Roader unterwegs, so verdoppelt sich dieser Wert auf etwa 1 kg CO₂ pro Kilometer. In einer nachhaltigen Schweiz wird uns nur noch 1t CO₂ pro Jahr und Person zur Verfügung stehen. Dieses Budget hätten wir in diesem Fall nach 1000 km ausgeschöpft.

CO₂-Rucksack von Strom

Wie stellt sich die Situation beim Strom dar? Alte Kohlekraftwerke sind richtige „Dreckschleudern“; sie haben einen Wirkungsgrad, der bei etwa 33% liegt und enthalten pro kWh etwa 1100 g CO₂. Moderne Kohlekraftwerke haben bis zu 48% Wirkungsgrad und sind mit 757 g CO₂ pro kWh leicht besser. Gaskraftwerke sind mit 388 g CO₂ pro kWh deutlich besser. Ganz gut schneidet der Schweizerische Strommix mit 42g CO₂ pro kWh ab. Das als Folge des grossen Anteils an Wasser- und Kernkraft am Mix. Übertragungsverluste im Netz von 5% sind dabei bereits mit eingerechnet.

Kohlestrom deutlich besser als Öl

Sind wir mit dem Elektromobil unterwegs und fahren mit Strom aus alten Kohlekraftwerken, so sind wir für die Fahrt mit 168 g CO₂ pro km trotzdem deutlich besser als mit einem Benzinfahrzeug mit aktuellem Öl und 280 g CO₂ pro km. Ein Elektrofahrzeug mit dem Schweizer Strommix kommt sogar auf nur 6g CO₂ pro km, wir sind also für die Fahrt fast 50 Mal schadstoffarmer geworden. Wenn wir die Fahrzeuge mit Benzinantrieb und Elektroantrieb unter realen Bedingungen miteinander vergleichen, so ist das Elektromobil etwa 7.8 Mal sauberer. Dieses Verhältnis dürfte auch für kleinere und grössere Fahrzeuge ähnlich sein.

Sind diese Rechnungen plausibel? Die Studie der EMPA kommt beim Benzinfahrzeug auf 41 g CO₂/km für das Fahrzeug (wir haben 30.1 g CO₂/km) und 220 g CO₂/km für's Fahren (wir haben 280 g CO₂/km). Beim Elektromobil kommt die Studie der EMPA fürs Fahrzeug auf 44 g CO₂/km (wir 23.7), für die Batterie 18 g CO₂/km (wir 8.4g) und für die Fahrt hat die EMPA 6 g CO₂/km (wir ebenfalls 6 g CO₂/km). Die Unterschiede entstehen durch die Wahl der Fahrzeug-Technologie; ich habe bei den Berechnungen vermutlich modernere und grössere Batterien eingesetzt. Aber im grossen und ganzen decken sich die zwei Berechnungsmodelle. Wenn wir aber davon ausgehen, dass Elektromobile während ihrem Lebenszyklus rund 1 Mio km zurücklegen, so ist auch der CO₂-Fussabdruck des Fahrzeuges 5 Mal besser als beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die Batterie reicht bei 1000 Ladezyklen und 400 km Reichweite pro Ladung etwa 400'000 km, also mehr als doppelt so weit wie mit dem Benzinfahrzeug. Für die Berechnungen hier bleiben wir bei 200'000km.

	EPOI	CO2 [g CO2/kWh]	CO2 Fahrze [g CO2/km]	CO2 Batterie [g CO2/km]	CO2 Fahrt [g CO2/km]	CO2 Rückst [g CO2/km]	Total [g CO2/km]
NEFZ	Ideal	317	30.1	0.0	148.1	0.0	178.2
Real	Ideal	317	30.1	0.0	192.5	0.0	222.6
konventionelles Öl, 1930	100 : 1	441	30.1	0.0	192.5	74.8	297.4
konventionelles Öl, 1990	43 : 1	447	30.1	0.0	192.5	78.4	301.0
konventionelles Öl, 2005	18 : 1	462	30.1	0.0	192.5	87.7	310.3
Off-Shore	10 : 1	485	30.1	0.0	192.5	101.5	324.1
Fracking	7 : 1	509	30.1	0.0	192.5	116.2	338.8
Öl Sand	2.1 : 1	833	30.1	0.0	192.5	312.7	535.3
Elektrisch Kohle alt		1100	23.7	8.4	167.9	0.0	199.9
Elektrisch Kohle neu		757	23.7	8.4	115.4	0.0	147.4
Elektrisch Gas		388	23.7	8.4	59.1	0.0	91.2
Elektrisch CH		42	23.7	8.4	6.4	0.0	38.5

CO₂ - Ausstoss eines Mittelklasse Personenwagens (1400 kg) beim fossilen und elektrischen Fahren unter Berücksichtigung der Energiegewinnung.

Mix aus PV, Wind und Biomasse

Bleibt die Frage, wer nach dem Wegfall der Schweizerischen Atomkraftwerke den Strom produziert? Wie ich in meinem Buch „Kraftwerk Schweiz“ zeige, ist es sehr wohl möglich die verlorengegangene Kernenergie durch den richtigen Mix aus PV, Wind und Biomasse zu ersetzen. Wenn wir relativ einfache Sparmassnahmen bei der Elektrizität realisieren, so können wir mit der heute zur Verfügung stehenden elektrischen Energie auch den zukünftigen zusätzlichen Bedarf für Wärme und Elektromobilität sicher stellen. Der CO₂ Fussabdruck für den CH Strommix bleibt in etwa gleich. Die Batterie im Elektromobil kann zusätzlich helfen, mit der volatilen Stromproduktion aus PV umzugehen.

Beim Heizen haben wir in der Schweiz eine sehr erfolgreiche CO₂ Lenkungsabgabe von CHF 84 pro t CO₂ (8.4 Rp. pro kg CO₂); CO₂ Verursacher zahlen und die Einnahmen werden gleichmässig an Bevölkerung und Wirtschaft verteilt. In diesem System profitiert, wer weniger CO₂ verursacht. Dank dieser Lenkungsabgabe bewegt sich die Schweiz langsam aber sicher vom fossilen Heizen weg zum erneuerbaren Heizen. Das Parlament hat in der Vergangenheit die Erweiterung der CO₂ Lenkungsabgabe auf Treibstoffe und Strom abgelehnt; vermutlich gehen die Politiker davon aus, dass CO₂ Moleküle aus Mobilität oder aus Strom keine Auswirkungen auf das Klima haben? Um wieviel würde sich Benzin verteuern, wenn wir auch hier die CO₂ Lenkungsabgabe einführen würden. Wir erinnern uns: 1 Liter Benzin hat ein Energieinhalt von etwa 10 kWh; damit würde die Lenkungsabgabe auf dem aktuellen Benzin etwa 27 Rappen pro Liter teurer; bei Treibstoff aus Ölsand würde der Zuschlag 47 Rp betragen. Strom aus alten Kohlekraftwerken würde um etwa 10.3 Rp/kWh teurer und würde in der Schweiz zuzüglich Produktionskosten von 2 – 3 Rp./kWh auf 12 – 13 Rp. kWh zu stehen kommen. Damit wären unsere Wasserkraftwerke mit Herstellkosten von 5 -6 Rp./kWh wieder konkurrenzfähig, und das ohne Subventionen.

0.9 kWh oder 0.09 l Benzin um 100 kg Masse 100 km weit zu transportieren

Wir haben gesehen, dass die benötigte Energie für Fahrzeuge in erster Näherung direkt vom Fahrzeuggewicht abhängig ist. War 1960 das Durchschnittsgewicht eines Fahrzeuges 700 kg mit 2.4 Personen belegt, so ist das Durchschnittsgewicht eines Fahrzeuges heute 1.4t (Tendenz steigend) und ist im Durchschnitt nur mit 1.3 Personen belegt; das bedeutet, dass wir heute 4 Mal mehr Energie für dieselbe Mobilität benötigen. Daran ändert eine Effizienzsteigerung beim Verbrennungsmotor von 5% - 10% nicht viel. In der Regel transportieren wir etwa 100 kg Nutzgewicht (1.3 Personen). Wie wir oben gesehen haben, benötigen wir etwa 0.9 kWh oder 0.09 l Benzin um 100 kg Masse 100 km weit zu transportieren. Unser durchschnittliches Fahrzeug verbraucht in der Realität aber 6.1 l Benzin; wir nutzen also lediglich 1.5% der Energie im Öl für den Transport der Insassen, der Rest wird für den Transport des "Blechs" benötigt. Fahren wir einen „Off-Roder“, so halbiert sich der Wert noch einmal und rechnen wir auch noch die Gewinnung dazu, halbiert er sich noch einmal. Aus der Perspektive unserer Nachfahren betrachtet: ein Katastrophe. Stellen Sie sich vor, Sie trinken von einer Flasche besten Weins lediglich einen halben Teelöffel und den Rest leeren Sie in den Ausguss. Wie würden Sie eine solche Person nennen? Wie würden Sie ein Volk nennen, das diese Handlung im Kollektiv macht? Öl ist viel zu wertvoll, als dass wir es auf diese Art verschwenden dürfen.

Leichtere Fahrzeuge sind gefragt

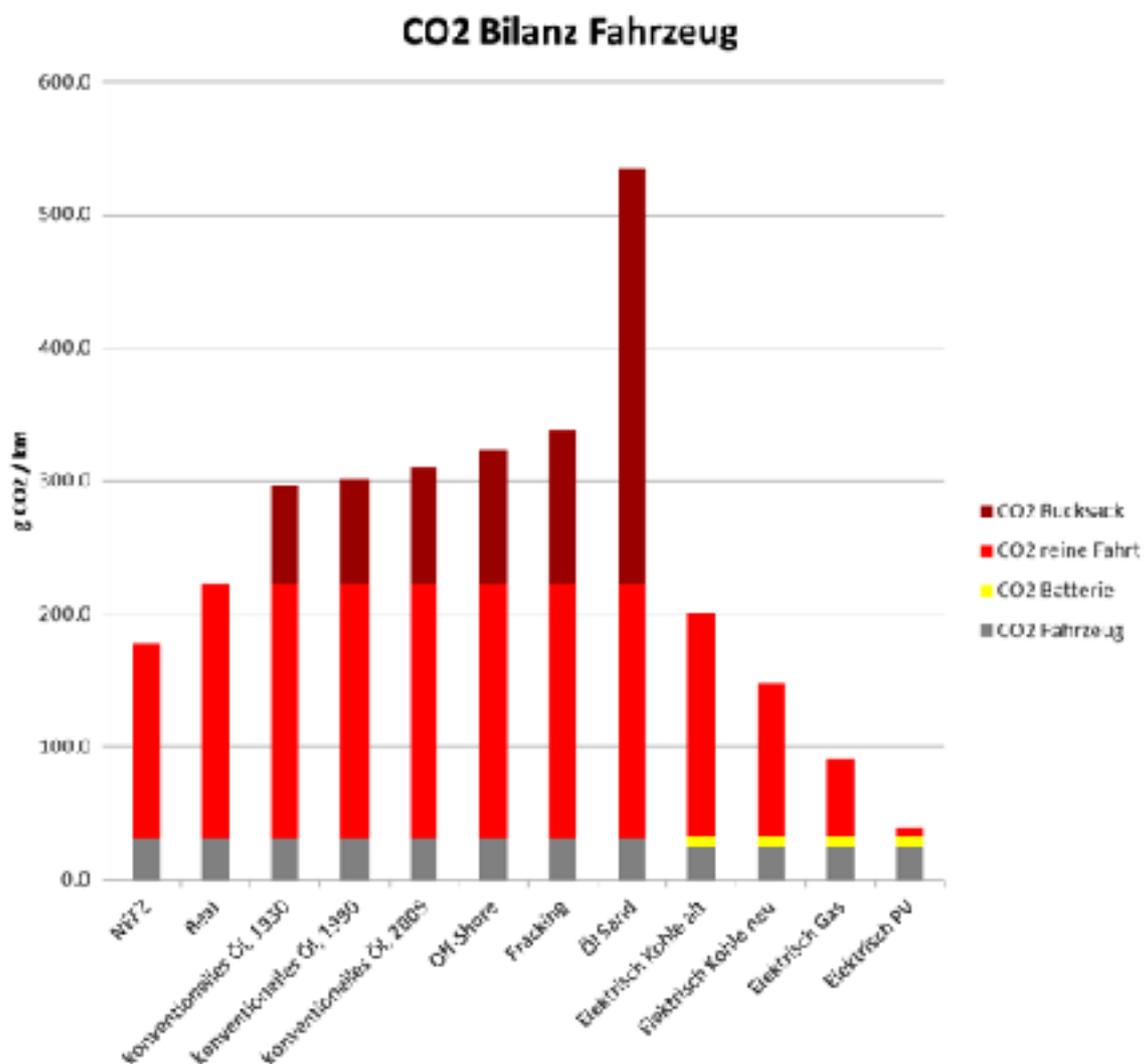
Leichtere Fahrzeuge sind hier gefragt. Ein gutes Beispiel ist der Scooter. Mit den neu angekündigten Batterien von Tesla wird es in Zukunft möglich sein, ein leistungsstarker elektrischer Scooter mit lediglich 100 kg Leergewicht und einer Reichweite von 500 km zu bauen. Sobald dies möglich wird, wird sich der Scooter Markt in wenigen Jahren komplett auf elektrisch umbauen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die graue Energie von benzinbetriebenen und elektrischen bereits heute bei vergleichbaren Fahrzeugen im ähnlichen Bereich liegen; langfristig wird das Elektromobil sogar „sauberer“ sein. Bezüglich der Fahrenergie ist das Elektrofahrzeug klar im Vorteil, und dieser Vorteil wird sich in Zukunft wegen der immer aufwendiger werdenden Gewinnung des Öls weiter vergrößern. Da der Energieverbrauch und die graue Energie in den Fahrzeugen sich fast proportional zum Fahrzeuggewicht verhalten, ist diese Aussage für alle Fahrzeugklassen in sich gültig, nicht aber, wenn schwere Fahrzeuge der einen Antriebsklasse mit leichten Fahrzeugen der anderen Antriebsklasse verglichen werden: Hier sind die Leichten immer im Vorteil.

Elektrifizierung Individualverkehr in den nächsten 5 bis 10 Jahren

Viele der internationalen Konflikte sind im Zusammenhang mit fossilen

Brennstoffen zu sehen und es ist sicher von Vorteil die Abhängigkeit unseres Landes vom Öl dank den neuen erneuerbaren Energien aus Sonne und Wind gänzlich zu eliminieren. Schliesslich macht elektrisch fahren auch mehr Spass: Der Elektromotor ist dank seiner Charakteristik viel besser für den Einsatz im Fahrzeug als der Verbrennungsmotor geeignet. Elektromobile sind auch günstiger im Unterhalt als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor; Elektromobile haben nur ganz wenig bewegte Teile. Langfristig werden sie auch im Anschaffungspreis (sobald der Preis für die Batterie stimmt) günstiger sein als ihre fossilen Konkurrenten. Die Elektrifizierung des Individualverkehrs wird nach meiner Meinung in den nächsten 5 – 10 Jahren stattfinden.



Graphische Darstellung des CO₂ - Ausstosses eines Mittelklasse Personenwagens (1400 kg) beim fossilen und elektrischen Fahren unter Berücksichtigung der Energiegewinnung.

CO₂-Belastung Infrastruktur sehr viel höher

In der EMPA-Studie wurde auch die Infrastruktur mit rund 10 g CO₂/km mit eingerechnet. Laut meinen Berechnungen ist die Belastung durch die Infrastruktur sehr viel höher, und liegt bei mindestens 60 g CO₂/km; damit ist der CO₂-Belastung durch die Infrastruktur grösser als durch das Fahrzeug. Sie ist so hoch, dass ich selber verunsichert bin, ob meine Berechnungen stimmen. Ich mache sie hier transparent und bin um Ergänzungen dankbar.

Top-Down statt Bottom-Up

Während die EMPA eine „Bottom-Up“-Schätzung machte (der integrale CO₂-Aufwand zum Bau/ Unterhalt einer Strasse wird berechnet und dann auf das gesamte Strassennetz hochgerechnet) verwende ich eine „Top-Down“-Schätzung. Ich bestimme die jährlichen Kosten für Bau und Unterhalt, betrachte die gesamte Schweiz als „Black-Box“ und rechne den Schweizerischen CO₂ Ausstoss über das BIP auf die Strasse um.

In der gesamten Schweiz erzeugen wir ein BIP von etwas mehr als 600 Mia. CHF/Jahr und produzieren dabei etwa 45 Mt CO₂ (Millionen Tonnen) oder 75 g CO₂/CHF. Das ist der Durchschnittswert für das gesamte BIP, dabei hat die Produktion eines BIP Frankens in der Dienstleistung (Bürojob) sicher einen viel geringeren CO₂-Ausstoss als im Bau. Am swiss energy and climate summit ECS 2017 sagte Anton Affentranger, CEO Implenia, dass die Bauwirtschaft mit 7% der Beschäftigten rund 5% zum BIP beitrage und dabei für 30% des CO₂-Ausstosses verantwortlich sind. Wir müssten also den CO₂ Ausstos um den Faktor 6 erhöhen; bleiben aber für unsere Rechnung beim Durchschnittswert.

Nun zu den Kosten der Strasseninfrastruktur. Ob es um die Finanzierung von Maschinen, Heizungen, Automobilen (Leasing), Stromversorgungssysteme oder Strassen geht, die Jahreskosten setzen sich in der Regel aus Kapital- und Betriebs-/ Unterhaltskosten zusammen. Bei den Kapitalkosten wird davon ausgegangen, dass das notwendige Kapital mit einem konstanten Zins in gleichbleibenden Raten abbezahlt wird; vernünftige Werte für Infrastrukturen sind eine Amortisation von 50 Jahren mit 2% Zins. Bei einem Zins von 1% beträgt die Jahresrate dank der Zinseszinsrechnung nicht 3%, sondern nur 2.6%. Bei einem Zins von 2% beträgt die Jahresrate 3.2%. Für das elektrische Netz rechnet die eidgenössische Elektrizitätskommission Elcom mit 2% Verzinsung und 50 Jahren Amortisation, für den Unterhalt des Netzes rechnet sie mit zusätzlichen 4.2%. Geht man von einem Neuwert des elektrischen Netzes von etwa 60 Mia. CHF aus, so betragen die jährlichen Kosten etwa 4.5 Mia. CHF (Amortisation: 2 Mia. CHF, Unterhalt 2.5 Mia. CHF).

Jährliche Kosten von nahezu 45 Mia. CHF

Wenn wir jetzt dieselbe Rechnung auf die Strasse anwenden, so erhalten wir einem Neuwert für die über 80'000 km Schweizer Strassen (2000 km

Autobahnen, 35'000 km Kantonsstrassen, 45'000 km Gemeindestrassen; 2 Mal um die Erde) von rund 600 Mia CHF, und es ergeben sich damit jährliche Kosten von nahezu 45 Mia. CHF. Die Unterhaltskosten bei der Strasse dürften in der Realität dabei eher höher ausfallen als beim Strom, müssen doch Kabel nicht gereinigt oder von Schnee befreit werden; auch verursachen Elektronen keine bleibenden Schäden am Kupfer.

Zusätzlich fallen beim Strassenverkehr Kosten für die Folgen von Unfällen an. Hier betrachten wir nur Todesfälle und Fälle mit lebenslangen schweren Behinderungen als Folge wie z. B. Querschnittslähmung. Solche Patienten kosten pro Tag ca. CHF 1000, bei einer durchschnittlichen Lebenserwartung von 20 Jahren ergibt das Kosten von mehr als 5 Mio. CHF pro Person. Der Strassenverkehr fordert jedes Jahr 700 – 1000 solcher Schwerverletzte und über 300 Tote, zusammen ergibt dies wesentlich mehr als 5 Mia. CHF Unfallkosten pro Jahr. Ein weiterer Punkt sind die Polizeidienste: Rund 50% der rund 30'000 Schweizerischen Polizistinnen und Polizisten sind für die Automobilität im Dienste. Bei einem Ansatz von CHF 200'000 pro Polizist ergeben sich zusätzliche 3 Mia. CHF/Jahr; Total erhalten wir also etwa Kosten von 53 Mia CHF /Jahr.

Jährliche Infrastrukturkosten pro Fahrzeug von ca. 12'500 CHF

Verteilen wir die Kosten auf die etwas über 4 Mio Fahrzeuge, so ergeben sich jährliche Infrastrukturkosten von etwa 12'500 CHF pro Fahrzeug und umgerechnet 940 kg CO₂ / Fahrzeug. Bei einer durchschnittlichen Fahrdistanz von jährlich 15'000 km ergibt dies rund 60 g CO₂/km durch die Infrastruktur. In der Realität ist dieser Wert vermutlich noch grösser. Die CO₂ Belastung durch die Infrastruktur ist damit grösser als die Belastung durch das Fahrzeug selber.

Nebenbei stellt sich die Frage, wie die Strasse finanziert wird. Die jährlichen Einnahmen setzen sich wie folgt zusammen: etwa 5 Mia CHF aus Treibstoffabgaben, 2.2 Mia CHF aus den kantonalen Motorfahrzeugsteuern, 0.3 Mia CHF aus Zollertrag für Fahrzeuge, 0.4 Mia CHF aus LSVA Abgaben, 0.3 Mia CHF aus der Autobahnvignette und 0.1 Mia CHF aus der MWst Rückerstattung bei Bauten, also insgesamt etwa 8.3 Mia CHF.

Reale Strassenkosten 5 Mal höher

Werden die offiziell vom BfS ermittelten Kosten des Strassenverkehrs (8.3 Mia. CHF) mit den hier berechneten Kosten verglichen, so gibt es einen grossen Unterschied. Viele Menschen sind der Meinung, dass der Strassenverkehr seine Kosten trägt. Diese Aussage stimmt für die Nationalstrasse, diese ist sogar überfinanziert; aber die hohen Ausgaben entstehen nicht bei den Nationalstrassen sondern bei der Feinverteilung der Mobilität auf der kommunalen Ebene, bei den Kantonsstrassen und Gemeindestrassen. Hier ist vor allem der Steuerzahler gefragt. Die realen Kosten für den Individualverkehr

sind in der Realität etwa 5 Mal höher als der Autofahrer bezahlt (Selbstfinanzierungsgrad 20%); die Differenz übernimmt die Steuerzahlerin. Wir könnten unsere Steuern bis zu 30% senken, wenn wir faire Mobilitätspreise zahlen würden (auch beim öffentlichen Verkehr sind die realen Kosten rund doppelt so hoch wie Einnahmen durch die Nutzer; Selbstfinanzierungsgrad 50%).

Das Strassensystem der Schweiz ist völlig überdimensioniert, im Mittel ist diese teure Infrastruktur nur zu 2.7% ausgelastet (Herleitung siehe Buch „Kraftwerk Schweiz“). Natürlich gibt es immer temporäre Engpässe wie beispielsweise in der Ferienzeit der Gotthard Strassentunnel. Ein Infrastruktursystem, das auf Spitzenbelastung dimensioniert ist, ist sehr teuer; es ist besser das System so zu beeinflussen, dass die Spitzenbelastung reduziert wird. Hier könnte das Mobility-Pricing ein möglicher Lösungsansatz sein.

Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h!

Wie schnell sind wir mit dem Fahrzeug unterwegs? Wir sind durchschnittlich etwa mit 50 km/h mit dem Automobil unterwegs. Um die 15'000 km jährlich zurück zu legen sitzen wir also etwa 300h im Auto.

Nun müssen wir das Auto ab und zu reinigen, tanken, wir stehen im Stau, dann müssen wir das Auto auch ab und zu in die Werkstatt bringen, manchmal müssen wir zum Strassenverkehrsamt, wir müssen eine Versicherung abschliessen, wir müssen das Auto manchmal auf einem entfernten Parkplatz abstellen, etc., das alles braucht Zeit. Wir veranschlagen für all diese Tätigkeiten jährlich 100h. Somit sinkt unsere Durchschnittsgeschwindigkeit auf 37.5 km/h.

Schweizer verdienen durchschnittlich etwa 55'000 CHF jährlich (Median) und müssen dafür 1800 Stunden im Jahr arbeiten. Ein Schweizer Durchschnittsauto kostet laut TCS etwa -.70 CHF pro km; für die durchschnittlich zurückgelegten 15'000 km gibt der Schweizer also jährlich etwa CHF 10'000 aus; bei einem Durchschnittseinkommen von 55'000 CHF pro Jahr müsste der Schweizer also etwa zusätzlich 300h arbeiten. Rechnen wir diese Zeit dazu, so sinkt unsere durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit auf 21 km/h.

Wie wir ja oben gesehen haben, kostet die Infrastruktur weitere nichtgedeckte 10'000 CHF pro Fahrzeug und Jahr, die aus Abgaben und Steuern von Unternehmen und Bürgern bezahlt werden. Bei einer ehrlichen Vollkostenrechnung müssten wir für diese ungedeckten Kosten weitere 300h arbeiten. Damit kostet die Automobilität dem Durchschnittsschweizer mehr als 1000h Zeit und die Durchschnittsgeschwindigkeit verringert sich auf 15 km/h! Dann könnten wir auf all das verzichten und mit dem Fahrrad fahren. Wollen wir wirklich so viel von unserer Lebensenergie/ Lebenszeit dem Auto geben?

300 m² versiegelte Fläche pro Fahrzeug

Über ein anderer wichtiger Aspekt bei der individuellen Mobilität wird oft nicht gesprochen: der Flächenverbrauch. Die individuelle Mobilität (Strassen und Parkplätze) verschlingt rund 1'200 km² Fläche oder rund 300 m² Fläche pro Fahrzeug; im Vergleich: alle Gebäude der Schweiz für wohnen, arbeiten, Bildung, Sport, Erholung, etc. benötigen „nur“ 400 km² Fläche oder 50 m² Fläche pro Person: jedes zusätzliche Motorfahrzeug benötigt zusätzlich 300 m² versiegelte Fläche. Versiegelter Boden hat einige Probleme: der Boden ist verglichen mit normalem Boden tot, das Wasser kann nicht mehr versickern und speist damit nicht mehr die unterirdischen Wasserströme und Wasserquellen und noch schlimmer, der versiegelte Boden wird künstlich durch eine Hochleistungskanalisation effizient entwässert und damit entstehen bei Gewittern extreme Spitzenwerte mit den bekannten Folgen von Überschwemmungen. Der Flächenverbrauch ist für die dicht besiedelte Schweiz von immenser Bedeutung.

Der Flächenbedarf ist vor allem in städtischen Gegenden von Bedeutung, da hier die Fläche begrenzt ist. Heute leben rund 85% der Schweizer Bevölkerung im urbanen Gebiet. Nehmen wir zum Beispiel Zürich: Zürich hat eine Fläche von etwa 91 km². Die öffentliche Fläche beträgt etwa 11 km², davon sind rund 7.5 km² Strassen. Zusätzlich kommen etwa 2 km² Parkplätze dazu. Der Individualverkehr hat in Zürich einen Anteil von etwa 25% und belegt 75% der Mobilitätsfläche. Einige fordern „Freie Fahrt für freie Bürger“. Wollen wir das für Zürich für jeden Zeitpunkt für die rund 800'000 Menschen, die täglich unterwegs sind, erfüllen, so müssten wir Zürich komplett einreissen und das gesamte Stadtgebiet teeren, keine attraktive Lösung. Wollen wir das wirklich?

Fussgänger braucht 1m², Autofahrer 100m²

Der Flächenverbrauch der Mobilität ist sehr vom gewählten Verkehrsmittel abhängig. Damit sich ein Fussgänger frei bewegen kann, benötigt er im Durchschnitt 1 m², die Fahrradfahrerin 10 m², der ÖV (pro Person) in urbanen Gebieten 15 m² und gemittelt für die Schweiz 25 m² und der Autofahrer 100 m². Das wir uns frei bewegen können ist eine Errungenschaft der Aufklärung und daran wollen wir festhalten. Aber: es scheint, dass wir den grössten Ressourcenverbraucher bei der Mobilität, dem Individualverkehr, blindlings bevorzugen, und das ist kein intelligentes Verhalten. Intelligentes Verhalten wäre, sich zuerst der Bedürfnisse einer Gesellschaft klar zu werden (in diesem Fall Mobilität) und dann anschliessend die geeigneten Mittel zu wählen. In etwa einem Drittel der Autofahrten ist die zurückgelegte Distanz mit dem Auto weniger als 500 m; diese Distanz ist auch zu Fuss überbrückbar und zu Fuss gehen ist erst noch gesund. In einem weiteren Drittel der Autofahrten sind wir weniger als 5 km unterwegs. Diese Distanz kann spielend auch mit dem (Elektro-) Fahrrad zurückgelegt werden. Für längere Fahrten ist tatsächlich das (Elektro-) Fahrzeug geeignet.

Einer unserer grössten Ressourcenfresser

Das Automobil ist einer unserer grössten Ressourcenfresser und trotzdem wird es durch die Politik als Verkehrsmittel bevorzugt. Der Autoverkehr fordert jedes Jahr weltweit 1.2 Mio Tote und etwa doppelt so viele Schwerstverletzte, mehr als jeder aktuelle Krieg – und das ist kein Thema in den Medien. Öffentliche Parkplätze in der Schweiz sind immer noch zu günstig und hochsubventioniert – aber wir haben kein Geld für Kinderkrippen. Es besteht in vielen Gemeinden immer noch ein Parkplatzobligatorium bei Bauten – eine verdeckte Querfinanzierung. Wenn wir die internationalen Konflikte betrachten tropft aus jedem Auspuff Blut. Die Transportleistung des Autos bezogen auf den Flächenverbrauch ist am schlechtesten verglichen mit anderen Möglichkeiten der Mobilität, der CO₂ – Ausstoss ist am grössten – und trotzdem gibt es immer noch viele Steuervergünstigungen und an Kostenwahrheit ist niemand interessiert. Weshalb tun wir uns so schwer damit, eine zukunftsfähige Mobilität aufzubauen?

Text: Prof Dr. Anton Gunzinger, Unternehmer, Dozent an der ETH Zürich und Autor des Buches: „Kraftwerk Schweiz – Plädoyer für eine Energiewende mit Zukunft“