CARNOT-COURNOT NETZWERK
für Politikberatung in Technik und Wirtschaft

CO_2-Emissionen der Elektromobilität

Bernd Schips

Politik fordert, forciert und fördert elektrisch angetriebene Fahrzeuge

Nicht nur in der Schweiz sind Umweltorganisationen und viele Politiker davon überzeugt, dass eine erfolgreiche Klimapolitik auch die Reduktion der vom Strassenverkehr verursachten CO_2-Emissionen erfordert. Insbesondere von Verbrennungsmotoren angetriebene Personenwagen (Verbrenner) sollen deshalb möglichst rasch durch teil- oder vollelektrisch angetriebene Fahrzeuge ersetzt werden. Die Politik setzt dabei vor allem auf im Fahrbetrieb kein CO_2 mehr emittierende batterieelektrische Fahrzeuge (BEV: Battery Electric Vehicle).

Jedes Antriebskonzept ist aber nur ein Teil eines gesamthaft zu analysierenden Systems. Um die verschiedenen Antriebskonzepte vergleichen zu können, müssen auch die CO_2-Emissionen

- bei der Gewinnung und Aufbereitung der für den Bau der Fahrzeuge benötigten Rohstoffe,
- bei der Produktion der Fahrzeuge sowie der Anlagen zur Herstellung der für den Antrieb der Fahrzeuge eingesetzten Energieträger,
- beim Bau der Infrastruktur zur Speicherung und Versorgung der Fahrzeuge mit den für den Antrieb benötigten Energieträgern,
- bei der Entsorgung und/oder Wiederaufbereitung der insgesamt eingesetzten Materialien,
- usw.

berücksichtigt werden. Erst nach solch umfassenden Analysen kann die Frage beantwortet werden, inwieweit und zu welchen Kosten – Fahrzeugeigner und Volkswirtschaft – BEV zur Reduktion der vom Strassenverkehr verursachten CO_2-Emissionen beitragen.

Widersprüchliche Befunde

Nicht für alle Elemente der eigentlich erforderlichen Lebenszyklusanalysen (Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalysen) sind jedoch verlässliche Daten verfügbar. Studien und Überlegungen zu den Vor- und Nachteilen von BEV sind deshalb gezwungen, sich auf einige der für einen Vergleich der Antriebskonzepte besonders wichtigen – für eine abschliessende Beurteilung aber sicher noch nicht ausreichenden – Elemente zu beschränken (fragmentarische Lebenszyklusanalysen).

Einige Studien kommen trotz diesen Einschränkungen zu dem Ergebnis, dass objektiv gut vergleichbare Mobilitätsanforderungen erfüllende BEV über den Lebenszyklus hinweg keine bessere CO_2-Bilanz aufweisen als dem Stand der Technik entsprechende Verbrenner mit Benzin- oder Dieselmotoren. Andere Studien scheinen dagegen zu zeigen, dass mit BEV erhebliche CO_2-Reduktionen erreicht werden können. Die sich widersprechenden Befunde gehen sowohl auf eine rudimentäre Datenlage als auch auf die Auswahl der in die Vergleiche eingehenden Elemente der Lebenszyklusanalysen und unterschiedliche Annahmen für die das Vergleichsergebnis wesentlich bestimmenden Parameter zurück.

Welche Einflussfaktoren werden in den Studien berücksichtigt?

Bei Verbrennern werden meist nur die aus dem Fahrbetrieb resultierenden und nur selten auch die bei Herstellung und Transport der Treibstoffe Benzin, Diesel und Gas entstehenden CO_2-Emissionen berücksichtigt. Im Falle der BEV werden in der Regel auch nur die bei Produktion der Antriebsbatterie und die durch Erzeugung des für den Fahrbetrieb benötigten Stroms (Fahrstrom) entstehenden CO_2-Emissionen zur Beurteilung des Antriebskonzepts herangezogen.

Bei der Ermittlung der CO_2-Emissionen eines BEV ist die energieintensive Produktion der Antriebsbatterie einer der entscheidenden Faktoren. Wegen der im Vergleich mit flüssigen Treibstoffen erheblich geringeren Energiedichte sollte die Kapazität der Antriebsbatterie eines auf dem Markt längerfristig erfolgversprechenden BEV so bemessen sein, dass zur Erfüllung der individuellen Mobilitätsbedürfnisse einigermassen die Reichweite eines vergleichbaren und mit einem für die jeweilige Fahrzeugklasse typischen Tankvolumen ausgestatteten Verbrenners erreicht werden kann.

BEV mit kleineren Antriebsbatterien haben nicht nur eine geringere Reichweite, sondern müssen auch häufiger eine Ladeinstallation aufsuchen. Jede Aufladung führt aber zu einem – allerdings anfänglich noch kaum merklichen – Kapazitätsverlust (Degradation). Grosse Batterien benötigen für die gleiche Laufleistung weniger Ladezyklen als kleine. Je mehr Ladezyklen erforderlich sind, desto rascher altert eine Batterie und desto spürbarer

wird der Kapazitätsverlust. Ein permanentes Vollladen und Ausnutzen der Gesamtkapazität verringert zudem die Lebensdauer einer Antriebsbatterie. In der Regel werden deshalb auch nur ca. 80 Prozent der maximalen Kapazität einer Antriebsbatterie genutzt.

Vor allem für BEV mit relativ kleinen Antriebsbatterien kann sich ein auf die Degradation zurückgehender allmählicher Kapazitätsverlust nachteilig auswirken. Insbesondere bei niedrigen Aussentemperaturen wird der Kapazitätsverlust kleinerer Batterien zu deutlich verminderten Reichweiten und Leistungsabgaben führen. Allerdings sind BEV mit grösseren Antriebsbatterien erheblich teurer, deutlich schwerer und haben gewichtsbedingt auch einen höheren Stromverbrauch.

Oft wird zwar betont, dass die täglichen Fahrstrecken im Durchschnitt kaum mehr als 40 – 60 km betragen und geringe Reichweiten deshalb nicht gegen die Anschaffung eines BEV sprechen. Ein auf Kurzstrecken beschränktes und für den Nah- und Agglomerationsverkehr prädestiniertes BEV erfordert jedoch entweder einen generellen Verzicht auf längere Fahrstrecken und bei Bedarf einen Umstieg auf den öffentlichen Verkehr oder die Verfügbarkeit eines langstreckentauglichen Verbrenners (Carsharing, Miete oder Kauf eines Zweitwagens).

Die mit BEV erzielbaren Reichweiten sind aufgrund

- von Witterungseinflüssen (Aussentemperaturen unter 10° C verringern die Fähigkeit der Antriebsbatterie zur Abgabe hoher Ströme, über 30° C nehmen die inneren Verluste zu und die Batterien altern schneller),
- der Fahrgeschwindigkeiten,
- der Streckencharakteristik,
- des Stromverbrauchs der Nebenaggregate (Heizung, Klimaanlage, Infotainment, usw.)

und trotz der von den Fahrzeugherstellern häufig limitierten Höchstgeschwindigkeiten erfahrungsgemäss deutlich geringer als die mit den jeweiligen Batteriekapazitäten theoretisch erreichbaren Reichweiten. Da hohe Geschwindigkeiten aufgrund des steigenden Luftwiderstands viel Leistung erfordern, ist wegen des geringen Energiegehalts der Antriebsbatterien die Nutzung hoher Leistungen nur für eine sehr kurze Zeit möglich. BEV können im Fahrbetrieb – abhängig von Streckencharakteristik und Fahrweise – zwar die Antriebsbatterie in einem begrenzten Ausmass durch Rekuperation nachladen, allerdings führen diese Nachlademöglichkeiten im praktischen Fahrbetrieb in der Regel nicht zu spürbar grösseren Reichweiten.

Schätzungen für die auf Fahrstromerzeugung und Batterieproduktion zurückgehenden CO_2-Emissionen hängen vom jeweils unterstellten Strom-Mix ab. Gegenwärtig wird für

die Batterieproduktion meist noch mit Werten zwischen 145 kg CO_2/kWh und 195 kg CO_2/kWh gerechnet. Der Energiebedarf für die Batterieproduktion wird in den kommenden Jahren sicher geringer werden und die Anteile CO_2-frei erzeugten Stroms in den Netzen dürften zunehmen. Es ist jedoch keinesfalls gesichert, dass der Neu- und Ausbau von Anlagen zur CO_2-freien Stromerzeugung mit der Produktion von Antriebsbatterien für eine möglicherweise rasch wachsende Anzahl BEV Schritt halten kann. Zudem steht eine für die Batterieproduktion eingesetzte CO_2-frei erzeugte Strommenge dann nicht mehr für andere Verwendungen – z.B. zur Substitution des mit fossilen Energieträgern erzeugten Stroms – zur Verfügung. Erst wenn Antriebsbatterien einmal vollständig mit CO_2-frei erzeugtem Strom hergestellt werden, spielt die CO_2-Last aus der Batterieproduktion für die Emissionsbilanz eines BEV keine entscheidende Rolle mehr. Antriebsbatterien oder zumindest wesentliche Batteriebestandteile werden gegenwärtig – nicht zuletzt aufgrund der oft niedrigeren Strompreise – aber immer noch mehrheitlich in Ländern produziert, die den Strom überwiegend mit fossilen Energieträgern erzeugen.

Meist nicht berücksichtigte Einflussfaktoren

Antriebsbatterien mit relativ geringen Kapazitäten wirken sich zugunsten der CO_2-Bilanzen von BEV aus. Die Aufladung der Antriebsbatterie eines BEV dauert selbst an Schnellladesäulen, trotz steigender maximaler Ladeleistungen, wesentlich länger als die Betankung eines Verbrenners. Häufige Schnellladungen mit höheren Stromstärken verkürzen zudem die Lebensdauer einer Antriebsbatterie. Ältere Antriebsbatterien haben verringerte Leistungen, die sich im Fahrbetrieb vor allem in kürzeren Reichweiten niederschlagen. Ladestromverluste – die zur Vollaufladung erforderlichen kWh liegen meist deutlich über den Kapazitäten der Antriebsbatterien (teilweise mehr als 10 kWh über der netto nutzbaren Batteriekapazität) – werden in den Fahrstromverbrauch der BEV meist nicht eingerechnet. Ebenfalls nicht explizit berücksichtigt werden in der Regel die CO_2-Emissionen bei der Gewinnung der Rohstoffe zur Herstellung der Antriebsbatterien sowie für den Bau privater und öffentlich zugänglicher Ladeinfrastrukturen. Allerdings oft auch nicht die durch Produktion und Transport der Treibstoffe Diesel und Benzin (z.B. ca. 5 g CO_2/l Benzin oder Diesel) verursachten CO_2-Emissionen.

Die Produktion von BEV (ohne Batterie) dürfte aufgrund einer geringeren Anzahl von Komponenten vermutlich etwas weniger CO_2-Emissionen verursachen als die von Verbrennern. Verlässliche Angaben über die bei der Produktion von BEV und Verbrennern entstehenden CO_2-Emissionen gibt es aber praktisch nicht. Datenlücken verhindern auch noch eine vollständige Erfassung der unterschiedlich hohen CO_2-Emissionen bei der Entsorgung und/oder Wiederaufbereitung der insgesamt eingesetzten Materialien.

BEV wiegen aufgrund des Gewichts der Antriebsbatterien deutlich mehr als vergleichbare Verbrenner und dürften deshalb im Fahrbetrieb mehr Feinstaub verursachen. Die Reichweiten der BEV sind jedoch nicht nur von den Batteriekapazitäten, sondern auch von den

jeweils eingebauten Elektromotortypen (Asynchronmotoren, permanent- oder fremderregte Synchronmotoren) und den bereits erwähnten verbrauchsbeeinflussenden Einflussfaktoren abhängig. Schnellladungen für weitere 100 km beanspruchen zwar nur wenige Minuten. Oft wird aber nicht darauf hingewiesen, dass das Aufladen einer Antriebsbatterie für längere Fahrstrecken (z.B. bei Urlaubsreisen) – selbst wenn es keine Warteschlangen an den Ladeeinrichtungen gibt – dann doch erheblich mehr Zeit beansprucht.

Die aus wesentlich höheren Anschaffungspreisen, eingeschränkten Reichweiten und dem Zeitbedarf für Nachladungen der Antriebsbatterien resultierenden Opportunitätskosten werden in den Antriebskonzeptvergleichen meist nicht thematisiert. Die aufgrund der hohen Leergewichte teilweise notwendig werdenden Einschränkungen der Anhänger- und Dachlasten können u.U. ebenfalls zu nicht unerheblichen Opportunitätskosten führen.

Strom für die Elektromobilität

Kann der aus der Batterieproduktion resultierende Emissionsnachteil eines BEV durch die geringeren CO_2-Emissionen im Fahrbetrieb kompensiert werden? Der in einem Netz verfügbare Strom-Mix bestimmt die CO_2-Emissionen des Fahrstroms. Die CO_2-Emissionen, die bei der Erzeugung des Fahrstroms für BEV in noch mit fossilen Energieträgern betriebenen Kraftwerken entstehen, werden heute allerdings noch dem Energiesektor und nicht dem Verkehrssektor angelastet.

In der Schweiz wird der Strom gegenwärtig zwar weitgehend emissionsfrei produziert, Strom wird jedoch auch exportiert und importiert. Aufgrund tages- und jahreszeitlicher Differenzierungen des Stromverbrauchs, der Stromexporte und -importe sollte deshalb für die vom schweizerischen Strom-Mix verursachten CO_2-Emissionen von mindestens 100 g CO_2/kWh ausgegangen werden. Einschränkungen der Kohleverstromung in Nachbarländern könnten die auf die Stromerzeugung zurückgehenden CO_2-Emissionen des importierten Stroms verringern (Gas- statt Kohlekraftwerke, zunehmende Stromerzeugung mit den neuen erneuerbaren Energieträgern (neE)). Die Importchancen und die Emissionslast des künftigen Strom-Mix im europäischen Netz lassen sich heute jedoch noch nicht verlässlich abschätzen.

Nach der beschlossenen sukzessiven Stilllegung der schweizerischen Kernkraftwerke (KKW) müssen künftig nicht nur die dann fehlenden Strommengen, sondern auch der auf die Elektromobilität zurückgehende Mehrbedarf durch mit neE erzeugtem Strom und/oder Stromimporten gedeckt werden. Wird mit neE in der Schweiz erzeugter Strom für den Fahrbetrieb von BEV eingesetzt, dann kann die dafür benötigte Strommenge z.B. nicht mehr dazu verwendet werden, um im Ausland mit fossilen Energieträgern produzierten Strom im Netz zu ersetzen.

Die witterungsabhängige Stromerzeugung mit Photovoltaik- und Windkraftanlagen wird die in der Schweiz zu erwartenden Stromlücken mit Sicherheit – entgegen den von Umweltorganisationen und Teilen der Politik vertretenen Meinungen – nicht schliessen können. Um eine zu jeder Tages- und Jahreszeit sichere Stromversorgung zu gewährleisten, müssten diese Anlagen aufgrund ihrer extrem niedrigen Lastfaktoren nicht nur erheblich ausgebaut, sondern auch ausreichend Speichermöglichkeiten für die den Strombedarf temporär übersteigenden Stromerzeugungen geschaffen werden.

Eine Verwendung der Antriebsbatterien von BEV zur kurzzeitigen Speicherung des nicht direkt nachgefragten Stroms setzt voraus, dass sich diese Fahrzeuge gerade dann, wenn der Wind bläst oder die Sonne scheint an einer Ladestation befinden, für die spätere Wiedereinspeisung in das Stromnetz ein Rückwandler vorhanden ist und die Ladeeinrichtung einen bidirektionalen Betrieb zulässt. Für die unverzichtbare längerfristige Speicherung temporär anfallender grosser Strommengen sind Pumpspeicherwerke nur bedingt und Batterien gar nicht geeignet. Eine Lösung bietet praktisch nur die Umwandlung des von Photovoltaik- und Windkraftanlagen erzeugten und nicht direkt nachgefragten Stroms in Gase oder Flüssigkeiten. Der Strombedarf der erforderlichen Elektrolyseure ist hoch und die Verluste durch Umwandlung und Rückumwandlung sind nicht unerheblich.

Nicht nur die Gewinnung der Rohstoffe für Solarzellen, Stromnetze, usw. erfolgt nicht CO_2-frei, sondern auch der Bau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen benötigt Materialien wie Zement, Stahl, Aluminium, PVC, Fiber Glass u.a.m., die trotz aller Bemühungen noch nicht CO_2-frei hergestellt werden können. Genau genommen, erzeugen deshalb auch Photovoltaik- und Windkraftanlagen den Strom nicht ohne CO_2-Emissionen. Das tatsächliche Ausmass dieser Emissionen lässt sich aber nur nach Kenntnis der jeweiligen Produktions- und Lieferketten korrekt beziffern.

Mit Sicherheit wird ein Ausbau der Stromerzeugung mit neE, aufgrund der zu amortisierenden Investitionen in kapitalintensive Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen, Netze und Speicher zu weiter steigenden Strompreisen führen. Die Kombination einer eigenen Photovoltaik-Anlage zur Ladung der Antriebsbatterie eines BEV dürfte auch in der Schweiz nur für Personen mit höheren Einkommen möglich sein. Mit einer stark wachsenden Verbreitung dieser Kombination sollte deshalb nicht gerechnet werden. Die möglicherweise künftig einmal ohne Subventionen zu finanzierenden Kosten einer Photovoltaik-Anlage und der zur kurzfristigen Speicherung benötigten Batterien – selbst wenn dafür ältere Antriebsbatterien von BEV mit verringerter Kapazität eingesetzt werden können – und die vergleichsweise niedrige Eigentumsquote sprechen ebenfalls nicht dafür, dass diese Kombination in den kommenden Jahren häufiger anzutreffen sein wird. Hinzu kommt, dass der mit einer eigenen Photovoltaik-Anlage erzeugte und dann für die Aufladung von Antriebsbatterien verwendete Strom nicht mehr für andere Formen des Eigenverbrauchs (z.B. für den Betrieb einer Wärmepumpe) genutzt und auch nicht mehr ins Netz eingespeist werden kann.

Fallbeispiele

Für die zur Illustration nachfolgend aufgeführten Vergleiche der von BEV und Verbrennern verursachten CO_2-Emissionen wurden Hersteller bzw. Importeure ausgewählt, die in der jeweiligen Fahrzeugklasse sowohl in Bezug auf Leistung (kW bzw. PS) als auch in Bezug auf die Ausstattung sich möglichst gut entsprechende BEV und Verbrenner anbieten. Um für BEV und Verbrenner zumindest einigermassen vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, bietet sich die Verwendung von Verbrauchsangaben nach einem genau definierten Fahrzyklus, z.B. nach WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure), an. Für nachfolgenden die Berechnungen wird zudem angenommen, dass die Fahrzeuge während 10 Jahren jährlich 15 ` 000 km bzw. 20 ` 000 km zurücklegen.

Für Batteriekapazitäten bzw. Tankvolumina, Verbrauch nach WLTP und Leergewichte werden die Angaben der Hersteller verwendet. Die CO_2-Emissionen bei der Produktion der Antriebsbatterie eines BEV werden mit niedrigstem Wert, d.h. 145 kg CO_2/kWh, aus den einschlägigen Studien ermittelt und für den Fahrstrom wird der schweizerische Strom-Mix mit 100 g CO_2/kWh eingesetzt. Für die Verbrennung von 1 l Benzin bzw. 1 l Diesel wird mit 2.33 kg CO_2 bzw. 2.64 kg CO_2 gerechnet.

Kompaktklasse, Hersteller A

BEV		
Batteriekapazität	58	kWh
Verbrauch	15.4	kWh/100 km
Maximale Ladeleistung	100	kW
CO_2-Emissionen		
- Batterieproduktion	8.410	Tonnen CO_2
- Fahrbetrieb	1.540	kg CO_2/100 km
- Batterieproduktion + Fahrstrom 150 ` 000 km	10.720	Tonnen CO_2
- Batterieproduktion + Fahrstrom 200 ` 000 km	11.490	Tonnen CO_2
Verbrenner (Benzinmotor)		
Tankvolumen	45	l
Verbrauch	5.7	l/100 km
CO_2-Emissionen		
- Fahrbetrieb	13.281	kg CO_2/100 km
- 150 ` 000 km	19.922	Tonnen CO_2
- 200 ` 000 km	26.562	Tonnen CO_2
Mehrgewicht BEV	ca. 450	kg
Emissionsvorteil BEV 150 ` 000 km	**9.202**	**Tonnen CO_2**
Emissionsvorteil BEV 200 ` 000 km	**15.072**	**Tonnen CO_2**

Kompaktklasse, Hersteller B

BEV		
Batteriekapazität	50	kWh
Verbrauch	18.0	kWh/100 km
Maximale Ladeleistung	100	kW
CO_2-Emissionen		
- Batterieproduktion	7.250	Tonnen CO_2
- Fahrbetrieb	1.800	kg CO_2/100 km
- Batterieproduktion + Fahrstrom 150 `000 km	9.550	Tonnen CO_2
- Batterieproduktion + Fahrstrom 200 `000 km	10.850	Tonnen CO_2
Verbrenner (Benzinmotor)		
Tankvolumen	50	l
Verbrauch	5.8	l/100 km
CO_2-Emissionen		
- Fahrbetrieb	13.514	kg CO_2/100 km
- 150 `000 km	20.271	Tonnen CO_2
- 200 `000 km	27.028	Tonnen CO_2
Mehrgewicht BEV	ca. 260	kg
Emissionsvorteil BEV 150 `000 km	**10.721**	**Tonnen CO_2**
Emissionsvorteil BEV 200 `000 km	**16.178**	**Tonnen CO_2**

Kompaktklasse, Hersteller C

BEV		
Batteriekapazität	64	kWh
Verbrauch	14.7	kWh/100 km
Maximale Ladeleistung	110	kW
CO_2-Emissionen		
- Batterieproduktion	9.280	Tonnen CO_2
- Fahrbetrieb	1.470	kg CO_2/100 km
- Batterieproduktion + Fahrstrom 150 `000 km	11.485	Tonnen CO_2
- Batterieproduktion + Fahrstrom 200 `000 km	12.220	Tonnen CO_2
Verbrenner (Benzinmotor)		
Tankvolumen	50	l
Verbrauch	6.7	l/100 km
CO_2-Emissionen		
- Fahrbetrieb	13.514	kg CO_2/100 km
- 150 `000 km	23.462	Tonnen CO_2
- 200 `000 km	31.222	Tonnen CO_2
Mehrgewicht BEV	ca. 290	kg
Emissionsvorteil BEV 150 `000 km	**14.977**	**Tonnen CO_2**
Emissionsvorteil BEV 200 `000 km	**19.002**	**Tonnen CO_2**

Mittelklasse, Hersteller D

BEV (Allradantrieb)		
Batteriekapazität	80	kWh
Verbrauch	22.2	kWh/100 km
Maximale Ladeleistung	110	kW
CO_2-Emissionen		
- Batterieproduktion	11.600	Tonnen CO_2
- Fahrbetrieb	2.220	kg CO_2/100 km
- Batterieproduktion + Fahrstrom 150 `000 km	14.930	Tonnen CO_2
- Batterieproduktion + Fahrstrom 200 `000 km	16.040	Tonnen CO_2
Verbrenner (Dieselmotor, Allradantrieb)		
Tankvolumen	66	l
Verbrauch	7.0	l/100 km
CO_2-Emissionen		
- Fahrbetrieb	18.480	kg CO_2/100 km
- 150 `000 km	27.720	Tonnen CO_2
- 200 `000 km	36.960	Tonnen CO_2
Mehrgewicht BEV	ca. 585	kg
Emissionsvorteil BEV 150 `000 km	**12.790**	**Tonnen CO_2**
Emissionsvorteil BEV 200 `000 km	**20.920**	**Tonnen CO_2**

CO_2-Emissionen im Vergleich

Zunächst soll am Beispiel des BEV des Herstellers A gezeigt werden, welchen gravierenden Einfluss die bei der Produktion des Fahrstroms anfallenden CO_2-Emissionen und die CO_2-Last durch die Produktion der Antriebsbatterie auf die Vergleichsergebnisse haben. Mit den CO_2-Emissionen des aktuellen Strom-Mix in Deutschland (ca. 400 g CO_2/kWh) gerechnet, würden während 150 `000 km (Batterieproduktion + Fahrstrom) 17.650 Tonnen CO_2 und nicht nur die mit dem Strom-Mix in der Schweiz ermittelten 10.720 Tonnen CO_2 emittiert. Wird bei der Batterieproduktion nicht mehr mit dem niedrigsten Wert von 145 kg CO_2/kWh, sondern mit einem und gemäss der einschlägigen Literatur ebenfalls noch vertretbaren Wert von 170 kg CO_2/kWh gerechnet, würden sich für eine Fahrstrecke von 150 `000 km (Batterieproduktion + Fahrstrom) 19.100 Tonnen CO_2 ergeben. So gerechnet, würden BEV und Verbrenner praktisch die gleiche Menge CO_2 emittieren. Diese alternative Berechnung zeigt, dass die aus fragmentarischen Lebenszyklusanalysen resultierenden scheinbar widersprüchlichen Befunde sich meist einfach erklären lassen. Die von Umweltorganisationen und Medien verbreiteten Vergleiche von BEV mit Verbrennern sollten deshalb genau angeschaut, nur zurückhaltend interpretiert und vor allem nicht verabsolutiert werden.

Die in den Fallbeispielen ermittelten Emissionsvorteile der BEV könnten – nicht zuletzt aufgrund des vergleichsweise CO_2-arm erzeugten Stroms im schweizerischen Netz – als

Argumente für einen Umstieg von Verbrennern auf BEV dienen. Allerdings emittieren alle der betrachteten BEV – trotz des gegenwärtig noch vorteilhaften schweizerischen Strom-Mix – allerdings erst nach mindestens 70`000 zurückgelegten km weniger $CO_2$ als die vergleichbaren Verbrenner (mit dem Strom-Mix in Deutschland z.B. erst nach mindestens 100`000 km). Da nur fragmentarische und nicht die eigentlich zwingend erforderlichen umfassenden Lebenszyklusanalysen (Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalysen) durchgeführt werden konnten, sind aber auch diese Befunde lediglich Teilergebnisse, die noch keine definitive Aussage über die von BEV und Verbrennern verursachten CO_2-Emissionen zulassen.

Die CO_2-Emissionen des künftigen schweizerischen Strom-Mix lassen sich z.B. heute noch nicht beziffern. Es wird zwar oft davon ausgegangen, dass der Mehrbedarf an Strom auch bei einer rasch wachsenden Anzahl von BEV durch einen entsprechenden Ausbau der Stromerzeugung mit Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen gedeckt werden kann. Ob der Ausbau dieser Anlagen mit dem auf BEV zurückgehenden steigenden Strombedarf Schritt halten kann, ist aber keinesfalls garantiert.

Kosten für BEV-Eigner

In allen Fahrzeugklassen sind BEV aktuell immer noch deutlich teurer als direkt vergleichbare Verbrenner. Nicht zuletzt deshalb wird in der Schweiz die Anschaffung von BEV und zum Teil auch der Betrieb dieser Fahrzeuge finanziell gefördert. In der Schweiz sind BEV von der für jeden im Land produzierten oder importierten PKW erhobenen Automobilsteuer in Höhe von 4 Prozent des Fahrzeugwertes befreit. Viele Kantone haben für BEV die Motorfahrzeugsteuern reduziert und einige verzichten sogar auf eine Erhebung dieser Steuer. Einzelne Kantone und Städte subventionieren mit unterschiedlich hohen Beiträgen zudem die Anschaffung von BEV und Ladeeinrichtungen.

Einige andere Länder subventionieren die Anschaffung von BEV und deren Betrieb noch stärker als die Schweiz. In Deutschland wird z.B. die Anschaffung eines BEV mit einem maximalen Netto-Listenpreis von 40`000 Euro durch eine Kaufprämie von 9`000 Euro gefördert. Staat und Hersteller bzw. Importeure finanzieren diese Subventionen (Staat mit 6`000 Euro und Hersteller bzw. Importeure mit 3`000 Euro pro BEV. Für BEV mit einem Netto-Listenpreis von 40`000 Euro bis maximal 65`000 Euro beträgt die Kaufprämie aber nur noch 7`500 Euro. Anfänglich sollte diese Subventionierung am 31.12.2021 auslaufen, inzwischen wurde die Ausrichtung der Kaufprämien um vier weitere Jahre verlängert. Von den Herstellern bzw. Importeuren zusätzlich eingeräumte Rabatte auf den Listenpreis bleiben davon unberührt. Dank diesen Subventionen liegen in Deutschland gegenwärtig die Anschaffungspreise von BEV meist in der Nähe und in einigen Fällen sogar leicht unter denen für vergleichbare Verbrenner. Allerdings sind aufgrund der noch länger zu erhaltenden Kaufprämien die Wiederverkaufswerte von BEV bereits deutlich gesunken. Möglicherweise haben auch Befürchtungen in Bezug auf Leistungseinbussen

älterer Antriebsbatterien mit zu diesen von den Fahrzeugeignern zu tragenden Wertverlusten beigetragen.

Herstellern bzw. Importeuren erleichtert eine wachsende Anzahl der von den Gesetzgebern als CO_2-frei eingestuften BEV jedoch die Einhaltung des für die Fahrzeugflotte eines Herstellers bzw. Importeurs im Durchschnitt verlangten Höchstwertes für die CO_2-Emissionen und hilft auch, die bei einer Verletzung dieses Höchstwertes fälligen Strafzahlungen zu vermeiden bzw. zu verringern. Die finanzielle Förderung des von der Politik erwünschten Umstiegs von Verbrennern auf BEV durch Hersteller bzw. Importeure – möglicherweise unter Inkaufnahme von Margeneinbussen – ist daher verständlich.

Ohne Kaufprämien und/oder zusätzlichen Rabatten der Hersteller bzw. Importeure, liegen die Anschaffungspreise für BEV allerdings deutlich über den für vergleichbare Verbrenner verlangten Preisen. An diesen Unterschieden beim Fahrzeugkauf dürfte sich in absehbarer Zeit nur wenig ändern. BEV werden auch in absehbarer Zukunft tendenziell mehr kosten als klassische Verbrenner. Es darf zwar mit weiter sinkenden Preisen für Antriebsbatterien gerechnet werden. Aktuell liegt der Anteil der Antriebsbatterie an den Produktionskosten eines BEV meist noch etwas über 20 Prozent. Der preisliche Wettbewerbsnachteil wird sich erst spürbar verringern, wenn Hersteller BEV zu den gleichen Kosten produzieren und mit den bei Verbrennern üblichen Margen weltweit verkaufen können.

Skalenerträge aufgrund einer wachsenden Nachfrage nach BEV, sinkende Kosten für die zur Batterieherstellung benötigten – aber aufgrund der reichlichen Vorkommen noch nicht als wirklich knapp geltenden – seltenen Metalle (Nickel, Kupfer, Kobalt, Lithium usw.) sowie neue Materialien und Techniken zur Herstellung von Antriebsbatterien mit höherer Energiedichte (z.B. Festkörperbatterien, die eventuell kostengünstiger hergestellt werden können als die z.Zt. überwiegend eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien), dürften in den kommenden Jahren eine Verringerung der Preisdifferenzen zwischen BEV und Verbrennern ermöglichen. Hersteller räumen jedoch ein, dass mit BEV sicher noch längere Zeit weniger verdient werden kann als mit Verbrennern.

Eigner von BEV dürfen heute von im Vergleich mit Verbrennern geringeren Wartungskosten ausgehen, aber nur solange die Antriebsbatterie nicht ausgetauscht werden muss. Gewichtsbedingt und wegen der hohen Anfahrdrehmomente der BEV ist jedoch mit einem höheren Reifen- und Bremsenverschleiss zu rechnen. Steuerliche Vorteile und andere Privilegien werden zudem nicht von Dauer sein können. Mit einer wachsenden Anzahl BEV auf den Strassen werden auch BEV in irgendeiner Form zur Finanzierung der Strassen beitragen müssen, um die dann geringer werdenden Einnahmen aus Mineralöl- und Motorfahrzeugsteuern, usw. zu kompensieren. Die Kosten für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur, die sich schon heute in erheblich differierenden und spürbar – teilweise bis zum Dreifachen – über den im normalen Netz verlangten Strompreisen an öffentlichen Ladesäulen niederschlagen, werden die Eigner von BEV künftig ebenfalls finanziell stärker

belasten. Hersteller und Importeure von BEV können sich an den Kaufprämien sicher auch nur noch solange beteiligen, solange mit den Erträgen aus Produktion bzw. Import von Verbrennern diese Verkaufshilfen noch finanziert werden können. Die staatlichen Subventionen für die Anschaffung von BEV werden früher oder später sowieso unvermeidlich zulasten der Steuerzahler gehen. Ein Entfall dieser Subventionen wird jedoch die z.Zt. noch wachsende Nachfrage nach BEV – wie z.B. die in China und anderswo gemachten Erfahrungen zeigen – ebenfalls beeinträchtigen.

Wie viel kostet die Reduktion einer Tonne CO_2 mit BEV?

Was kostet die Reduktion der CO_2-Emissionen durch den Umstieg auf BEV? Auf diese Frage wird meist nicht näher eingegangen. Aufgrund einer schwachen Nachfrage nach PKW werden in der Schweiz den Käufern von BEV und Verbrennern z.Zt. erhebliche Rabatte eingeräumt. Die Unterschiede sowohl zwischen den Listenpreisen für BEV und Verbrennern als auch für die rabattierten Anschaffungspreise von BEV und Verbrennern liegen jedoch in fast allen der hier betrachteten Fälle in vergleichbaren Grössenordnungen. Die für einen Kaufentscheid mit entscheidenden Preisdifferenzen zwischen BEV und Verbrennern werden deshalb von der gegenwärtigen Absatzlage auf dem PKW-Markt nur wenig berührt.

Der Mehrpreis für den BEV des Herstellers B liegt in der Schweiz bei ca. 10 ` 000 CHF, auch für die BEV der Hersteller C und D liegen die nicht subventionierten Mehrpreise in dieser Höhe. Der Umstieg vom Verbrenner auf einen vergleichbaren BEV des Herstellers B reduziert die $CO_2$-Emissionen um 10.721 Tonnen $CO_2$ (zurückgelegte Distanz 150 ` 000 km) bzw. um 16.178 Tonnen CO_2 (bei 200 ` 000 km). Die Reduktion einer Tonne CO_2 kostet den Fahrzeugeigner damit ca. 930 CHF bzw. ca. 620 CHF. Im Falle des Herstellers C werden die CO_2-Emissionen um 14.977 Tonnen bzw. um 19.002 Tonnen reduziert. Die Reduktion einer Tonne CO_2 kostet ca. 670 CHF bzw. ca. 530 CHF. Im Falle des Herstellers D sinken die CO_2-Emissionen um 12.790 Tonnen bzw. um 20.920 Tonnen und die Reduktion einer Tonne CO_2 kostet ca. 780 CHF bzw. ca. 480 CHF. Bei den hier betrachteten Beispielen B-D kostet also die Reduktion einer Tonne CO_2 – durch die Ersetzung eines vergleichbaren Verbrenners (Benzin- oder Dieselmotor) – mit einem BEV bei einer zurückgelegten Distanz von 150 ` 000 km bzw. 200 ` 000 km mindestens 670 CHF bzw. 480 CHF. Selbst wenn die Mehrpreise für BEV künftig einmal auf ca. 5 ` 000 CHF sinken sollten, wird die Reduktion einer Tonne CO_2 immer noch mehr als 200 CHF kosten. Pro memoria: Im Europäischen Emissionshandelssystem (ETS) liegt der Preis für eine Tonne CO_2 gegenwärtig noch deutlich unter 50 Euro.

Der Hersteller A bzw. dessen Importeur ist jedoch ein Sonderfall. In Deutschland beträgt der Mehrpreis für den betrachteten BEV ohne die Kaufprämien ca. 4 ` 500 Euro, mit den Fördermassnahmen liegt der Preis für den BEV aber sogar ca. 1 ` 000 Euro unter dem Anschaffungspreis des vergleichbaren Verbrenners. Der Listenpreis wurde vom Hersteller

offensichtlich so kalkuliert, dass die maximale Kaufprämie von 9 ` 000 Euro ausgerichtet werden kann. In Schweiz beträgt der Mehrpreis für diesen BEV ca. 3 ` 000 CHF. Die Reduktion einer Tonne CO kostet in diesem Fall deshalb auch nur ca. 280 CHF (bei 150 ` 000 km) bzw. ca. 200 CHF (bei 200 ` 000 km).

Die grossen Marktanteile dieses Herstellers auf den Weltmärkten ermöglichen massive Verkaufshilfen zur Vermeidung hoher Strafzahlungen aufgrund einer Verletzung der in der Schweiz geltenden Emissionsgrenzwerte. Da dieser Hersteller im Wesentlichen immer noch das Geld mit Verbrennern verdient, können die Preise für BEV aufgrund der immer noch relativ geringen Stückzahlen problemlos mit den aus dem Absatz von Verbrennern erzielten Erträgen quersubventioniert werden. Es wird sich erst später zeigen, ob die vom Hersteller für die Zukunft erhofften Skalenerträge und Kostensenkungen ausreichen werden, um BEV ohne irgendwelche Subventionen preislich wettbewerbsfähig zu machen. Die Frage, ob und inwieweit die z.Zt. für BEV zu beobachtenden Verkaufshilfen Bestand haben werden, lässt sich deshalb noch nicht definitiv beantworten. Auf jeden Fall wird jedoch die aktuelle Preiskonstellation diesem Hersteller helfen, in der Schweiz auf dem Markt für BEV Anteile zu gewinnen und die vom Importeur zu bezahlenden Strafzahlungen für Verbrenner wegen Verletzung der Emissionsgrenzwerte zumindest zu verringern.

Überlegungen zur Reduktion der CO_2-Emissionen des Strassenverkehrs

Die Ersetzung von mit Verbrennungsmotoren angetriebenen PKW durch BEV ist mit Sicherheit keine effiziente Massnahme zur Reduktion der CO_2-Emissionen im Inland. Effizienz setzt voraus, dass CO_2 dort reduziert wird, wo nach dem aktuellen Stand der technischen Gegebenheiten eine Reduktion die geringsten Kosten verursacht. Dazu müssten zunächst alle – d.h. ohne jegliche Ausnahme – Verursacher von CO_2-Emissionen in ein globales oder zumindest die grossen Wirtschaftsräume (USA, China, EU + UK + CH und Japan) umfassendes Emissionshandelssystem eingebunden und auf spezifische Reduktionsmassnahmen für bestimmte Wirtschaftssektoren in einzelnen Ländern bzw. Wirtschaftsräumen verzichtet werden.

Politik und Umweltorganisationen in der EU und in der Schweiz wollen jedoch noch strengere Grenzwerte für die von Verbrenner versachten CO_2-Emissionen an und die CO_2-Abgaben auf Treibstoffe weiter erhöhen. In einigen europäischen Ländern sind auch bereits Verbote für von Verbrennungsmotoren angetriebene PKW angedacht bzw. bereits fest vorgesehen.

In vielen Teilen der Welt noch längere Zeit dürfte sich allerdings kaum jemand für den Bau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für BEV einsetzen bzw. sich den Aufbau einer solchen Infrastruktur finanziell überhaupt leisten können. Oft wird in diesen Kontext auch

übersehen, dass der Strassenverkehr an den globalen anthropogenen CO_2-Emissionen – gemäss den Daten der Internationalen Energieagentur – lediglich einen Anteil von knapp 10 Prozent hat. Massnahmen zur Reduktion der CO_2-Emissionen sollten deshalb nicht prioritär im Strassenverkehr gesucht werden.

Selbst in einigen europäischen Ländern ist nicht mit einem raschen Ausbau der für eine wachsende Anzahl von BEV erforderlichen Ladeinfrastruktur zu rechnen. Je mehr BEV europaweit in Verkehr gebracht werden um Verbrenner zu ersetzen, desto länger müssten auch mehr Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke am Netz bleiben. Die ohne Subventionierung wesentlich höheren Anschaffungspreise für BEV und die damit einhergehenden hohen Opportunitätskosten werden zudem noch länger dafür sorgen, dass in Europa – solange es keine Verbote gibt – weiterhin vor allem Verbrenner gekauft werden.

Es stellt sich zudem die Frage, wer den Bau von Verbrennern übernimmt, wenn in Europa, aufgrund von Emissionsgrenzwerten, Verboten oder finanziellen Belastungen der Treibstoffe, die Automobilindustrie faktisch gezwungen sein wird, praktisch nur noch BEV zu produzieren und zu verkaufen?

Die Produktion und auch die Entwicklung von Verbrennern wird in diesem Fall unvermeidlich und irreversibel früher oder später in absatzstarke Märkte ohne solche Beeinträchtigungen wandern. In der europäischen Automobil- und Zulieferindustrie werden dadurch nicht nur Arbeitsplätze, sondern auch technische Kompetenzen verloren gehen. Wettbewerber im Rest der Welt werden die von der europäischen Politik aufoktroyierten Produktions-und Kompetenzverlagerungen sicher begrüssen.

Nachdenken sollte deshalb zu der Erkenntnis führen, dass nicht die Verbrennungsmotoren das CO_2-Problem verursachen, sondern die verwendeten Treibstoffe. Mit CO_2-neutral hergestellten und insbesondere mit synthetischen Treibstoffen (E-Fuels) liesse sich das CO_2-Problem spürbar verringern. Wer wirklich eine Reduktion der globalen CO_2-Emissionen erreichen will, sollte sich daher dafür einsetzen, dass die Potenziale CO_2-neutral hergestellter Treibstoffe genutzt werden können.

Die Produktionskosten für E-Fuels liegen aufgrund der Umwandlungsverluste zwar noch deutlich über den aus fossilen Energieträgern gewonnenen Treibstoffen. Allerdings verursacht auch die Umwandlung des mit neE erzeugten und als CO_2-frei betrachteten, aber nicht bedarfsgerecht anfallenden Stroms in speicherfähige Gase erhebliche Umwandlungsverluste und hohe Kosten.

E-Fuels sind vergleichsweise einfach zu lagern und die zur Versorgung der Verbrenner mit diesen Treibstoffen benötigte Infrastruktur ist bereits vorhanden. Eine europaweit flächendeckende Ladeinfrastruktur für BEV und der dazu erforderliche Netzausbau müssen dagegen erst noch geschaffen werden. Ladeinfrastruktur und Netzausbau sind jedoch

nicht gratis zu haben und sollten bei einer Gesamtkostenbetrachtung von BEV und Verbrennern nicht ausgeklammert werden.

E-Fuels könnten nicht nur durch den Entfall der CO_2-Abgaben, sondern z.B. durch Anrechnung kohlenstoffneutral produzierter Treibstoffe auf die Flottenemissionen (z.B. durch ein Zertifikatsystem) oder durch noch höhere Steuern für mit fossilen Energieträgern hergestellten Treibstoffen preislich wettbewerbsfähiger gemacht werden. Mit E-Fuels und anderen CO_2-neutral hergestellten Treibstoffen würden nicht nur neu in den Verkehr gebrachte BEV einen Beitrag zur Reduktion der CO_2-Emissionen erbringen, sondern auch der bestehende grosse Bestand konventionell angetriebener Fahrzeuge. Mit diesen Treibstoffen könnten dann auch Fahrzeugeigner, deren Budget nicht den Kauf eines neuen BEV ermöglicht, einen entsprechenden Beitrag zur Reduktion der vom Strassenverkehr CO_2-Emissionen leisten.

Die zur Subventionierung der Anschaffung von BEV und der Ladeinfrastruktur bereitgestellten Mittel sollten künftig für weitere Forschung an E-Fuels und vor allem für die Errichtung von Anlagen, die eine kostengünstigere Herstellung dieser synthetischen Treibstoffe ermöglichen, verwendet werden. CO_2-neutrale Treibstoffe könnten auch die Schadstoffemissionen des noch wachsenden globalen, aber bereits mehr als 1.6 Milliarden zählenden Bestands an Verbrennern sukzessive reduzieren. Nur mit einer zunehmenden Substitution der aus Mineralölen hergestellten Treibstoffe durch E-Fuels wird auch der Strassenverkehr in der Lage sein, einen substantiellen Beitrag zur Reduktion der globalen CO_2-Emissionen zu erbringen. Von einer Einschränkung der auf Verbrenner setzenden individuellen Mobilität in einzelnen Wirtschaftsräumen aufgrund von Verboten oder technisch kaum noch machbaren Emissionsgrenzwerten für Verbrenner, usw. ist jedoch kein wesentlicher Beitrag zur Erreichung des eigentlichen Ziels zu erwarten.