

Positionspapier



Dr. Brigitte Buchmann, Empa

Christian Bach, Empa

Prof. Dr. Alexander Wokaun, PSI

Prof. Dr. Thomas J. Schmidt, PSI

Dr. Felix Büchi, PSI

Prof. Dr. Andrea Vezzini, BFH

13. Juni 2016

# Zusammenfassung

Die Mobilität auf der Strasse ist für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung der Schweiz wichtig. Sie ist aber auch für rund ein Drittel der in der Schweiz verbrauchten Endenergie und fast 40% der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Im Rahmen der Energie-, CO<sub>2</sub>- und Mineralölsteuergesetzgebung wurden deshalb Massnahmen zur Reduktion dieser Kennwerte eingeführt. Namentlich sind dies die Energieetikette für Personenwagen, die Mineralölsteuerentlastung für erneuerbare Treibstoffe sowie die CO<sub>2</sub>-Zielwerte für Personenwagen.

Für die Automobilindustrie hat insbesondere die CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung eine grosse Bedeutung, da die Nichteinhaltung der Zielwerte mit hohen Abgaben sanktioniert wird. Pro Gramm CO<sub>2</sub>/km – ab einer Zielwertüberschreitung von mehr als 3g CO<sub>2</sub>/km – beträgt diese Sanktion zurzeit CHF 142.5, was umgerechnet bei einer Laufleistung eines Fahrzeugs von 225'000 km (15 Jahre à 15'000 km/a) einem CO<sub>2</sub>-Preis von rund CHF 600 pro Tonne entspricht. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenwagen sind somit sehr kostspielig. Deshalb hat die vorgeschlagene Massnahme eine grosse Wirkung und Erfolgchance für die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Als Massnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung werden alternative Antriebe (Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenantriebe) sowie (strombasierte) erneuerbare Antriebsenergie diskutiert. Mit alternativen Antrieben wird primär eine Effizienzsteigerung als notwendige Voraussetzung erreicht. Die entscheidende Wirkung auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielen jedoch Treibstoffe, welche auf erneuerbarer Energie basieren. Dieser Tatsache wird in der heutigen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für Personenwagen nicht ausreichend Rechnung getragen. Aus wissenschaftlicher Sicht drängt sich deshalb eine Anpassung auf, die mit diesem Positionspapier für die Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes vorgeschlagen wird. Dabei wird selbstverständlich berücksichtigt, dass die in der Schweiz angewandten Prüfvorschriften im Rahmen der Fahrzeugzulassung auf Europäischen Richtlinien basieren, die im Rahmen der Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes nicht abgeändert werden können.

Als erneuerbare Energie wird in diesem Kontext primär die im heutigen Strommarkt, beispielsweise im Sommerhalbjahr, nicht mehr wirtschaftliche Wasserkraft und die erneuerbare Elektrizität verstanden, welche gespeichert werden muss (z.B. Photovoltaik (PV) im Sommer über Mittag). Diese nicht direkt im Stromnetz nutzbare Elektrizität kann entweder direkt für Elektrofahrzeuge, durch elektrolytische Umwandlung in Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge oder durch Methanisierung mit CO<sub>2</sub> für Gasfahrzeuge verwendet werden. Die genannten Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich Wirkungsgrad und Speicherfähigkeit. So bieten Elektrofahrzeuge den höchsten Wirkungsgrad und Gasfahrzeuge dank Gasnetz die grösste Speicherfähigkeit, während Brennstoffzellenfahrzeuge hinsichtlich dieser Kriterien dazwischen liegen. Für die zukünftige Energieversorgung sind hohe Wirkungsgrade wie auch hohe Speicherkapazitäten gleich wichtig. Deshalb können diese drei Konzepte (Elektro-, Gas- und Wasserstoffmobilität) aus energiesystemischer Sicht durchaus als gleichwertig angesehen werden.

Der Vorschlag für die CO<sub>2</sub>-Gesetzesrevision basiert auf der Einführung von Fahrzeug-Treibstoffpaketen (vorerst nur für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren):

- 1) Fahrzeuge sollen künftig zusammen mit einem Treibstoffpaket verkauft werden können.
- 2) Die durch das Treibstoffpaket realisierte (nachgewiesene) CO<sub>2</sub>-Reduktion soll im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für die entsprechenden Fahrzeuge angerechnet werden können.
- 3) Diese Massnahme soll auf effiziente Fahrzeuge beschränkt werden (z.B. Fahrzeuge, die den CO<sub>2</sub>-Zielwert als Einzelfahrzeuge einhalten) und sie soll nur für synthetische Treibstoffe gelten, da biogene erneuerbare Treibstoffe bereits im Rahmen der Mineralölsteuergesetzgebung berücksichtigt werden.

# 1. Ausgangslage

Die Energiestrategie 2050 der Schweiz umfasst fünf Aktionsfelder, unter denen der Effizienzsteigerung, der Nutzung erneuerbarer Energien und der Energiespeicherung eine wichtige Rolle zukommt. Im Pariser Klimaabkommen hat sich die Schweiz verpflichtet, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss um 50% zu senken, davon 30% durch inländische Massnahmen<sup>1</sup>.

Diese Ziele sind inhaltlich und in ihrer Wirkung stark miteinander verknüpft. Effizienzsteigerungen verringern die benötigte Endenergie und ermöglichen es, den Anteil der erneuerbaren Energien zu deren Bereitstellung zu steigern und somit die Abhängigkeit von importierter fossiler Energie zu senken. Beide Faktoren bewirken multiplikativ eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses und tragen damit zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele bei.

Mit dem Fokus auf Mobilität gilt analog, dass im Hinblick auf den erforderlichen Beitrag dieses Sektors der Endenergiebedarf für das Erbringen der Transport-Dienstleistungen gesenkt werden muss und diese Energie möglichst CO<sub>2</sub>-arm, d.h. mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien, bereitgestellt werden muss. Alle Szenarienrechnungen zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Ziele im Verkehrssektor nur durch die Kombination beider Stossrichtungen erreichbar sind.

Verschiedene Technologiepfade werden entwickelt und können als Optionen zur Zielerreichung beitragen. Entwicklungen am Fahrzeugchassis wie Massenreduktion und Verringerung der Reibungsverluste sind eine gemeinsame Grundvoraussetzung. Der elektrische Antriebsstrang weist sehr gute Wirkungsgrade auf – in diesem Fall hängt die erzielte CO<sub>2</sub>-Reduktion davon ab, wie CO<sub>2</sub>-arm die inkrementell benötigte Elektrizitätsmenge produziert wurde.<sup>2</sup>

Eine analoge Überlegung gilt für Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge, welche hohe ökologische Vorteile bieten, wenn der Wasserstoff mit erneuerbaren Energien hergestellt wird. Eine dritte Stossrichtung betrifft die Entwicklung von hoch effizienten Antriebssträngen auf der Basis von Verbrennungsmotoren, ggf. verknüpft mit Hybridisierung. Diese Option erreicht dann ihre grösste Wirkung, wenn gleichzeitig der Anteil an erneuerbarem Treibstoff gesteigert wird.

Jede dieser Optionen weist spezifische Vor- und Nachteile auf im Hinblick auf technologischen Reifegrad, Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur, Kosten und Nutzen für den Fahrzeugbesitzer und die damit verbundene Markteinführung.

Der Bundesrat folgt konsequent der Linie, die Effizienz- und CO<sub>2</sub>-Ziele lösungsneutral vorzugeben und damit keinen der Lösungswege *a priori* zu favorisieren oder auszuschliessen. Deshalb sollte für jede Strategie auch die Möglichkeit gegeben werden, sowohl bei der Entwicklung des Antriebsstranges als auch bei der Bereitstellung der Antriebsenergie das Optimum anzustreben.

Schliesslich soll noch das Aktionsfeld der Energiespeicherung angesprochen werden. Indem die Sektoren von Haushalten, Industrie, Gewerbe und Dienstleistungen mit dem Transportsektor gekoppelt werden, gelingt es, temporäre nicht nutzbare Energie im Elektrizitätssystem dank dem erwünschten Ausbau der Photovoltaik in Form von alternativen Treibstoffen zu speichern. Diese Integration im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung und Flexibilisierung des Energiesystems ist Schlüssel und Voraussetzung für die Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050.

---

<sup>1</sup> Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information

<sup>2</sup> Dies gilt analog für den Elektrizitätsanteil der Antriebsenergie von Steckdosen-Hybriden (Plug-in Hybrids).

## 2. Effiziente Fahrzeuge und erneuerbare Energie

Ökobilanzstudien zeigen, dass der Einsatz von erneuerbarer Energie in der Mobilität hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionen die mit Abstand grösste Wirkung erzeugt<sup>3,4</sup>. Allerdings ist erneuerbare Energie sowohl zeitlich wie auch örtlich nur begrenzt verfügbar. Die grösste Wirkung wird erzielt, wenn verbrauchsarme Fahrzeuge und erneuerbare Energie gekoppelt werden. In der Schweiz gibt es heute auf gesetzlicher Stufe keine Regelung, die diese Kopplung vorsieht oder fördert. Der im Rahmen dieses Papiers vorgestellte Vorschlag nimmt dieses Anliegen auf.

Für eine Kopplung effizienter Fahrzeuge und erneuerbarer Energie eignen sich in einem ersten Schritt primär Elektro-, Wasserstoff- und Gasfahrzeuge. Später könnten auch weitere Antriebskonzepte integriert werden (z.B. synthetischer Diesel, Methanol, Dimethylether). Da Strassenfahrzeuge ein sehr breites Spektrum an Fahrzeuggrössen und -arten mit verschiedensten Nutzungen aufweisen und die neuen Antriebskonzepte ihre ausgeprägten Stärken und Schwächen in unterschiedlichen Anwendungen aufweisen, werden diese eher als komplementär denn als konkurrierend eingestuft.

Eine zentrale Frage für die Einführung synthetischer Treibstoffe ist, wann in der Schweiz entsprechende Mengen an erneuerbarer Elektrizität für ihre Herstellung verfügbar werden, deren direkte Nutzung im Strommarkt nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Analysen von Stromflussdaten der Swissgrid durch die Empa zeigen, dass bereits heute im Sommerhalbjahr praktisch kontinuierlich CH-Strom zu sehr niedrigen Spotmarktpreisen exportiert wird. Das dafür im Sommerhalbjahr verantwortliche Überangebot an Strom ist gleichzeitig auch die Ursache, dass die Wasserkraft im Strommarkt nicht mehr wirtschaftlich ist.

Diese Situation wird sich voraussichtlich erst ändern, wenn sich die Basis der Stromproduktion in der Schweiz und in Europa grundlegend wandelt. Mittel- bis längerfristig stossen aufgrund des Zubaus von PV-Anlagen zudem auch die Pumpspeicher an ihre Grenzen (erwartet ab ca. 2035<sup>5</sup>), was an schönen Sommertagen das Zurück- oder Abregeln von PV-Anlagen zur Folge hätte. Anlagen zur Herstellung synthetischer Treibstoffe können diesen, im Strommarkt nicht wirtschaftlichen oder nicht nutzbaren Strom nutzen und dafür (zumindest im Sommerhalbjahr) ein neues Marktsegment mit höheren Preisen eröffnen.

Die zeitliche Integration der stochastisch eingespeisten erneuerbaren Energie (v.a. Solar- und Windkraft) bedingt, neben anderen Massnahmen, entsprechende Speicher und zeitlich gesteuerte Verbraucher. Dabei ist die Flexibilität des Stromsystems kleiner als jene der Gassysteme. Elektromobilität alleine würde dazu führen, dass die Spitzenlast des Stromsystems steigt – diese müsste durch teuren Speicherausbau und langfristig mit fossiler Stromerzeugung gedeckt werden. Wasserstoff und synthetisches Erdgas, erzeugt aus erneuerbaren Energien, erhöhen die notwendige Flexibilität, auch wenn diese Treibstoffformen ebenfalls aus Strom hergestellt werden. Eine Diversifizierung auf alle möglichen erneuerbaren Treibstoffe (Strom, Wasserstoff, synthetisches Erdgas) ist deshalb schon aus Systemsicht notwendig.

---

<sup>3</sup> Bauer et al; The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework; Applied Energy 157 (2015)

<sup>4</sup> Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW); Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen – Zwischenbericht (2015)

---

<sup>5</sup> BFE - Energiespeicher in der Schweiz - Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050 (2013)

## 2.1 Elektro-Mobilität

Elektrofahrzeuge weisen einige Vorteile auf: So fallen lokal keine Emissionen an, was besonders in Ballungsgebieten ein Vorteil ist. Die Energie für den Antrieb kann mehrheitlich, wenigstens im Sommerhalbjahr, aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden und der Endenergiebedarf ist zudem durch den hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs deutlich kleiner als beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Heute sind zudem technisch schon sehr gute und ausgereifte Fahrzeuge auf dem Markt erhältlich. Für die nächsten fünf Jahre haben die meisten Fahrzeughersteller für fast alle Modellreihen eine elektrische Variante angekündigt. Dank verbesserter Batterietechnologie ist dabei künftig mit Reichweiten – zumindest im Sommer (d.h. ohne Heizenergieverbrauch im Fahrzeug) – von mehr als 300km zu rechnen.

Als Nachteil dürften die längeren Ladezeiten im Vergleich zum normalen Tanken aufgeführt werden, obwohl auch hier an Lösungen gearbeitet wird, welche es erlauben, innert 15 Minuten gegen 50% der Batteriekapazität zu laden. Aufgrund der tiefen Strompreise, der Befreiung von der Treibstoffsteuer und den zunehmend geringeren Anschaffungskosten dürfte der Marktanteil der reinen Elektrofahrzeuge in den nächsten Jahren weiter ansteigen.

In der Schweiz sind 75.7% aller Motorfahrzeuge Personenwagen (4'458'069). Davon sind Ende 2015 jedoch nur 6'366 Personenwagen oder weniger als 0.2% reine Elektrofahrzeuge, allerdings mit steigender Tendenz. Ein nennenswerter Einfluss auf den Energieverbrauch dürfte sich jedoch erst bei einer Durchdringung von mehr als 5% am Gesamtfahrzeugbestand nachweisen lassen. Etwas höher ist der Anteil der Hybridfahrzeuge am Gesamtfahrzeugbestand, mit 50'159 Fahrzeugen (alle Klassen) oder rund 1.2%<sup>6</sup>.

Ein Anteil an reinen Elektrofahrzeugen von 15% am Gesamtfahrzeugbestand in der Schweiz bis 2025

---

<sup>6</sup> Alle Zahlen aus „Markt der Eco-Mobile Aktualitäten und Trends 2016“, energie schweiz und Electrosuisse, Fachgesellschaft e'mobile.

würde allerdings bedingen, dass die Neuzulassungen von aktuell 3'882 Elektrofahrzeugen auf über 100'000 Fahrzeuge ansteigen müssten<sup>7</sup>.

Das Potential der Elektromobilität zur Substitution fossiler Treibstoffe und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Schweiz ist somit gross, solange die Elektrizität aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden kann. Dabei spielt die geringe Belastung der aktuellen Stromproduktion in der Schweiz mit CO<sub>2</sub> eine ausschlaggebende Rolle. Eine grössere Durchdringung der Elektromobilität erfordert die Bereitstellung von gleichwertiger, CO<sub>2</sub>-armer Elektrizität. Der Erfolg hängt jedoch auch von den zu erwartenden weiteren technischen und wirtschaftlichen Fortschritten im Bereich der elektrischen Fahrzeugtechnologien ab, sowie von den gesetzlichen Rahmenbedingungen. Bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen spielen die Entwicklungen bei der Schweizerischen und Europäischen Stromproduktion eine entscheidende Rolle, weshalb eine unabhängige Betrachtung der beiden Sektoren Mobilität und Elektrizitätswirtschaft nicht zielführend ist.

Ausgehend von Verbrauchswerten für ein typisches Fahrzeug der Kompaktklassen lässt sich in Abbildung 1 zeigen, dass ein Elektrofahrzeug mit einem Stromverbrauch von 21.2kWh/100km ein konventionelles Fahrzeug mit einem Benzinverbrauch von 5.2l/100km bzw. 46.0kWh/100km ersetzen kann<sup>8</sup>. Dabei ist in beiden Fällen der Verbrauch auf Basis des ADAC-Eco-Tests berücksichtigt, der gegenüber dem gesetzlichen Normverbrauch um einiges realistischer ausfällt.

---

<sup>7</sup> Abgeleitet aus: „Elektrofahrzeuge: Marktpenetration in der Schweiz bis 2020“, www.alpiq.ch, 2010

<sup>8</sup> Mitsuo Hitomi in MTZ, 05I2016, 77. Jahrgang, Seite 32

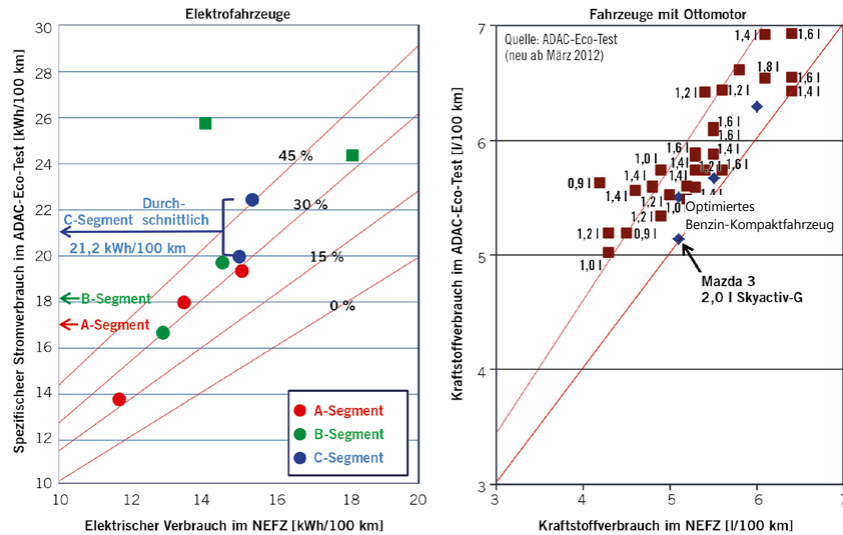


Abb. 1: Vergleich der energetischen Norm- und Realverbräuche von elektrischen (links) und benzinbetriebenen Fahrzeugen (rechts)<sup>9</sup>

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektrofahrzeugen ergeben sich aus dem elektrischen Verbrauch und den Emissionen bei der Stromerzeugung (Abbildung 2, blaues Band bei 500g CO<sub>2</sub>/kWh für Europäischen Strom). Die rote Linie am unteren Ende des braunen Balkens zeigt eine „Well-to-Wheel“-Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen elektrischer Fahrzeuge (Kompakwagenklasse) für verschiedene spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromherstellung. Für ein mit

Europäischem Strom betriebenes Elektrofahrzeug (blauer Balken) resultiert ein äquivalenter Benzinverbrauch von 3.8l-Äq/100km (Well-to-Wheel) bzw. 4.2l-Äq/100km bei Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung der Lithium-Ionen-Batterie, was einer Gesamtemission von 116g CO<sub>2</sub>/km entspricht. Dieser Wert liegt heute um ca. 25% unter den CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen eines vergleichbaren Benzinfahrzeugs.

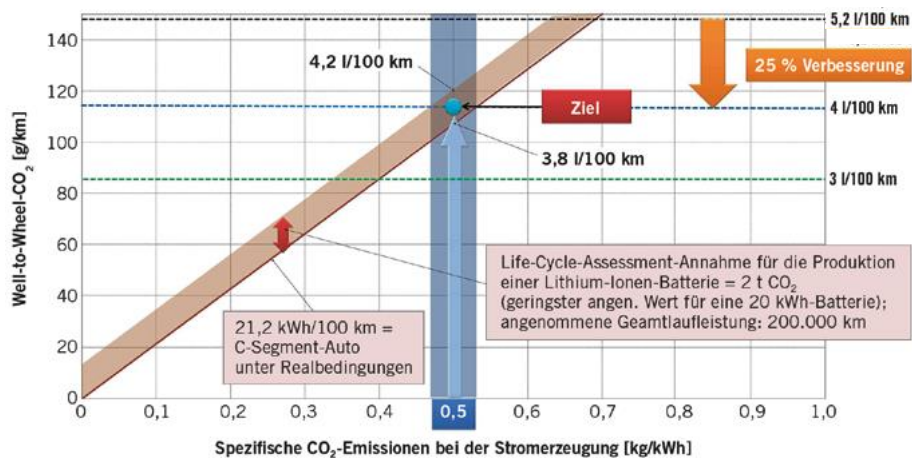


Abb. 2: Well-to-Wheel-Bewertung eines elektrischen Fahrzeugs im Vergleich mit einem verbrennungsmotorischen Benzinfahrzeug<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Mazdas Weg zu effizienteren Verbrennungsmotoren, MTZ 05/2016

## 2.2 Wasserstoff-Mobilität

Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge basieren auf Elektrofahrzeugen mit kleinerer Batterie, dafür ausgerüstet mit Wasserstoff-Druckspeichern und einer Brennstoffzelle für die onboard-Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität. Damit lassen sich heute zwei- bis dreimal so hohe Reichweiten erzielen wie bei typischen Elektrofahrzeugen. Die zukünftigen Entwicklungen bei der Fahrzeugplattform, der Speicher- und Brennstoffzellentechnologie lassen erwarten, dass sich die Reichweite weiter erhöht.

Der Verbrauch liegt für die Kompaktklassen heute bei  $<1\text{kg H}_2/100\text{km}$ , was einem Benzin-äquivalent von  $<3.5\text{l}/100\text{km}$  entspricht. Wird der Wasserstoff durch Elektrolyse aus Strom hergestellt, so ergibt sich ein Verbrauch von  $40 - 50\text{kWh}/100\text{ km}$ . Dies entspricht, wird der CH-Strommix ( $137\text{g CO}_2/\text{kWh}$ ) für die Wasserstoffherstellung zugrunde gelegt, einer Emission von  $55 - 70\text{g CO}_2/\text{km}$ , bei Verwendung von Wasserkraft  $12 - 15\text{g CO}_2/\text{km}$ .

Die mit heutiger Technologie im Vergleich mit Benzin-/Diesel-Fahrzeugen höheren Emissionen bei der Fahrzeugherstellung werden bei Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff bereits nach ca.  $20'000\text{km}$  Fahrleistung kompensiert. Hier ist mit weiteren Entwicklungen (z.B. Reduktion des Edelmetallgehalts in den PEM-Katalysatoren) noch ein bedeutendes Optimierungspotential vorhanden.

Die Betankungszeit entspricht ungefähr derjenigen von Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Aufgrund der erst im Aufbau befindlichen Tankstelleninfrastruktur ist die Versorgung lokal bzw. regional betriebener Fahrzeuge (Busse, Kommunalfahrzeuge, Lastwagen, Taxis, usw.) als Einstiegsmarkt prädestiniert. Mittelfristig können Brennstoffzellenfahrzeuge aufgrund ihrer Reichweite und der kurzen Betankungszeit auch als „Standardfahrzeuge“ (z.B. für Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung) eingesetzt werden.

Wasserstoffzapfsäulen können in die bestehende Tankstelleninfrastruktur integriert werden, welche so eine vergleichbare Tankleistung erbringen wie heutige Benzin-/Diesel-Säulen. Dies ist im Vergleich zu Elektrofahrzeugen ein grosser Infrastrukturvorteil: um dieselbe Kilometer-Leistung zu „tanken“, werden bei Elektrofahrzeugen – selbst mit  $120\text{kW}$  Superchargern – ca. 15-mal mehr Ladestationen benötigt als Tankstellen für Wasserstoff. Bei Schnelladestationen für mehrere Fahrzeuge ist auch die Netzbelastung zu berücksichtigen.

Während „Industrie-Wasserstoff“ heute typischerweise mittels Erdgas-Dampfreformierung aus fossiler Energie hergestellt wird und dementsprechend  $\text{CO}_2$ -belastet ist, kommt aus Akzeptanzgründen beim „Mobilitäts-Wasserstoff“ nur auf erneuerbarer Energie basierender Wasserstoff in Frage. Dieser wird elektrolytisch aus erneuerbarer Elektrizität hergestellt. Wasserstoff kann in Druckbehältern gespeichert werden, weshalb Wasserstoffproduktionsanlagen auf den Strommarkt in einem gewissen Rahmen Rücksicht nehmen können. Mit zunehmendem Ausbau (fluktuierender) erneuerbarer Elektrizitätsproduktionsanlagen (PV, Wind) wird die Umwandlung in chemische Energieträger zur Zwischenspeicherung immer unumgänglicher, will man die temporäre Rück- oder Abregelung von PV- oder Windanlagen vermeiden. Das bedeutet, dass man – mit grosser Wahrscheinlichkeit – mit dem Umstieg auf erneuerbare Stromproduktion nicht an der Produktion von Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen vorbei kommt. Liegt nun Wasserstoff vor, ist die direkte energetische Nutzung natürlich naheliegend und sinnvoll.

Beim Aufbau von Wasserstoff-Tankstellennetzen setzen die Länder unterschiedliche Prioritäten. Deutschland mit seiner heimischen Automobilindustrie fokussiert primär auf Personenwagen. Wasserstoffherzeugungs- und Betankungsanlagen sind teuer und deshalb von Beginn an auf vergleichsweise grosse Umsätze angewiesen. Deshalb eignen sich in der Schweiz insbesondere wasserstoffbetriebene Bus- und LKW-Flotten als Startpunkt für den Aufbau eines Tankstellennetzes.

Neuere Entwicklungen mit einfacheren Brennstoffzellensystemen könnten die Kosten solcher Fahrzeuge in absehbarer Zeit jedoch markant senken, was die Wirtschaftlichkeit wasserstoffbetriebener Fahrzeuge verbessert.  $\text{H}_2$ -Fahrzeuge weisen – wie Elektrofahrzeuge – keine  $\text{CO}_2$ -Normemissionen auf und werden deshalb ebenfalls durch die  $\text{CO}_2$ -Gesetzgebung gefördert. Bei schweren Motorwagen (LKW, Busse) gibt es allerdings noch keine derartige Vorschrift. LKWs oder Busse mit Wasserstoffantrieb profitieren aktuell lediglich von einer LSWA-/PSVA- und Mineralölsteuerbefreiung. Die EU plant eine  $\text{CO}_2$ -Gesetzgebung für schwere Motorwagen ab 2021/22. Ab dann könnten Wasserstoffantriebe gegenüber dem Dieselantrieb in LKWs und Bussen weitere monetäre Vorteile erhalten.

### 2.3. Biogas-/Power-to-Gas-Mobilität

Vor dem Hintergrund der weltweiten CO<sub>2</sub>-Gesetzgebungen haben Gasfahrzeuge bei manchen Automobil- und Motorenherstellern deutlich an Bedeutung gewonnen. Gasfahrzeuge emittieren bei Personenwagen bereits heute, mit fossiler Energie betrieben, 20-25% weniger CO<sub>2</sub> als vergleichbare Benzinfahrzeuge, und das Tankstellenerdgas weist in einigen Ländern bereits Biogasanteile auf. In der Schweiz beträgt dieser Anteil rund 20%. Davon wird der zwischen dem Schweiz. Gasverband VSG und dem UVEK vereinbarte Mindestanteil von 10% im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung angerechnet. Dies führt bei Gasfahrzeugen in der Schweiz im Vergleich zu Benzinfahrzeugen für die Zulassung zu rund 30% geringeren CO<sub>2</sub>-Normemissionen. Die Reduktion kann in der Realität aufgrund des höheren Biogasanteils, der teilweise an Tankstellen bis 100% wählbar ist, auch höher sein.

Erdgas-/Biogasfahrzeuge sind heute technisch auf vergleichbarem Stand wie moderne Benzinfahrzeuge, weisen aber aufgrund der wesentlich geringeren Anforderungen bei der Abgasreduktion und der höheren Klopfestigkeit des Treibstoffs grössere Potentiale zur Effizienzsteigerung auf. Erwartet wird, dass ab 2020 auch hybridisierte Gasmotoren in Mittelklassefahrzeugen vorgestellt werden und ab 2025 auf den Markt gelangen, was zu einer weiterer deutlichen Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Minderung führt.

Da Gasfahrzeuge aufgrund der Gasspeicherung im Bereich der Hinterachse nicht für den Allradantrieb und aufgrund der beschränkten Reichweite nicht für sportliche Fahrzeuge, sondern eher für 'normal motorisierte' Kompakt- und Mittelklassefahrzeuge und Minivans geeignet sind, bestehen tendenziell auch wenig Risiken für Rebound-Effekte.

Gasfahrzeuge weisen heute im Gasbetrieb Reichweiten von 350 – 500km auf. Hybridisiert und mit weiterentwickelten Speichersystemen ausgerüstet, sind künftig Reichweiten im Gasbetrieb bis 900 km denkbar.

Aufgrund der geringen Treibstoffkosten sind Gasfahrzeuge bereits heute für Langstrecken-anwendungen wirtschaftlich interessant. Langstreckentaugliche Fahrzeuge spielen bei den realen CO<sub>2</sub>-Emissionen eine wichtige Rolle, wie die Analyse von Mikrozensus-Daten zeigt<sup>10</sup>: Rund 20% der Personenwagen weisen eine Jahresfahrleistung von mehr als 20'000km/a auf. Diese sind für 44% der totalen Fahrleistung verantwortlich (Daten 2005). Auf der anderen Seite weisen 38% der Fahrzeuge eine Jahresfahrleistung von weniger als 10'000km pro Jahr auf, die nur 15% der totalen Fahrleistung verursachen. Daraus wird klar, dass Fahrzeuge mit hoher Jahresfahrleistung als eine der relevantesten Zielgruppen für CO<sub>2</sub>-Minderungsmassnahmen betrachtet werden sollten. Dies wird bei reinen Verbrauchs- oder Lebenszyklusanalysen nicht sichtbar, sondern nur bei energiesystemischen Betrachtungen.

Mit Biogas betriebene Gasfahrzeuge erreichen bereits heute vergleichbare CO<sub>2</sub>-Lebenszyklus-emissionen wie mit erneuerbarem Strom betriebene Elektrofahrzeuge (Abbildung 3, grün markiert). Neben Biogas wird zunehmend der Einsatz von synthetischem Methan aus Power-to-Gas-Anlagen in Gasfahrzeugen thematisiert<sup>11</sup>. Energiesystemische Betrachtungen zeigen dabei, dass Gasfahrzeuge hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Minderung in Zukunft eine ähnliche Rolle spielen können wie Elektrofahrzeuge. Bei Verfügbarkeit von Power-to-Gas können die installierten Anlagen für erneuerbare Elektrizität unabhängig vom aktuellen Strombedarf immer maximal produzieren können und müssen nicht temporär zurück- oder abgeregelt werden. Die erneuerbare Elektrizität wird mit der Power-to-Gas-Technologie in Methan umgewandelt, ins Gasnetz eingespeist und kann dann zeitlich und örtlich entkoppelt in Gasfahrzeugen genutzt werden.

---

<sup>10</sup> A. Janssen et al; Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – Fokus auf Fahrzeuge mit hoher Laufleistung; ATZ 2/2005

<sup>11</sup> Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr (2015)



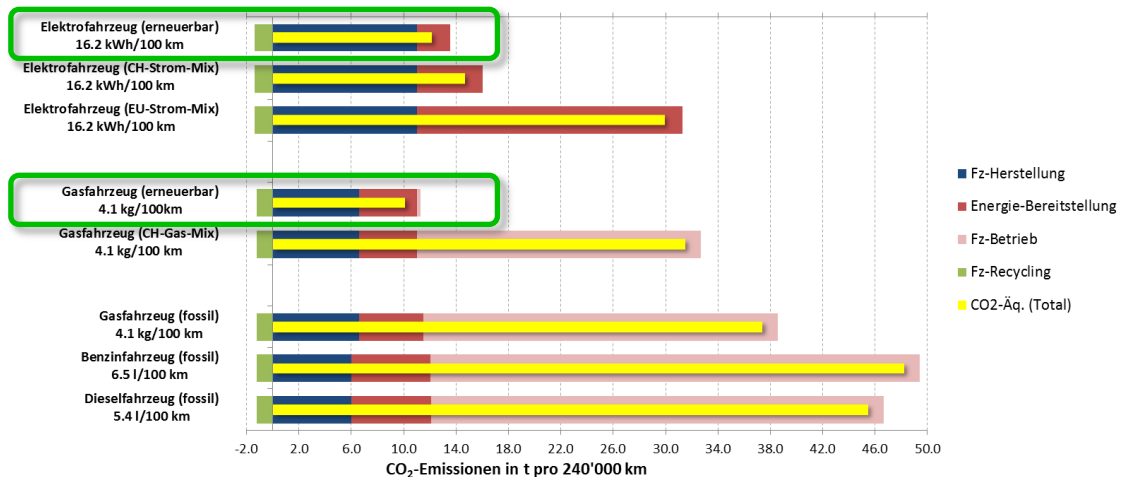


Abb. 3 LCA-Vergleich eines Kompaktfahrzeugs mit verschiedenen Antriebskonzepten basierend auf Bauer et al, Applied Energy (2015), Fuchs et al. ATZ (2014), Audi (2015) und Verbrauchsdaten gemäss Spritmonitor.de für VW Golf 81-85kW (MJ 2014/2015). Biogas gemäss LCA-Studie Empa-PSI-Agroscope-Doka (2012); EU-Strom-Mix: 522g CO<sub>2</sub>/kWh, CH-Strom-Mix: 137g CO<sub>2</sub>/kWh, erneuerbarer Strom: 65g CO<sub>2</sub>/kWh

Der Wirkungsgrad für Power-to-Gas-Anlagen liegt heute bei ca. 50% und könnte bis 2050 auf 65% ansteigen<sup>12</sup>. Damit ist der Wirkungsgrad alleine betrachtet schlechter als derjenige der Wasserstoffherstellung oder der Batteriespeicherung. Der Vorteil der Power-to-Gas-Technologie ist die grosse Speicherkapazität des Gasnetzes und der geringe

Bedarf an neuer Infrastruktur. Synthetisches Methan weist ähnlich niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen auf wie Biogas, wenn die Stromherkunft auf sauberer erneuerbarer Elektrizität (z.B. Wind- oder Wasserkraft) basiert und das CO<sub>2</sub> nicht extra dafür erzeugt, sondern aus einer bestehenden Quelle genutzt werden kann (Abbildung 4).

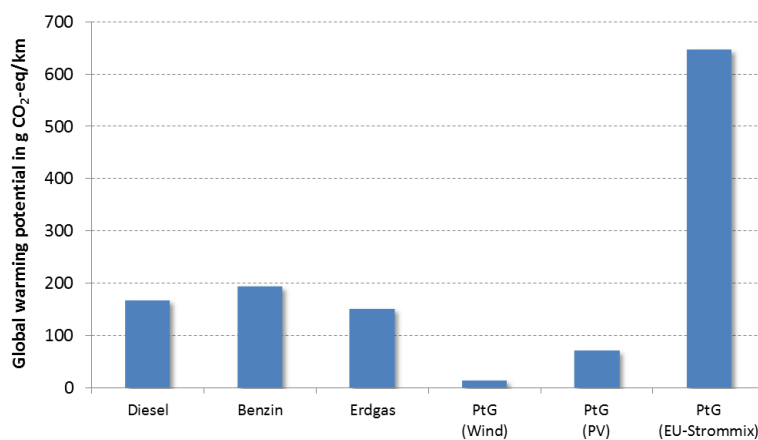


Abb. 4 CO<sub>2</sub>-Äq.-Emissionen für einen Personenwagen in einer Well-to-Wheel-Betrachtung (d.h. ohne Berücksichtigung der Fahrzeugproduktion), betrieben mit verschiedenen Energieträgern<sup>12</sup>

<sup>12</sup> M. Wietschel et al: Energietechnologien der Zukunft – Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze (2015)

### 3. CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung

Die Europäische CO<sub>2</sub>-Verordnung (EG) 715/2007 beschreibt das Messverfahren zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen für Personen- und Lieferwagen. Eine Prüfung nach dieser Verordnung ist erforderlich für die Zulassungen von Personen- und Lieferwagen mit Verbrennungsmotor in der EU und in der Schweiz. Dabei werden allerdings nur die am Auspuff emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt (im Weiteren als CO<sub>2</sub>-Normemissionen bezeichnet). Nicht berücksichtigt werden die im realen Betrieb resultierenden zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen (z.B. bei eingeschalteten Nebenverbrauchern wie Heizung oder Klimaanlage oder höherer Zuladung) und die vorgelagerten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Antriebsenergie Bereitstellung sowie der Fahrzeugproduktion. Nicht Rechnung getragen wird heute dem Betrieb von Fahrzeugen mit erneuerbaren Treibstoffen.

Im Kapitel 3 der Schweizerischen 'Verordnung über die Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen' vom 30.11.2012 wird das Verfahren für die Berechnung der individuellen CO<sub>2</sub>-Zielwerte für Importeure bzw. Hersteller von Personenkraftwagen (die sich auch zu so genannten Emissionsgemeinschaften zusammenschliessen können) festgelegt. Der individuelle CO<sub>2</sub>-Zielwert gilt für die pro Kalenderjahr neu in Verkehr gesetzten Personenkraftwagen. Überschreitet nun der Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Normemissionen dieser Fahrzeuge den individuellen CO<sub>2</sub>-Zielwert eines Importeurs, Herstellers oder einer Emissionsgemeinschaft, so ist eine Abgabe (Sanktion) zu entrichten. Im Rahmen der aktuellen CO<sub>2</sub>-Gesetzesrevision ist geplant, den heutigen CO<sub>2</sub>-Zielwert von 130g/km analog der EU per 2020/2021 auf 95g/km zu senken und – ebenfalls entsprechend der EU – Zielwerte für Lieferwagen einzuführen. Eine weitere Absenkung für Personenkraftwagen auf <80g/km (ab ca. 2026) ist in der EU bereits in Diskussion.

Während nun die CO<sub>2</sub>-Normwerte der Fahrzeugzulassungsstatistiken einen klaren Abwärtstrend aufzeigen, ist allerdings auch klar, dass dies in der Realität in deutlich geringerer Masse zutrifft<sup>13</sup>. Die Diskrepanz der Norm- und Realverbräuche ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen<sup>14</sup>. Zudem werden die Fahrzeuge unabhängig von ihrem Einsatz (z.B. geringe oder hohe Laufleistung) bewertet.

**Aus wissenschaftlicher Sicht ist es wünschenswert, dass bei der Weiterentwicklung dieser Gesetzgebung zunehmend auf Massnahmen gesetzt wird, die die Gesetzgebung für die Realität wirksamer machen. Die diesbezüglich effektivste Massnahme ist die Kopplung effizienter Fahrzeuge und erneuerbarer Energie.**

*Anmerkung:*

Das neue Abgas- und CO<sub>2</sub>-Messverfahren „WLTP“ (für Worldwide Light duty vehicle Test Procedure) für Personen- und Lieferwagen, das voraussichtlich 2018 eingeführt wird, wird die oben beschriebene Ausgangslage bei den CO<sub>2</sub>-Normemissionen dank realistischeren Bestimmungen des Fahrzeugmasse und Fahrzeugwiderstände voraussichtlich etwas verbessern. Um realistischere CO<sub>2</sub>-Normemissionen zu erhalten, braucht es trotzdem zusätzlich einen Ansatz, wie von den CO<sub>2</sub>-Normemissionen auf CO<sub>2</sub>-Realemissionen umgerechnet werden kann. Ein solcher Ansatz wird zurzeit von der ETH Zürich und der Empa im Rahmen eines vom BFE unterstützten Projektes entwickelt. Dieser Ansatz soll auch in die von der EU-Kommission einberufene Expertengruppe des Scientific Advice Mechanism (SAM) zur Verringerung der Diskrepanz zwischen CO<sub>2</sub>-Norm- und -Realemissionen eingebracht werden.

---

<sup>13</sup> ICCT; From laboratory to road - a 2015 update of official and "real-world" fuel consumption and CO<sub>2</sub> values for passenger cars in Europe

<sup>14</sup> EU Commission; Evaluation of Regulation 443/2009 and 510/2011 on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions from light-duty vehicles" Study contract no 071201/2013/664487/ETU/CLIMA.C.2 (8<sup>th</sup> April 2015)

## 4. Empfehlung

Empfohlen wird hiermit eine Anpassung der Schweizerischen CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung, um eine Kopplung „effizienter Fahrzeuge“ mit „erneuerbarer Energie“ zu ermöglichen.

Als „effiziente Fahrzeuge“ sollen Fahrzeuge definiert werden, die den jeweils gültigen Zielwert der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für das Einzelfahrzeug einhalten, d.h. zur Zeit 130g/km für Personenwagen beziehungsweise 95g/km ab 2020. Als „erneuerbare Energie“ sollen Treibstoffe gelten, die die Anforderungen der Treibstoff-Ökobilanzverordnung einhalten. Um in diesem Kontext eingesetzt werden zu können, muss damit im Vergleich zu einem Benzin-Referenzfahrzeug eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 40% bewirken, bei einer Erhöhung der Umweltbelastungspunkte um max. 20%.

Da biogene erneuerbare Treibstoffe bereits heute über die Mineralölsteuerentlastung wirtschaftlich nutzbar sind, wird vorgeschlagen, die neue Regelung nur für synthetische erneuerbare Treibstoffe einzuführen. Synthetische Treibstoffe sind zwar teurer, haben aber auch ein deutlich grösseres CO<sub>2</sub> Reduktions-Potential, was die vorgeschlagene Änderung berücksichtigen würde.

Konkret würden effiziente Fahrzeuge, die im Paket mit erneuerbarer Energie verkauft werden, eine separate schweizerische Typengenehmigung mit entsprechend reduziertem CO<sub>2</sub>-Wert erhalten. Mit dem Verkauf solcher Fahrzeuge mit dem entsprechenden Treibstoff für die Lebensdauer würde sich der entsprechende Importeur, Hersteller bez. die Emissionsgemeinschaft verpflichten, den Lebensverbrauch an Treibstoff für diese Fahrzeuge (z.B. Normverbrauch \* 15 Jahre \* 15'000km pro Jahr) als erneuerbare Energie in das entsprechende Treibstoffsystem der Schweiz einzuspeisen (nachgewiesen über entsprechende Clearingstellen anhand üblicher Instrumente).

Die Zulassung der Fahrzeuge würde dabei weiterhin unverändert auf den Europäischen Richtlinien basieren und auch der Betrieb solcher Fahrzeuge würde gleich erfolgen, wie bei Fahrzeugen ohne Treibstoffpaket (d.h. Betankung an normalen Tankstellen).

Diese Regelung soll nur für den Betrieb effizienter Fahrzeuge gelten und nicht für den Betrieb grosser, schwerer und übermotorisierter Fahrzeuge. Dadurch würden effiziente Fahrzeuge, die mit synthetischen, erneuerbaren Treibstoffen betrieben werden können, in der Automobilwirtschaft eine höhere strategische Bedeutung erhalten, was zu tieferen CO<sub>2</sub>-Emissionen führen würde.

Eine solche Regelung würde auch für das Stromsystem eine zusätzliche, sehr willkommene Flexibilität bedeuten, weil Anlagen zur Herstellung synthetischer Treibstoffe primär zu Zeiten mit hohem Stromangebot und nicht auch bei Stromknappheit betrieben werden müssen.

Die EU verfolgt betreffend biogener und synthetischer erneuerbarer Treibstoffe eine andere Strategie als die Schweiz, indem entsprechende „Beimisch-Quoten“ vorgeschrieben werden. Damit wird allerdings nicht sichergestellt, dass erneuerbare Treibstoffe in effizienten Fahrzeugen genutzt werden. Da die vorgeschlagene Änderung lediglich die sowieso separate schweizerische CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung tangiert, ist kein Konflikt mit EU-Regelungen zu erwarten.

Der Evaluationsbericht der EU-Kommission zur CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung<sup>14</sup> schlägt des Weiteren vor, die heutige Bewertung der CO<sub>2</sub>-Auspuff-Emissionen in eine CO<sub>2</sub>-Lebenszyklusbewertung umzustellen<sup>1416</sup>, was mit der in diesem Dokument vorgeschlagenen Kopplung von effizienten Fahrzeugen und erneuerbarer Energie dann auch weitgehend kongruent wäre.

# Anhang: Anschauungsbeispiel

## 1. Beispielfahrzeug



VW Golf TGI mit Gasmotor

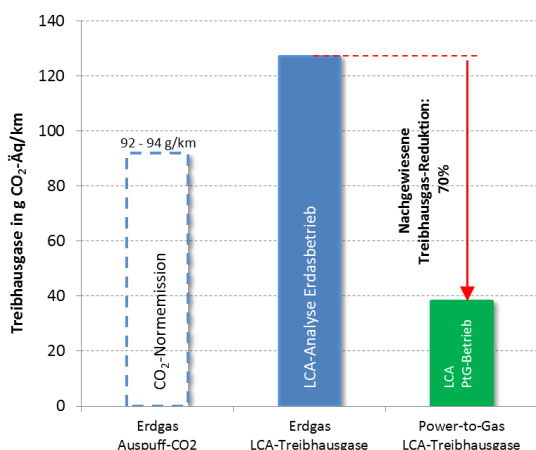
CO<sub>2</sub>-Normemission: 92 – 94g/km

Norm-Verbrauch: 5.2m<sup>3</sup>/100km

(gemäss EU-Gesamtfahrzeuggenehmigung)

**Da dieses Fahrzeugs den aktuellen CO<sub>2</sub>-Zielwert von 130 g/km (Richtlinie (EG) 443/2009, Art. 1) einhält, ist es als „effizientes Fahrzeug“ gemäss vorgeschlagener Regelung qualifiziert.**

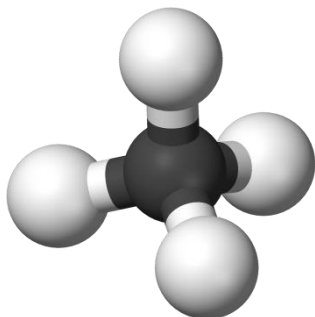
## 2. Lebenszyklusanalyse der Power-to-Gas-Anlage



Damit ein erneuerbarer Treibstoff (im Musterbeispiel: synthetisches Methan) für diese Regelung eingesetzt werden kann, muss mittels Life Cycle Analyse (LCA) eine Treibhausgasminderung um mindestens 40% nachgewiesen werden, bei einer maximalen Erhöhung der Umweltbelastung um 20% (entsprechend den Anforderungen der Treibstoffökobilanzverordnung).

**Unter der Annahme, dass für die entsprechende PtG-Anlage eine Treibhausgas-Reduktion für das Beispielfahrzeug um beispielsweise 70% nachgewiesen werden kann, erhält dieses eine um 70% reduzierte CO<sub>2</sub>-Normemission (d.h. 28 g/km). Dieser Wert könnte dem Fahrzeug beispielsweise auf einer zusätzlichen Typengenehmigung zugewiesen werden.**

## 3. Verpflichtung des Automobil-Importeurs



Mit der Zulassung von Fahrzeugen, entsprechend dieser zusätzlichen Typengenehmigung gehen Automobil-Importeure die Verpflichtung ein, die von diesen Fahrzeugen während der gesamten Lebensdauer genutzte Treibstoffmenge in das entsprechende Treibstoffsystem einzuspeisen.

**Für das Beispielfahrzeug mit einem Normverbrauch von 5.2 m<sup>3</sup>/100 km bedeutet dies, dass während einer typischen Lebensdauer von 15 Jahren pro Fahrzeug jährlich 780m<sup>3</sup> bzw. 510kg synthetisches Methan (entsprechend einem Verbrauch über 15'000km/a) in das schweizerische Gasnetz eingespeist werden muss. Damit würde pro Fahrzeug jährlich knapp 1t CO<sub>2</sub> eingespart.**

Mengenberechnung:

$$5.2\text{m}^3/100\text{km} * 15'000\text{km/a} = 780\text{m}^3/\text{a}$$