



Brennstoffzellen-PKW

0,14...0,19 kg CO₂/km weniger pro gefahrene Entfernung

0,90...1,26 kg/kWh weniger CO₂ pro Nutzenergie am Rad

0,32...0,45 kg/kWh weniger CO₂ pro Windenergieeinsatz

9,50 €/100 km Treibstoffkosten entsprechen ca. 50 ct/kWh am Rad

-50 ... -162 €/tCO₂ Vermeidungskosten, d.h. Kostenersparnis von bis zu 166 €/t CO₂ im Vergleich zu heutigen Kraftstoffverbräuchen

bis 160 TWh Windenergieeinsatz möglich

bis zu 80 Mio. Tonnen CO₂ können jährlich vermieden werden



PKW mit Brennstoffzellen können Windgas nutzen und sind damit tatsächlich emissionsfrei. Die Kosten der Brennstoffzellen und des Wasserstofftanks bestimmen die Gesamtkosten der Fahrzeuge. Ähnlich den Solarzellen können hier durch Massenfertigung Kostensenkungen um bis zu 90% erzielt werden, so daß Brennstoffzellenfahrzeuge sogar günstiger werden können, als PKW mit Verbrennungsmotor. Während Akkumulatoren in erster Linie materialintensiv sind, verhält es sich bei Photovoltaik und Brennstoffzellen umgekehrt: sie sind wissensintensiv. Das aber bedeutet, daß sobald das Wissen erworben wurde die Kosten gegen Null streben, da das Material keine nennenswerte Rolle spielt.

Wesentlich für die Einführung von PKW mit Brennstoffzellen ist weitehin das Vorhandensein einer Mindestzahl von Wasserstofftankstellen. Zwischen 1000 und 2000 Tanksstellen gelten aus ausreichend für Deutschland. Die aktuelle Tankstellenanzahl ist [hier](#) nachvollziehbar. Es gibt auch eine ständig aktuelle [Übersicht über alle Tankstellen](#).



Es folgt die Herleitung der oben beschriebenen Ergebnisse ([Formelzeichenerklärung](#)):

Bei 100 km/h verbraucht ein PKW 7,6 kWh nur aufgrund des Luftwiderstandes. Dazu kommt der Rollwiderstand und die Verluste des Antriebstranges, des Antriebes sowie Verluste durch Bremsvorgänge. Im Alltag sind daher etwa doppelt so hohe Verbräuche, also 15,2 kWh/100 km erreichbar (Erfahrungswert im Mix aus Stadt und Landstraße mit Elektrofahrzeugen). Dieser Wert soll weiterhin als Bezugsgröße für die am Rad mindestens erforderliche Energie dienen: $E_{Rad}^{min} = 0,152 \frac{kWh}{km}$

Für den Vergleich mit PKW mit Verbrennungsmotoren sind zu nächst deren Verbräuche und Emissionswerte erforderlich.

Die meisten heute gebräuchlichen Fahrzeuge benötigen ca. 70 kWh/100 km. Dies entspricht einem Verbrauch von $V^{7l} = 7,11$ Liter Diesel (mit 9,84 kWh/l) oder $V^{8l} = 8,2$ Liter Benzin (mit 8,54 kWh/l). Der Wirkungsgrad dieser Fahrzeuge beträgt damit

$$\eta^{7l} = \frac{E_{Rad}^{min}}{0,7 \frac{kWh}{km}} = 21,7\%$$

Die **Kosten der Energie am Rad** ergeben sich dabei zu

$$K_{Diesel}^{7l} = \frac{7l}{100km} \times 1,2 \frac{Euro}{l} = \frac{39 Euro}{100km} \quad \text{bzw.} \quad k_{Diesel}^{7l} = \frac{1,2 \frac{Euro}{l}}{21,7\% \times 9,84 \frac{kWh}{l}} = 56 \frac{ct}{kWh}$$

$$K_{Benzin}^{8l} = \frac{8l}{100km} \times 1,3 \frac{Euro}{l} = \frac{48 Euro}{100km} \quad \text{bzw.} \quad k_{Benzin}^{8l} = \frac{1,3 \frac{Euro}{l}}{21,7\% \times 8,54 \frac{kWh}{l}} = 70 \frac{ct}{kWh}$$

Sparsame Fahrzeuge kommen mit 50 kWh/100 km aus, entsprechend 5 Litern Diesel bzw. knapp 6 Litern Benzin. Ihr Wirkungsgrad ist entsprechend

$$\eta^{5l} = \frac{E_{Rad}^{min}}{0,5 \frac{kWh}{km}} = 30\%$$

Die **Kosten der Energie am Rad** betragen dann $K_{Diesel}^{5l} = \frac{5l}{100km} \times 1,2 \frac{Euro}{l} = \frac{20Euro}{100km}$

bzw. $k_{Diesel}^{5l} = \frac{1,2 \frac{Euro}{l}}{30\% \times 9,84 \frac{kWh}{l}} = 41 \frac{ct}{kWh}$

$$K_{Benzin}^{6l} = \frac{6l}{100km} \times 1,3 \frac{Euro}{l} = \frac{26Euro}{100km} \text{ bzw. } k_{Benzin}^{6l} = \frac{1,3 \frac{Euro}{l}}{30\% \times 8,54 \frac{kWh}{l}} = 51 \frac{ct}{kWh}$$

Die CO₂-Emissionen pro Kraftstoffeinsatz betragen für Diesel und Benzin

$$\varepsilon_{Kraftstoff} = 0,27 \frac{kg}{kWh}$$

Daraus ergeben sich die CO₂-Emissionen pro Nutzenergie am Rad für beide betrachtete Verbrauchstypen von PKW zu

$$\varepsilon_{Nutz}^{7l} = \frac{\varepsilon_{Kraftstoff}}{\eta^{7l}} = 1,26 \frac{kg}{kWh} \text{ bzw. } \varepsilon_{Nutz}^{5l} = \frac{\varepsilon_{Kraftstoff}}{\eta^{5l}} = 0,9 \frac{kg}{kWh}$$

Die CO₂-Ersparnis pro Kilometer ist das Produkt aus vorstehender CO₂-Emission pro Nutzenergie am Rad und der am Rad mindestens erforderlichen Energie:

$$\varepsilon_{Nutz}^{7l} \times E_{Rad}^{min} = 1,26 \frac{kg}{kWh} \times 0,152 \frac{kWh}{km} = 0,191 \frac{kg}{km}$$

$$\varepsilon_{Nutz}^{5l} \times E_{Rad}^{min} = 0,9 \frac{kg}{kWh} \times 0,152 \frac{kWh}{km} = 0,136 \frac{kg}{km}$$

1. Die **CO₂-Ersparnis pro Nutzenergie** von Brennstoffzellen-PKW entspricht damit vorgenannten Werten und beträgt je nach Vergleichstyp $0,9 \dots 1,26 \frac{kg}{kWh}$, wegen

$$\Delta \varepsilon_{Nutz} = \varepsilon_{Nutz}^{neu} - \varepsilon_{Nutz}^{alt} = -\varepsilon_{Nutz}^{alt} \text{ (wegen } \varepsilon_{Nutz}^{neu} = 0) \text{ , also}$$

$$\Delta \varepsilon_{Nutz}^{5l} = -0,90 \frac{kg}{kWh}$$

$$\Delta \varepsilon_{Nutz}^{7l} = -1,26 \frac{kg}{kWh}$$

2. Die **CO₂-Ersparnis pro eingesetzter Windenergie** ergibt sich durch Multiplikation vorstehender Werte mit dem Wirkungsgrad der Energieumwandlung vom Windstrom zur Energie am Rad.

Dieser Gesamtwirkungsgrad beträgt

$$\eta_{H_2}^{Ges} = \eta_{El_y} \times \eta_{Komp} \times \eta_{Trans} \times \eta_{PKW} = 75\% \times 88\% \times 95\% \times 57\% = 36\% \text{ mit}$$

$\eta_{El_y} = 75\%$... Wirkungsgrad der Wasserstoffelektrolyse aus Windstrom

$\eta_{Komp} = 88\%$... Wirkungsgrad der Verdichtung auf 700 bar (Druck an der Tankstelle)

$\eta_{Trans} = 95\%$... Wirkungsgrad des Wasserstofftransportes

$$\eta_{PKW} = \frac{E_{Rad}^{min}}{E_{PKW}} = \frac{0,152}{0,266} = 57\% \text{ ... Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-PKW}$$

wobei $E_{PKW} = 0,8 \frac{kg}{100km} \times 33,3 \frac{kWh}{kg} = 0,266 \frac{kWh}{km}$ mit 0,8 kg Wasserstoffverbrauch pro 100 km (Erfahrungswert mit dem Toyota Mirai #) und dem Energiegehalt von Wasserstoff von 33,3 kWh/kg.

Somit berechnet sich die CO₂-Ersparnis pro eingesetzter Windenergie zu

$$\Delta \varepsilon_{Wind}^{5l} = \Delta \varepsilon_{Nutz}^{5l} \times \eta_{ges} = -0,90 \frac{kg}{kWh} \times 36\% = -0,32 \frac{kg}{kWh}$$

$$\Delta \varepsilon_{Wind}^{7l} = \Delta \varepsilon_{Nutz}^{7l} \times \eta_{ges} = -1,26 \frac{kg}{kWh} \times 36\% = -0,45 \frac{kg}{kWh}$$

3. Der **Preis der Nutzenergie am Rad** errechnen sich wie oben mit den Daten für ein Wasserstofffahrzeug und dem aktuellen Tankstellenpreis für Wasserstoff von 9,50 €/kg:

$$K_{H_2} = \frac{0,8kg}{100km} \times 9,5 \frac{Euro}{kg} = \frac{13Euro}{100km} \text{ bzw. } k_{H_2} = \frac{9,5 \frac{Euro}{kg}}{57\% \times 33,3 \frac{kWh}{kg}} = 50 \frac{ct}{kWh}$$

4. Die **CO₂-Vermeidungskosten sind im Vergleich zu den üblichen PKW mit Verbrennungsmotor negativ**, d.h. es ergibt sich ein CO₂-Vermeidungsgewinn.

Wie oben ermittelt liegen die Kosten am Rad eines 7-Liter-Diesels bzw. 8-Liter-Benziners bei 56 bzw. 70 ct/kWh gegenüber 50 ct/kWh bei einem Wasserstofffahrzeug. Daraus ergibt sich eine Ersparnis von 6-20 ct/kWh bei Wasserstofffahrzeugen unter der Annahme, daß Brennstoffzellenfahrzeuge zu gleichen Kosten wie verbrennungsmotorbetriebene Fahrzeuge hergestellt werden. #

Daraus lassen sich nun die CO₂-Vermeidungskosten (hier Vermeidungsgewinn) berechnen, indem dieser Wert durch die oben unter 1. ermittelte CO₂-Ersparnis $\Delta \varepsilon_{Nutz}^{7l}$ geteilt wird:

$$\frac{6...20 \frac{ct}{kWh}}{-1,26 \frac{kgCO_2}{kWh}} = -50... -162 \frac{Euro}{tCO_2}$$

Dasselbe Ergebnis erzielt man für Benziner auch mit Hilfe folgender Formel

$$\frac{V_{Benzin} \times k_{Benzin} - V_{H_2} \times k_{H_2}}{V_{Benzin} \times c_{Benzin} \times \varepsilon_{Kraftstoff}} = \frac{\frac{8,2l}{100km} \times \frac{1,3Euro}{l} - \frac{0,8kg}{100km} \times \frac{9,5Euro}{kg}}{\frac{8,2l}{100km} \times 8,54 \frac{kWh}{l} \times \frac{0,27kgCO_2}{kWh}} = \frac{162Euro}{tCO_2}$$

worin V für den Kraftstoffverbrauch steht, k für die jeweiligen Kosten und e für die Energiedichte. Das Produkt unter dem Bruchstrich ist dabei wiederum die oben bereits ermittelte CO₂-Ersparnis pro km $\varepsilon_{Nutz}^{7l} = 0,191 \frac{kg}{km}$

Führt man noch ΔK_{H_2} für die Mehrkosten der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrenner ein, werden die CO₂-Vermeidungskosten Null wenn diese Mehrkosten bei 3 ct/km liegen:

$$\frac{V_{Benzin} \times k_{Benzin} - (V_{H_2} \times k_{H_2} + \Delta K)}{V_{Benzin} \times c_{Benzin} \times \varepsilon_{Benzin}} = \frac{\frac{8,2l}{100km} \times \frac{1,3Euro}{l} - \left(\frac{0,8kg}{100km} \times \frac{9,5Euro}{kg} + \frac{0,03Euro}{km} \right)}{\frac{8,2l}{100km} \times 8,54 \frac{kWh}{l} \times \frac{0,27kgCO_2}{kWh}} \quad || \cdot$$

$$\frac{0Euro}{tCO_2}$$

Diese 3 ct/km multipliziert mit 200.000 km Fahrleistung eines Brennstoffzellenfahrzeuges ergeben 6.000 € als Richtwert für den Mehrpreis von Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber einem 7-Liter-Benziner, bei welchem noch keine CO₂-Vermeidungskosten entstehen.

Gegenüber 5-Liter-Dieselfahrzeugen ergäben sich bei gleichen Fahrzeugkosten aktuell CO₂-Vermeidungskosten von ca. 120 €/tCO₂. Bei einem Dieselpreis von 1,50 €/Liter wären die CO₂-Vermeidungskosten hier Null.

Insgesamt zeigt sich, daß CO₂-Vermeidungskosten der Wasserstoffmobilität bei gleichen Fahrzeugkosten je nach Verbrauch und Kraftstoffpreis um Null schwanken. Entscheidend sind also die Kosten der Brennstoffzellenfahrzeuge.

Nicht betrachtet wurde der Einfluß von Steuern auf das Ergebnis. Der Anteil von Steuern am Diesel- oder Benzinpreis liegt heute bei 200 €/tCO₂ bzw ca. 66% des Preises. Der Anteil von Steuern im Wasserstoffpreis kann wie folgt abgeschätzt werden: 19% Mehrwertsteuer plus 25% mittlere Lohnsteuern zuzüglich 3% Kapitalertrag- und Gewerbesteuern (ausgehend von 9% Gewinnanteil und 35%-iger Besteuerung). Dies ergibt zusammen 47%. Allerdings stecken im Wasserstoffpreis auch Beiträge zur Renten- und Krankenkasse in Höhe von ca. 30%. Dieser Anteil ist bei den importierten fossilen Kraftstoffen unter 5%. Insgesamt ergeben sich etwa also durchaus vergleichbare Abgabenlasten, so daß von deren Betrachtung abgesehen werden kann.

5. Das Potenzial der CO₂-Vermeidung umfasst sämtliche verkehrsbedingten Emissionen, welche ca. 160 Mio. Tonnen CO₂ betragen, 18% der heutigen Emissionen. Ab unter 100 €/kW Kosten für Brennstoffzellen sind die Kosten für die CO₂-Reduktion Null.

Die Windenergiemenge für einen einen vollständigen Ersatz von Benzin und Diesel durch Wasserstoff kann ausgehend von ca. 600 TWh Energieeinsatz im Straßenverkehr in Deutschland grob abgeschätzt werden:

$$600TWh \times \frac{\eta^{7l}}{\eta_{H2}^{Ges}} = 600TWh \times \frac{21,4\%}{36\%} = 357TWh$$

Da mindestens 50% Teil gefahrenen Strecken künftig rein elektrisch gefahren werden, reduziert sich der zu erwartende Windstrombedarf auf voraussichtlich unter 160 TWh und die durch Brennstoffzellen mögliche CO₂-Ersparnis auf ca. 80 Mio. Tonnen jährlich.

Teilen mit:



Gefällt mir:

Wird geladen...