

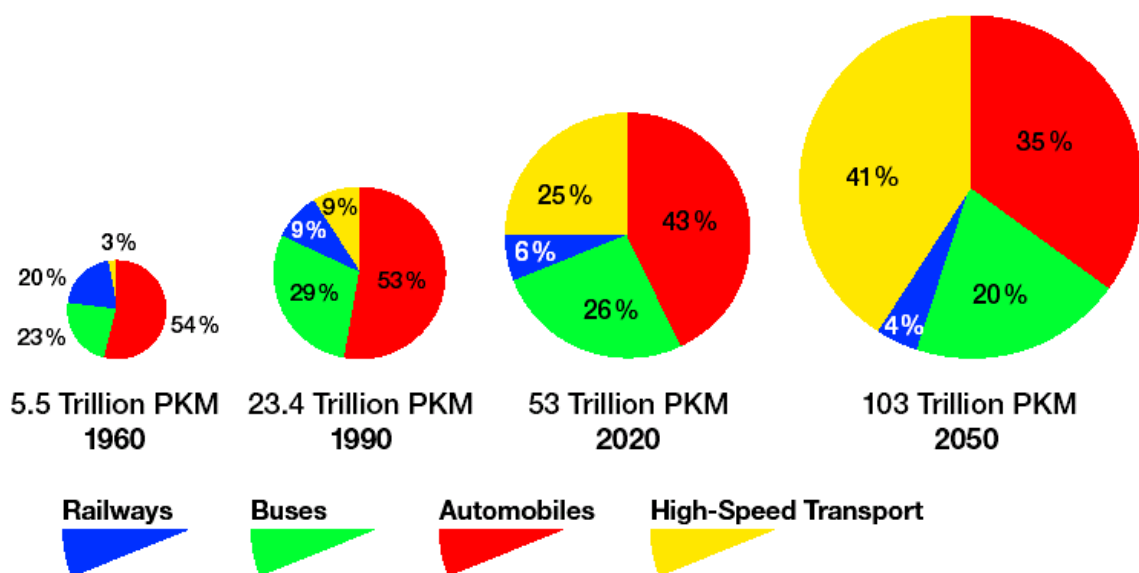
Contribution of fuel cell vehicles to a more sustainable individual mobility

Beitrag von Brennstoffzellenfahrzeugen zu einer nachhaltigeren individuellen Mobilität

Dr. sc. techn. Philipp Dietrich, Paul Scherrer Institut in Villigen

Ausgangslage

Der Verkehr ist derjenige Energiesektor mit dem höchsten Wachstum. Global gesehen wird die individuelle Mobilität in den nächsten 30 Jahren wohl zu einer Verdoppelung der Personenwagen auf unserem Planeten führen. Zudem nimmt der individuelle Personentransport im Auto auf der Strasse zwischen 1990 und 2020 um über 80% zu (vgl. Fig 1). Unter diesen Voraussetzungen kommt der Verbrauchsreduktion der Fahrzeuge eine zentrale Bedeutung zu. Das grösste Potenzial zur Effizienzsteigerung im Personenwagenbereich liegt in der Massenreduktion der Fahrzeuge und der Verbesserung des Antriebstranges.



Figur 1: Prognose der Mobilitätsbedürfnisse weltweit, aufgeteilt auf verschiedene Transportmittel nach A. Schäfer, Scientific American, Oktober 1997.

Verbrauchsreduktion des Automobils

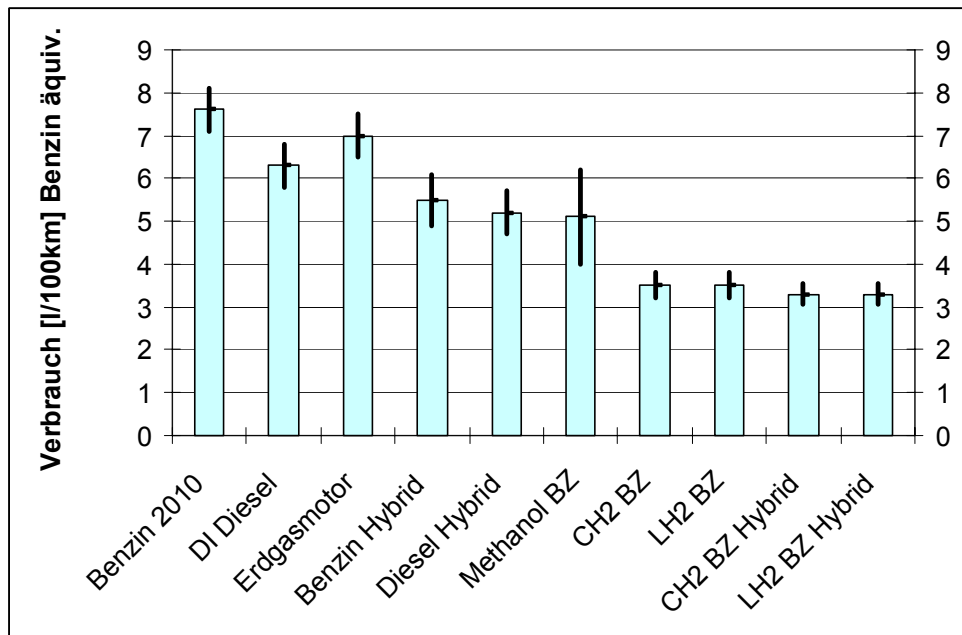
Massenreduktion

Der Verbrauch des Fahrzeugs in den Normzyklen ist stark abhängig von der Fahrzeugmasse. So zeigen Simulationen, dass beim selben Antrieb eine Massenreduktion von 10% zu einer Verbrauchsreduktion von 7 – 8 % führt. Durch die Reduktion die Abmasse des Fahrzeugs an sich, könnten bei heutigen Grossraumlimousinen oder Sport-Utility-Fahrzeugen durchaus 20 – 25% Verbrauchsreduktion erzielt werden. Dies bedeutet aber klar eine Einschränkung der heute gebotenen Sitzposition und Raumfülle. Will man darauf nicht verzichten, bleibt die Verbesserung des Antriebstranges des Fahrzeuges.

Antriebsstrang

Der Antrieb, heute bestehend aus dem Verbrennungsmotor, dem Getriebe und der Verteilung der Leistung auf die Räder kann in Zukunft grundlegend anders aussehen. Der Verbrennungsmotor kann z.B. durch einen Elektromotor ersetzt werden. Dabei vereinfacht sich das Getriebe und die ganze Antriebscharakteristik. Der Strom für den Elektromotor kann aus einer Batterie oder wahrscheinlicher aus einer Brennstoffzelle stammen.

Die verschiedenen Arten des Antriebsstranges haben unterschiedliche Verbrauchsverbesserungspotenziale (vgl. Fig. 2)



Figur 2: Vergleich der Verbrauchspotenziale von Antriebssträngen mit den Unsicherheitsbereichen im Fahrzeug (tank-to-wheel). Benzin und Diesel-Fahrzeuge sind mit Verbrennungsmotor ausgestattet. Bei der Brennstoffzelle mit Methanol ist ein Reformier erforderlich. CH2 steht für komprimierten Wasserstoff und LH2 für flüssigen Wasserstoff.

Benzin- und Dieselmotor

Durch optimierte Brennverfahren und variable Ventiltriebe sowie moderner Aufladeverfahren und Down-sizing wird es gelingen den Wirkungsgrad im Zyklusbetrieb um 25–35 % zu verbessern. Dabei werden der Ausstoß der limitierten Abgasemissionen in den Bereich der Super-Ultra-Low-Emission-Vehicle (SULEV) Grenzwerte gedrückt werden. Der Dieselmotor behält im städtischen Betriebsbereich einen Verbrauchsvorteil von ca. 15-25 % gegenüber dem Benzinmotor.

Erdgasmotor

Beim Ottomotor können mit Einsatz von Erdgas die strengsten Emissionsvorschriften (SULEV) erfüllbar werden. Zudem besteht in einem rein für Erdgasbetrieb ausgelegten Fahrzeug die Möglichkeit, die Kompression zu erhöhen und die Drosselverluste zu reduzieren, so dass die Energieeffizienz um 5 bis 10 % gegenüber dem saugrohreingespritzten Benzinmotor verbessert werden kann. Zudem können die treibhausgas-verursachenden Emissionen um rund 30% gegenüber dem vergleichbaren Benzinmotor reduziert werden.

Hybridantrieb

Ein Hybridantrieb besteht aus der Kombination eines Elektromotors mit einem Verbrennungsmotor. Dabei können die Vorteile der beiden Motoren genutzt werden, um die

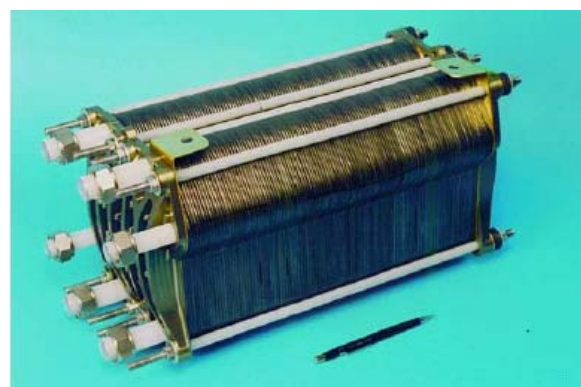
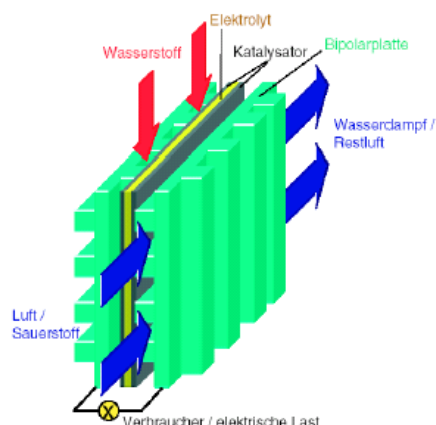
Nachteile des anderen Aggregates zu vermeiden. Bei heutigen Konzepten steht die spezifische Eigenschaft der rein elektrischen Fahrweise nicht mehr im Zentrum. Vielmehr hat der Gesamtwirkungsgrad des Antriebes an Bedeutung gewonnen. Mit dem Elektromotor wird gefahren, falls die benötigte Energie dadurch kleiner wird als beim Betrieb mit dem Verbrennungsmotor. Die elektrische Nennleistung bei diesen „Mild-Hybrid“-Konzepten ist meist deutlich kleiner als die Spitzenleistung des Verbrennungsmotors (meist <25%).

Die Hauptvorteile liegen bei einem möglichen Start-Stop-Betrieb, der kurzfristigen Unterstützung des Verbrennungsmotors bei dynamischen Betriebsphasen (Beschleunigung) sowie der Nutzung der Bremsenergie und einer effizienteren Bereitstellung der elektrischen Bordnetzleistung. Weiter kann die Elektromaschine eingesetzt werden, um Schwingungsdämpfung zu betreiben. Die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebes wird maßgeblich durch die Art und Kapazität der Batterie bestimmt. Diese wird autark, d.h. ohne Netzverbindung aufgeladen. Vielfach wird mit einer Bleibatterie gerechnet, die allenfalls mit Supercaps kombiniert für höhere Kurzzeitleistungen erweitert wird. Durch die Integration der Elektromaschine in den Antrieb kann der Verbrauch nochmals um ca. 5-15% gegenüber dem konventionellen Antrieb (Motor mit Getriebe) reduziert werden. Die Hybridantriebe können aber kaum kostenneutral realisiert werden.

Brennstoffzelle

Beim Brennstoffzellenantrieb liefert die Brennstoffzelle die Elektrizität, die über einen Elektromotor das Fahrzeug antreibt. Die Charakteristik ist den Fahrzeugbedürfnissen besser angepasst, als beim Verbrennungsmotor. Die meisten Vorteile des Hybridantriebes können übernommen werden. Zusätzlich wird die elektrische Energie mit einem sehr guten Wirkungsgrad erzielt, so dass der Wirkungsgrad gegenüber dem Verbrennungsmotor im Stadtbetrieb deutlich gesteigert werden kann. Das Fahrgefühl wird unterstützt durch das geringe Lärmniveau, das hervorragende Anfahrmoment und den breiten Drehzahlbereich.

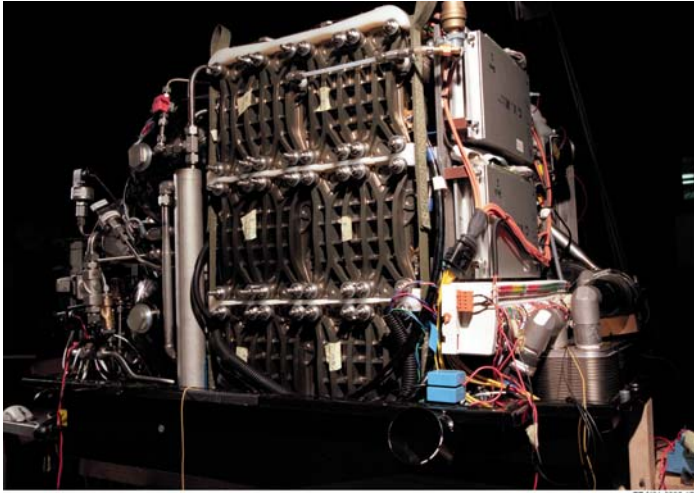
Mit dem Einsatz einer Brennstoffzelle wird die Energie nicht mehr über Wärme in mechanische Leistung umgesetzt, sondern es wird direkt über einen elektrochemischen Prozess Strom erzeugt. In der automobilen Anwendung steht die Niedertemperaturbrennstoffzelle – die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEBZ) im Vordergrund. Sie setzt Wasserstoff mit Luftsauerstoff in Wasser um und erzeugt Elektrizität (Fig. 3).



Figur 3: Schema einer Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle (links) und ein Stapel mit 6 kW elektr. Leistung, der am Paul Scherrer Institut und ETHZ entwickelt worden ist (rechts).

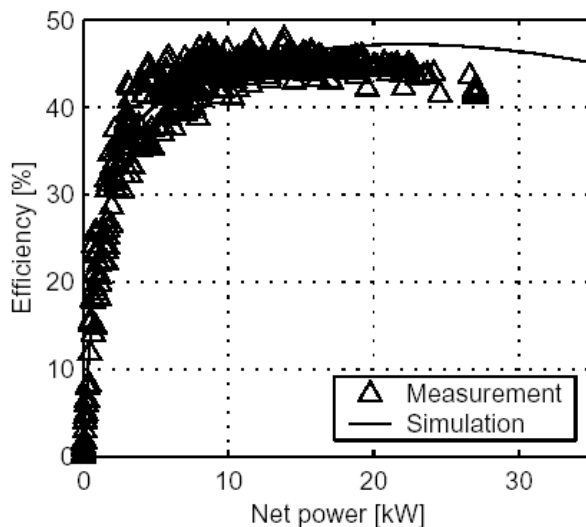
Das Herzstück stellt die proton-leitende Membran (Elektrolyt) dar, die für die Elektronen nichtleitend ist, die somit über einen externen Pfad auf die Gegenseite der Membran ge-

führt werden müssen und dabei als Strom genutzt werden können. Zur Erreichung einer technisch sinnvoll nutzbaren Spannung werden viele Zellen in Serie geschaltet. Spannungen von einigen 100 V sind keine Seltenheit (Fig 3 zeigt ein Stapel mit 100 Zellen). Diese Stapel sind passive Komponenten, die keine bewegten Teile aufweisen. Alle Medien (Wasserstoff als Treibstoff, Luft als Oxidationsmittel und Kühlwasser) werden aktiv zugeführt. Die dazu notwendigen Hilfsaggregate verbrauchen einen Teil der erzeugten Elektrizität. Somit wird der Umsetzungswirkungsgrad des Brennstoffzellensystems reduziert (vgl. Fig. 4).



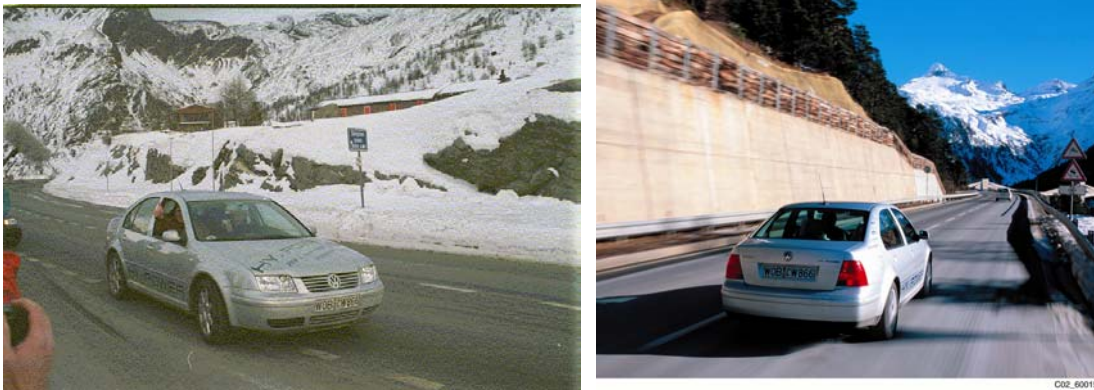
Figur 4: Brennstoffzellensystem mit allen Hilfssystemen und 2 Wasserstofftanks. Das Gesamtsystem ist ausgelegt für 48 kW elektrischer Bruttoleistung. Dieses System wurde in einem Versuchsfahrzeug (Volkswagen Bora „HY.POWER“) erprobt.

In einem weiten Bereich kann allerdings das Brennstoffzellensystem mit einem Wirkungsgrad oberhalb von 40% betrieben werden. Zusammen mit dem Elektromotor kann ein Wirkungsgrad im durchschnittlichen Verkehr von rund 35% erzielt werden (vgl. Fig 5). Dies stellt eine Halbierung des Verbrauchs eines Brennstoffzellenfahrzeugs gegenüber dem saugrohr-eingespritzten Benzinfahrzeug im Stadtverkehr dar.



Figur 5: Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems ausgehend vom unteren Heizwert des Wasserstoffs zur abgegebenen elektrischen Nettoleistung

Das Fahrzeug kann wie jedes andere Fahrzeug betrieben werden. Strassentests haben diesen Nachweis erbracht. Mit dem Versuchsfahrzeug wurde unter extremen Bedingungen auch den Simplonpass überquert (vgl. Fig. 6).



Figur 6: Versuchsfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb auf der Fahrt über den Simplonpass. Das Fahrzeug emittiert nur Wasserdampf als Abgas.

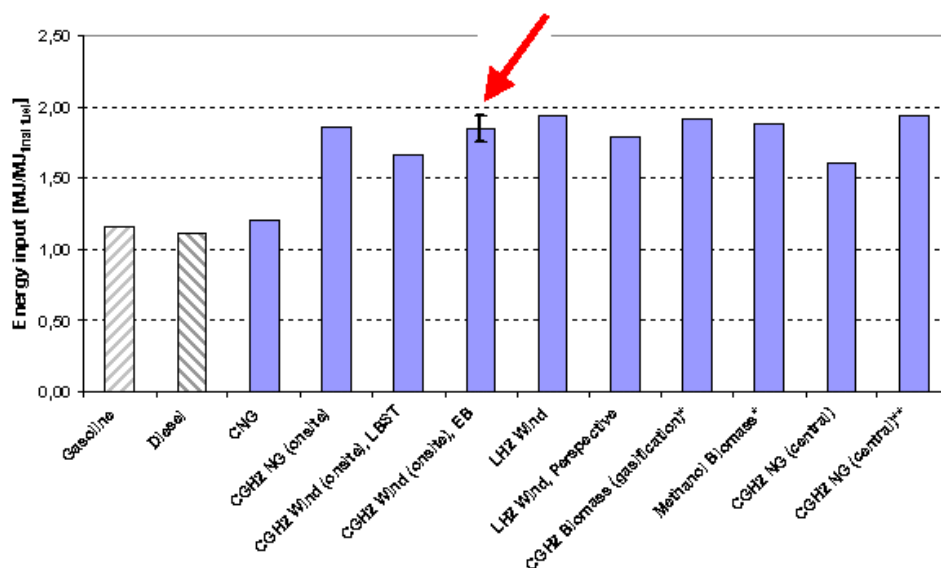
Treibstoffherzeugung

Werden verschiedene Antriebsstränge und Treibstoffe miteinander verglichen stellt sich die Frage der Vergleichskriterien. Bei unserer Fragestellung der Nachhaltigkeit sind dies:

- die Energieeffizienz,
- die Möglichkeit erneuerbare Ressourcen einzusetzen, (Substitution von fossilen Trägern)
- Vermeidung von treibhausgas- relevanten Emissionen

In dieser Gesamtbilanz (well-to-wheel) haben sowohl die Treibstoffherstellung sowie die Verwendung im Fahrzeug einen erheblichen Anteil.

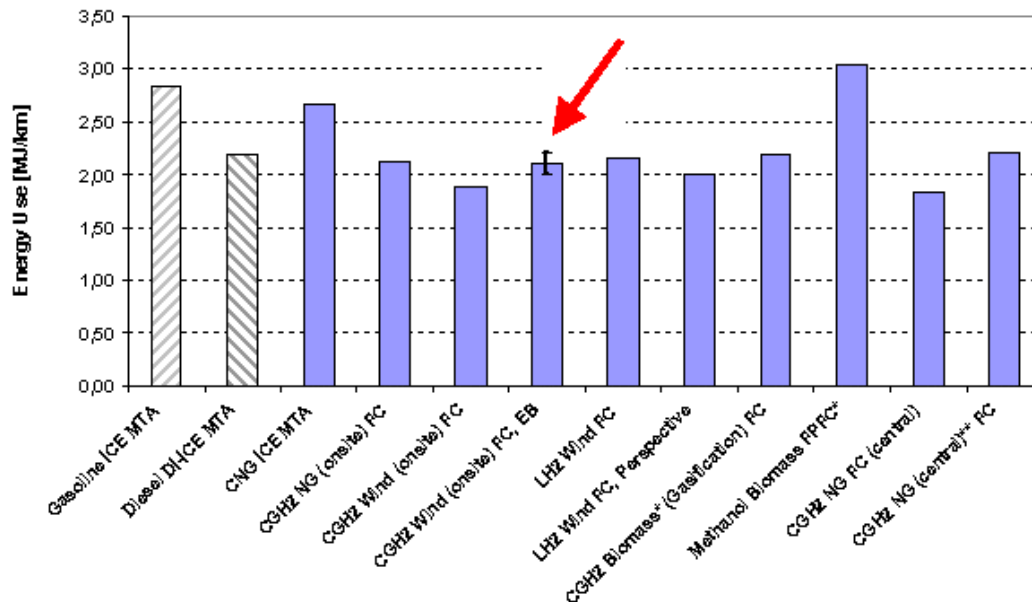
In Fig. 7 wird der Aufwand zur Erzeugung einer Energieeinheit im Tank aufgezeigt. Dabei liegen die fossilen Treibstoffe Benzin, Diesel und Erdgas in einem Band von 10 – 20% des unteren Heizwertes der Treibstoffe. Bei den Treibstoffen Wasserstoff oder Methanol liegt der Aufwand jeweils mit 55-90% des gespeicherten Heizwertes deutlich höher. Anders formuliert, der Wasserstoff kann mit einem Wirkungsgrad von 52 – 65% erzeugt werden.



Figur 7: Well-to-tank Energieaufwand. Energiekette zur Erzeugung von Treibstoffen.

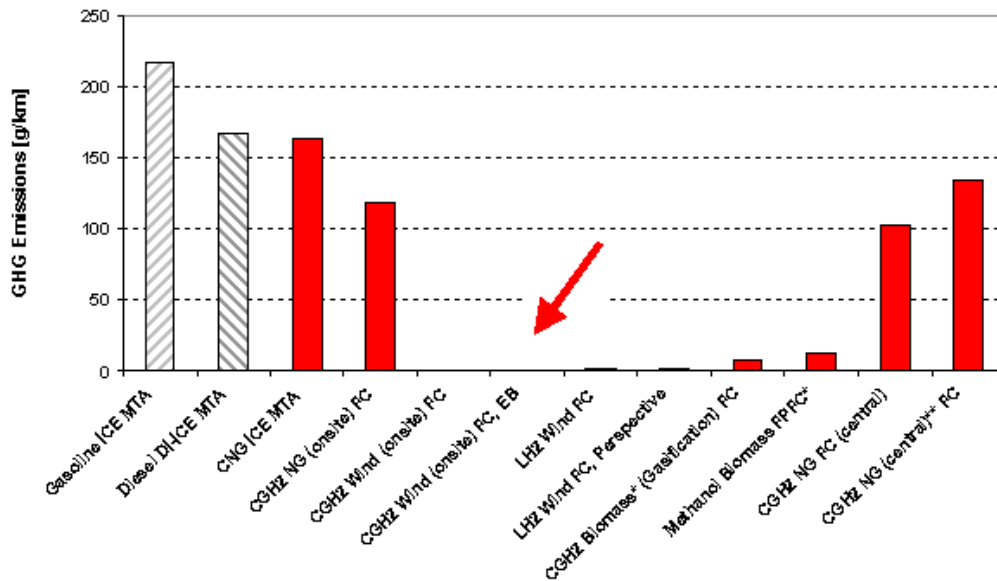
* Biomasse aus Abfallholz, **CGH₂ Transport mit Lastwagen (Distanz: 500 km) nach [1]

Bei der energetischen Betrachtung der gesamten Kette aus Treibstoffherstellung und Fahrzeugbetrieb wird ersichtlich, dass mit der Brennstoffzelle, je nach Herstellungsverfahren des Treibstoffes ein mehr oder weniger kleiner energetischer Vorteil erzielt werden kann (vgl. Fig. 8).



Figur 8: Well-to-wheel Energieaufwand. Energiekette zur Erzeugung verschiedener Treibstoffe, deren Verteilung und Umsetzung im Fahrzeug. * Biomasse aus Abfallholz, **CGH₂ Transport mit Lastwagen (Distanz: 500 km) nach [1].

Betrachtet man neben dem Energieaufwand auch die Emission von treibhausgas-relevanten Emissionen, so ist zum einen der Vorteil von Erdgas gegenüber Benzin sichtbar (vgl. Fig. 9). Zudem ist der Anteil der Treibstoffherstellung bei der Brennstoffzelle sichtbar, sofern Erdgas als Primärenergie verwendet wird. Werden erneuerbare Energien verwendet, resultieren minimale Treibhausgasemissionen. Je nach Aufwand für die Verteilung des Wasserstoffs, der aus Erdgas erzeugt wird, ist eine zentrale Erzeugung oder eine Erzeugung an Ort der Tankstelle sinnvoller.



Figur 9: Well-to-wheel Treibhausgasemissionen. Energiekette zur Erzeugung verschiedener Treibstoffe, deren Verteilung und Umsetzung im Fahrzeug. * Biomasse aus Abfallholz, **CGH₂ Transport mit Lastwagen (Distanz: 500 km) nach [1].

Schlussfolgerung

Neben der Beurteilung des Verbrauchsvorteils im Fahrzeug (Tank zum Rad) muss auch der Energieaufwand zur Erzeugung des Treibstoffes berücksichtigt werden. Dabei stellt der Wasserstoff einen Energieträger dar, er ist aber keine Primärenergiequelle. Wird der Wasserstoff aus fossilen Energiequellen hergestellt (meist Erdgas), bleibt der Brennstoffzellenantrieb immer noch die energetisch sinnvollste Lösung, wobei der Vorsprung gegenüber einem Hybridkonzept mit Verbrennungsmotor auf wenige Prozentpunkte schmilzt. Bei der Verwendung von Strom aus dem europäischen Strommix, mit seinem erheblichen Kohlestromanteil, muss sogar mehr Energie aufgewendet werden wie bei einem Benzinmotor.

Neben der rein energetischen Betrachtung ist bei der Wahl des Treibstoffes mit zu berücksichtigen, wieviel Treibhausgasemissionen erzeugt werden und wie letztendlich die Abhängigkeit von begrenzten Ressourcen in Kauf genommen wird. Letztendlich ist es eine gesellschaftlich-politische Entscheidung, ob wir diese Herausforderung annehmen wollen.

Literatur

[1] W. Weindorf, U. Bünger, J. Schindler: Comment to paper "The Future of the Hydrogen economy; Bright or Bleak?", LBST Systemtechnik, Ottobrunn Juli 2003