



Doctoral Thesis

Conditions for market penetration of hydrogen fuel cell cars in the transportation sector

Author(s):

Krzyzanowski, Daniel A.

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005273701> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16692

Conditions for market penetration of hydrogen fuel cell cars in the transportation sector

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
For the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
Daniel A. Krzyzanowski
Master of Science (Delft University of Technology, the Netherlands)
born 01.03.1974
citizen of Poland

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Alexander Wokaun, examiner
Prof. Dr. Konrad Hungerbühler, co-examiner
Socrates Kypreos, co-examiner

Zürich, June 2006

Abstract

The transportation sector, similarly to other large-scale systems like heat or electricity networks, carries numerous benefits and burdens. In the case of the transportation sector the benefits comprise of the support of the economical development as well as mobility for citizens. Nevertheless it also carries heavy environmental and climate burdens (local pollutants and CO₂), and dependency on oil, which often has unstable prices and lacks security of supply. In the light of the mentioned disadvantages, it is claimed by many that by mid century we could be considering alternatives.

In this study an assessment of the potential conditions which would need to be fulfilled in order for hydrogen to substitute the conventional oil-based transportation system, has been presented.

The research has been carried out using three different optimization models, which focused on different time frames (2000-2050/2100), world regions (from single to global scale) and sub-sectors of the transportation sector (from passenger vehicles, buses to road freight and other aggregated modes). All of the models employed were equipped with state of the art Endogenous Technological Learning, which allows for cost reduction of selected technologies, as function of increasing cumulative capacity. The primary execution of the analysis employed extensive sensitivity analysis of various factors which could have potential impacts on market penetration of hydrogen fuelled fuel cell vehicles. The tested factors included: fuel cell prices, their respective learning rates (as element of the introduced endogenous technological learning), initial number of vehicles launched to the market, trends in oil prices, dynamics of hydrogen infrastructure build-up, internalisation of external costs of local pollutants (NO_x, SO_x) and global greenhouse gases (CO₂) as well as government supportive policies for fuel cell vehicles (cash-back promotions, preferential crediting options and "demonstration vehicle" projects).

The results of the study suggest that the two most crucial elements are the price of fuel cells (price ought to be in the range of 600 US\$/kW by the time the fuel cells are ready from market deployment) and their potential to further reduce costs as function of growing market popularity (learning rate of 15% or more). Further, the results of the study suggest that the development of the infrastructure may be of

lesser importance in the early years of the switch to hydrogen based mobility. However, this importance should not be omitted in long term planning. The results further suggest that in the case when the fuel cells are on a break-even point, the governments may have numerous policy measures as to initiate the switch. Such policy measures may include internalisation of externalities (negative impacts of pollution coming from the transportation sector), demonstration and deployment tactics as well as direct subsidies to fuel cells in form of cash-back promotions for the purchase of fuel cell vehicles as well as preferential credits for projects which contribute to the build-up of the hydrogen infrastructure.

Results of the study suggest that short term policy instruments, which could aid the transition to hydrogen based transportation sector, ought to be targeted at the fuel cell vehicles themselves (especially the fuel cells stack) as their cost is the most significant obstacle. Moreover, promoting the fuel cell vehicles may be a very promising policy tool. This may increase the popularity of fuel cell vehicles, triggering the demand for this type of cars. Furthermore, promotion of hydrogen fuel cell vehicles could contribute to the number of vehicles in service, which in turn would contribute to the cost reduction of fuel cells (expressed in the modelling framework as Endogenous Technological Learning). Further, the results suggest that long run policy instruments target the build-up of fully fledged hydrogen infrastructure, which could prove to be a bottle neck for the development of hydrogen based transportation in a long timeframe. Moreover, long term policy options could target penalisation of emissions (such as CO₂, NO_x and SO_x) which originate from technologies generating fuels as well as vehicles themselves. Such policy option could impose more pressure and cause a more dynamic shift to hydrogen option.

The study, apart from bringing results suggesting condition for possible market penetration of hydrogen fuel cell vehicles, contributed also to the extension of the modelling framework of the GMM (Global Markal Model) in terms of more explicit representation of the global transportation sector. GMM is widely used by numerous research and governmental institutions, which can benefit from the expansion. The expansion makes GMM a more robust tool for designing and evaluation of environmental policies.

Kurzfassung

Der Verkehrssektor bietet der Gesellschaft verschiedene Formen von Nutzen, bringt aber auch, ähnlich wie bei anderen grossräumigen Systemen wie dem Wärme- oder Elektrizitätssektor, verschiedene Belastungen mit sich. Im Falle des Verkehrssektors liegt der gesellschaftliche Nutzen insbesondere in der Unterstützung von wirtschaftlicher Entwicklung sowie in der Mobilität der Bürger. Die einhergehende Umwelt- und Klimabelastung durch CO₂ und lokale Luftschadstoffe sowie die Abhängigkeit von Öl, welches Preisschwankungen unterliegt und Probleme der Versorgungssicherheit aufwirft, sind jedoch zwangsläufige unerwünschte Belastungen. Angesichts dieser Nachteile könnte die Suche nach Alternativen zur Mitte dieses Jahrhunderts nötig sein.

In dieser Arbeit wird eine Einschätzung der nötigen Bedingungen vorgenommen, unter denen Wasserstoff das konventionelle ölabhängige Transportsystem ersetzen könnte.

Die Untersuchung wurde mittels dreier verschiedener Optimierungsmodelle vorgenommen, die verschiedene zeitliche Rahmen (2000-2050/2100), Weltregionen (Einzelregionen bis ganze Welt) und Unter-Bereiche des Verkehrssektors (von Individualverkehr und Bussen bis Güterverkehr und sonstigen Möglichkeiten) beleuchten. Alle Modelle verwendeten Endogenes Technisches Lernen (ETL) nach Stand der Technik, das Reduktion der Kosten einzelner Technologien in Abhängigkeit steigender kumulierter Kapazität gestattet.

In der Hauptsache wurde eine ausführliche Analyse der Sensitivität verschiedener Faktoren vorgenommen, die Einfluss auf die Marktdurchdringung von Wasserstofffahrzeugen haben könnten. Dabei wurden nachfolgende Faktoren untersucht: Kosten von Brennstoffzellen, ihre jeweilige Möglichkeit technologischen Lernens (als Teil der Verwendung endogenen technologischen Lernens), Anzahl der Fahrzeuge bei Markteinführung, Ölpreistrends, Dynamik des Aufbaus einer Infrastruktur für Wasserstoff, Internalisierung externer Kosten lokaler Luftschadstoffe (NO_x, SO_x) und globaler Klimagase (CO₂) sowie politische Rahmenbedingungen zur Unterstützung von Brennstoffzellenfahrzeugen (cash-back Unterstützung, Vorzugskredite und „Demonstrationsfahrzeug“-Projekte).

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass die zwei wesentlichen Einflussfaktoren der Preis der Brennstoffzelle (der Preis sollte bei Markteinführung im Bereich von US\$ 600/kW liegen) und ihr Potenzial zu weiterer Kostenreduktion bei steigendem Marktanteil sind (Lernrate von 15% oder mehr). Desweiteren legen die Ergebnisse dieser Arbeit nahe, dass die Entwicklung der Wasserstoff-Infrastruktur in den ersten Jahren einer Wasserstoff-basierten Mobilität von untergeordneter Bedeutung ist. Nichtsdestotrotz sollte die Wichtigkeit der Infrastruktur bei vorausschauender Langzeitplanung nicht unterschätzt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen weiterhin, dass zum Zeitpunkt des Erreichens der Rentabilitätsgrenze von Brennstoffzellenfahrzeugen regierungsseitig verschiedenste Policy-Instrumente zur Unterstützung des Umstiegs zur Verfügung stehen. Diese Instrumente umfassen die Internalisierung externer Kosten (nachteilige Auswirkungen der Verschmutzung durch den Verkehrssektor), Strategien der Demonstration und Entwicklung sowie direkte Subventionen von Brennstoffzellen durch cash-back Unterstützung beim Kauf eines Brennstoffzellenfahrzeugs oder Vorzugskredite für Projekte die zum Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur beitragen.

Ferner legt diese Arbeit nahe, dass kurzfristig wirksame Policy-Instrumente, die den Übergang zu einem wasserstoffbasierten Transport-Sektor unterstützen sollen, sich die Brennstoffzellenfahrzeuge selbst (und hier speziell die Brennstoffzellen) zum Ziel setzen sollten, da deren Kosten das hauptsächliche Hindernis darstellen. Auch die Verkaufsförderung von Brennstoffzellenfahrzeugen könnte ein vielversprechendes Policy-Werkzeug sein. Dies könnte die Popularität dieser Fahrzeuge steigern und damit die Nachfrage ankurbeln. Zudem würden verkaufsfördernde Massnahmen die Anzahl der Fahrzeugen auf dem Markt erhöhen, und damit zur Reduktion der Kosten für Brennstoffzellen beitragen (im Modell ausgedrückt mittels endogenen technologischen Lernens).

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass langfristig wirksame Policy-Instrumente den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zum Ziel haben, da es sonst zu Engpässen in der Entwicklung eines wasserstoffbasierten Transportsektors kommen könnte. Langfristig wirksame Policy-Optionen könnten beispielsweise Emissionen (wie CO₂, NO_x und SO_x) sowohl aus der Herstellung von Treibstoffen als

auch aus ihrer Verwendung zum Ziel haben. Eine solche Policy Option könnte den Druck und damit die Dynamik einer Umstellung auf Wasserstoff erhöhen.

Die vorliegende Studie hat neben den Analysen zu Rahmenbedingungen für die Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen auch zur Erweiterung des Modells GMM (Global Market Model) beigetragen, indem der globale Transportsektor detailliert erweitert wurde. GMM wird von zahlreichen Forschungs- und Regierungsorganisationen genutzt, sie von dieser Erweiterung profitieren können. Die Erweiterung des Transportsektors macht GMM zu einem robusteren Werkzeug für das Design und die Bewertung von Umweltpolitischen Massnahmen.