



Doctoral Thesis

Erdgasfahrzeuge und ihr Beitrag zu einer CO₂-Reduktion im motorisierten Personenverkehr der Schweiz

Author(s):

Carle, Gian

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005244135> →

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](#).

ERDGASFAHRZEUGE UND IHR BEITRAG ZU EINER
CO₂-REDUKTION IM MOTORISIERTEN
PERSONENVERKEHR DER SCHWEIZ

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR der Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

GIAN CARLE

Dipl. Natw. ETH, Exec. MBA

geboren am 31.8.1971

von

Basel Stadt

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Alexander Wokaun (ETH Zürich und Paul Scherrer Institut), Referent

Prof. Dr. Kay W. Axhausen (ETH Zürich), Korreferent

2006

Dissertation

Erdgasfahrzeuge und ihr Beitrag zu einer CO₂-Reduktion im motorisierten Personenverkehr der Schweiz

Gian Carle
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Telefon: 044 633 30 99
Telefax: 044 633 10 57
E-Mail-Adresse: gian.carle@alumni.ethz.ch

Kurzfassung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „Role of innovative technology for promoting sustainable mobility“ der „Alliance for Global Sustainability“ (AGS), zu der sich die ETH Zürich, das Massachusetts Institute of Technology (MIT), die University of Tokyo und die Chalmers University of Technology (Schweden) zusammengeschlossen haben. Dieses Projekt analysiert den zukünftigen Aufbau einer innovativen Fahrzeugflotte und deren Beitrag zu einer nachhaltigen Mobilität. Die vorliegende Arbeit als Bestandteil des genannten Projektes soll Aufschluss über die Chancen und Risiken einer Marktpenetration von Erdgasfahrzeugen geben. Sie zeigt, wie und unter welchen Bedingungen Erdgasfahrzeuge in den Massenmarkt diffundieren. Ausserdem werden finanzielle Aufwendungen für Fahrzeuge und Infrastruktur, die für eine Marktpenetration nötig sind, ermittelt. Ziel ist es, zu zeigen, mit welchen finanziellen Aufwendungen und welchen geographischen Kombinationen von Erdgas-Tankstellen wie viel CO₂ in der Schweiz eingespart werden kann.

Im ersten Teil der Arbeit (1. Kapitel) wird auf die politischen Rahmenbedingungen eingegangen, die die Diffusion von Erdgasfahrzeugen beeinflussen. Im zweiten Teil (2. Kapitel) wird kurz der technologische Entwicklungsstand der Erdgasfahrzeuge und ihrer Substitutionsprodukte skizziert. Es wird ebenfalls auf die benötigten Treibstoffe Bio- und Erdgas sowie auf die Erdgasinfrastruktur eingegangen.

Das 3. Kapitel analysiert mit Hilfe der Wettbewerbsanalyse von Porter die Marktdurchdringung der Bio- und Erdgasfahrzeuge als Substitutionsprodukt im Bereich der Fahrzeugantriebssysteme. Der Schweizerische Erdgasfahrzeugmarkt befindet sich in einem sehr frühen Stadium der Wachstumsphase, im Gegensatz beispielsweise zu Italien. Gasfahrzeuge, die mit komprimiertem Bio- oder Erdgas fahren, müssen sich in der Schweiz in den nächsten Jahren gegen einen sehr starken Wettbewerbsdruck behaupten, da mehrere Hersteller einem kleinen Abnehmermarkt gegenüber stehen. Zudem sind die Eintrittsbarrieren für neue Konkurrenten nicht sehr hoch, was den Wettbewerb zusätzlich verstärken wird. Denn im Vergleich zum Brennstoffzellenmotor sind für die Herstellung eines Erdgasmotors weder sehr

spezielles Know-how noch besonders viel Kapital notwendig. Eine wichtige Schlüsseldeterminante für den Marktdurchbruch der Erdgasfahrzeuge ist die Marktgrösse: Wird in den nächsten Jahren der Anteil der Erdgasfahrzeuge weltweit stark zunehmen, werden vermehrt Automobilhersteller neue Erdgasfahrzeuge anbieten, was einen weiteren Marktdiffusionsschub auslösen wird. Eine starke Konkurrenz kommt von den möglichen Substitutionsprodukten. Obwohl Erdgasfahrzeuge weniger Emissionen ausstossen, werden weiterentwickelte Benzin- und Dieselmotoren und Hybridfahrzeuge bessere Wettbewerbschancen haben, da diese über eine funktionierende und genügend dichte Infrastruktur verfügen, welche für Erd- und Biogas in der Schweiz noch nicht existiert.

Im vierten Teil (4. Kapitel) wird aufgrund von Ländervergleichen (Ägypten, Argentinien, Deutschland, Frankreich, Indien, Japan und Venezuela) auf der makroökonomischen Ebene für die Schweiz gezeigt, wie hoch der Marktanteil von Erdgasfahrzeugen in Zukunft liegen könnte. Der Ländervergleich ist neben den Berechnungen mit dem MNL-Modell in Teil sechs einer der wenigen verfügbaren Anhaltspunkte, um Angaben über eine mögliche Marktpenetration in der Schweiz zu erhalten. Aufgrund dieser Berechnungen kann das von der Schweizerischen Gasindustrie formulierte Ziel von 30'000 Fahrzeugen im Jahr 2010 als sehr ambitiös bezeichnet werden. Denn aufgrund der Ländervergleiche ergeben sich für die Schweiz rund 11'900 bis 23'600 Erdgasfahrzeuge für das Jahr 2010.

Im fünften Teil (5. Kapitel) wird untersucht, welches Potential Firmen-Fahrzeuge bei der Marktdurchdringung von Erdgasfahrzeugen und der resultierenden CO₂-Ersparnis haben könnten. Firmenfahrzeuge sind ein wichtiges Marktsegment, da sie einen relativ hohen Anteil an der gesamten Personenfahrzeugflotte der Schweiz haben, rund 1.5 mal mehr pro Kilometer und Jahr zurücklegen, 12 bis 13 Prozent mehr Treibstoff als der Schweizer Durchschnitt verbrauchen und bisher noch kaum alternative Antriebssysteme vorhanden sind. Würden in den Firmenflotten – basierend auf den 409'000 Fahrzeugen – heute alle Modelle ersetzt, die auch als Erdgasfahrzeuge angeboten werden, so könnte die CO₂-Ziellücke um 2.4 Prozent reduziert werden (pro Jahr 45'500 Tonnen CO₂). Das CO₂-Reduktionspotential wird aber durch die zurzeit geringe Zahl an erhältlichen leistungsstarken Erdgasfahrzeugen geschmälert.

Im 7. Kapitel, Teil sechs der Arbeit, wird auf der mikroökonomischen Ebene mittels dem Multinomialen Logit-Modell (MNL) die Marktpenetration der Erdgasfahrzeuge analysiert sowie die optimale geographische Lage der Erdgas-Tankstellen bestimmt.

Die Marktpenetration der Erdgasfahrzeuge wurde für die Jahre 2010, 2020 und 2030 geschätzt. Von den 69 getesteten unabhängigen Variablen kristallisierten sich bei der Modell-Kalibrierung mit den Daten für das Jahr 2004 folgende fünf Variablen heraus, mit denen das MNL-Modell den Ist-Zustand (Anzahl und Verteilung der Erdgasfahrzeuge im Jahr 2004) am besten beschreibt: die Anzahl der Erdgas-Tankstellen, die Distanz vom Gemeindezentrum zur nächsten Erdgas-Tankstelle, das durchschnittlich zu versteuernde Einkommen in einer Gemeinde, die Anzahl der Landwirtschaftsbetriebe einer Gemeinde und die mittlere Differenz der Lebenszykluskosten zwischen Benzin- und Erdgasfahrzeugen in einer Gemeinde.

Für die Prognosen der zukünftigen Anzahl an Erdgas-Tankstellen in der Schweiz wurden zwei verschiedene Szenarien herangezogen: zum einen war dies die Schätzung der Erdgasindustrie und zum anderen die Angaben aus der historischen Dieseltankstellendiffusion. Um die Distanz von jedem Gemeindezentrum zur nächsten Erdgas-Tankstelle berechnen zu können, musste ausserdem die geographische Verteilung der zukünftigen Tankstellen bestimmt werden. Das wurde in sechs verschiedene Modell-Varianten durchgeführt. Jede dieser Modell-Varianten

platziert die Tankstellen aufgrund unterschiedlicher Kriterien, beispielsweise an den am stärksten befahrenen Strassen oder an Orten mit minimaler Distanz zur nächsten Erdgasleitung. Bei jeder dieser Modell-Varianten werden nie Erdgas-Tankstellen neu gebaut, sondern immer eine Erdgaszapfsäule in eine bestehende Benzintankstelle integriert. Des Weiteren wurde das MNL-Modell um die Variable Erdgasmodellverfügbarkeit ergänzt. Diese Variable sagt aus, wie viele Personenfahrzeugmodelle auch als Erdgasvariante erhältlich sind.

Von den somit sechs unabhängigen Variablen, die in das MNL-Modell eingingen, hat die Variable Distanz vom Gemeindezentrum zur nächsten Erdgas-Tankstelle den grössten Einfluss auf die berechnete Anzahl der Erdgasfahrzeuge. Dies bedeutet, dass versucht werden muss, die Erdgas-Tankstellen so zu platzieren, dass die Fahrzeughalter einen möglichst kurzen Anfahrtsweg zur nächsten Erdgas-Tankstelle haben. Den zweitgrössten Einfluss im MNL-Modell hat die Variable „Differenz der Lebenszykluskosten zwischen Benzin- und Erdgasfahrzeugen“, das heisst die Anzahl der Erdgasfahrzeuge steigt relativ stark mit der Senkung der Kosten für Erdgasfahrzeuge und für Erdgas.

Anschliessend an die Modellkalibrierung konnte mit diesem MNL-Modell und den erwähnten unabhängigen Variablen die Anzahl Erdgasfahrzeuge für die Jahre 2010, 2020 und 2030 berechnet werden. Die Berechnungen zeigen, dass der realistische Bestand an Erdgasfahrzeugen im Jahr 2010 zwischen 3'500 und 8'500 Fahrzeugen liegen wird. Für das Jahr 2020 wurde ein Bestand von 50'000 bis 100'000 Erdgasfahrzeugen berechnet. 200'000 bis 300'000 Erdgasfahrzeuge wurden für das Jahr 2030 berechnet. Die grosse Spanne in der berechneten Anzahl der Erdgasfahrzeuge kommt zustande durch die verschiedenen Modell-Varianten, die jeweils von einer unterschiedlichen Anzahl Erdgas-Tankstellen, einer unterschiedlichen geographischen Verteilung der Tankstellen sowie einer unterschiedlichen Verfügbarkeit von Erdgasfahrzeug-Modellen ausgehen. Die Anzahl der Erdgasfahrzeuge ist umso grösser, je mehr Erdgas-Tankstellen zur Verfügung stehen und je mehr Erdgasfahrzeugmodelle erhältlich sind. Bei der geographischen Verteilung der Tankstellen wirkt sich die Konzentration in den Ballungszentren positiv auf die Anzahl Fahrzeuge aus.

Um zu zeigen, welche Szenarien der Marktdurchdringung von Erdgasfahrzeugen aus volkswirtschaftlicher Sicht am sinnvollsten sind, wurde für alle Modell-Varianten des MNL-Modells eine volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Sie berücksichtigt die Infrastrukturkosten bei der Erweiterung einer Benzin- zur Erdgas-Tankstelle, die Tankstellenrentabilität, die monetarisierte CO₂-Einsparung beim Umstieg von Benzin- auf Erdgasfahrzeuge, sowie die Einsparung bei den Lebenszykluskosten. Die volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse zeigt, dass Investitionen zur Förderung der Erdgasfahrzeuge sich nur lohnen, wenn möglichst viele Erdgas-Tankstellen in Städten und Ballungszentren gebaut werden. Konkret lohnen sich die Investitionen ab 470 Erdgasfahrzeuge pro Erdgas-Tankstelle.

Ausserdem wurde für jede Modell-Variante berechnet, wie viel CO₂-Ersparnis sie bringt. Die Ergebnisse aus der volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse und die CO₂-Ersparnis der Modell-Varianten ermöglichten den Vergleich mit dem Kauf von CO₂-Zertifikaten. Diese Gegenüberstellung der Kosten zeigte folgendes Resultat: Für den Fall, dass in den Jahren 2010, 2020 oder 2030 mehr als 100'000 Erdgasfahrzeuge in der Schweiz fahren werden und mehr als 470 Erdgasfahrzeuge pro Erdgas-Tankstelle existieren, was sehr unwahrscheinlich ist, kommen die CO₂-Zertifikate teurer zu stehen. Bei einem Bestand unter 100'000 Erdgasfahrzeugen wird es wesentlich günstiger sein, CO₂-Zertifikate zu erwerben.

Abschliessend wurde ermittelt, ob die CO₂-Ersparnis in den verschiedenen Modellvarianten ausreicht, um die CO₂-Ziellücke für das Jahr 2010, gemäss Kyoto-Protokoll zu schliessen. Dabei zeigt sich, dass es mit keinem der Szenarien möglich sein wird, die CO₂-Ziellücke für das Jahr 2010 vollständig zu schliessen. Nur mit einem sofortigen Ersatz aller Personenfahrzeuge durch Erdgasfahrzeuge wäre es möglich die CO₂-Ziellücke für das Jahr 2010 zu schliessen, was jedoch nicht durchsetzbar ist. Alle anderen Szenarien dieser Arbeit können die CO₂-Ziellücke maximal zu sieben Prozent schliessen. Die meisten Szenarien erreichen nicht mal ein Prozent. Nur mit zusätzlichen Hybridfahrzeugen, geringeren durchschnittlichen Fahrleistungen, energieeffizienteren Personenfahrzeugen und mit einer griffigen CO₂-Steuer wird es möglich sein, die gesetzlichen CO₂-Ziele für das Jahr 2010 zu erreichen.

Schlagworte

Erdgasfahrzeuge, Biogasfahrzeuge, Konkurrenzanalyse, Wettbewerbsanalyse, MNL, Multinominales Logit-Modell, Biogas, Erdgas, Naturgas, Infrastruktur, simulated annealing

Zitierungsvervorschlag

Carle, G. (2006) Erdgasfahrzeuge und ihr Beitrag zu einer CO₂-Reduktion im motorisierten Personenverkehr in der Schweiz, Dissertation, IVT, ETH Zürich, Zürich

Dissertation

Compressed natural gas cars and their contribution to reduce CO₂ within the motorized passenger traffic in Switzerland

Gian Carle
Institute for Transport Planning and Systems
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zurich

Telephone: +41 44 633 30 99
Telefax: +41 44 633 10 57
e-mail-address: gian.carle@alumni.ethz.ch

Abstract

This dissertation presents the results of research completed as part of the Alliance for Global Sustainability (AGS) project “Role of Innovative Technology for Promoting Sustainable Mobility”. with the ETH Zurich, the Massachusetts Institute of Technology (MIT), the University of Tokyo und the Chalmers University of Technology (Sweden) as AGS members. The research evaluated the market for an innovative drive system vehicle fleet and the potential contribution of such a fleet to sustainable mobility. This project's main objective was to analyse the potential for market penetration by compressed natural gas (cng) vehicles and the problems that must be overcome to achieve market penetration. The research describes how and under what conditions natural gas vehicles will diffuse into the mass-market. It describes the financial investment needed, the optimal location of natural gas vehicle fuelling stations and the potential for natural gas vehicles to reduce CO₂ generation in Switzerland.

Part I. of the dissertation describes the political background conditions influencing the diffusion of the natural gas vehicles. Part II. briefly describes the technological development of natural gas vehicles and their substitutes, and the necessary fuel (compressed natural gas and bio gas).

Part III. analyses the market penetration of natural gas vehicles based on Michael Porter's competitive analysis methodology (also known as the “five forces model of competitive structure”). In contrast to some other countries the market diffusion of natural gas vehicles in Switzerland is at an early stage. Compressed natural gas vehicles, face heavy competitive pressure due to the small size of the market and competitive technologies. Specifically, there is strong competition between producers of natural gas vehicles occurring in a market of limited size. If there were a rapidly growing world-wide market for natural gas vehicles, manufacturers would offer many new models, which would boost the market. Another strong competition force is substitute goods including improved gasoline and diesel engines, as well as hybrid vehicles. These technologies will have better chances in the medium term since, among other reasons, they already have a good fuelling infrastructure (compared to a limited fuelling infrastructure for natural gas vehicles).

Part IV. of the dissertation describes the market diffusion of natural gas (cng) vehicles in Switzerland on the macro-economic level. This analysis is based on the historical market diffusion of cng vehicles in other countries (Egypt, Argentina, Germany, France, India, Japan and Venezuela). The macro-economic country comparison is one of the only estimates for the speed of cng vehicle market penetration in Switzerland other than the multi-nominal logit model diffusion estimation (described below). Results of these national comparisons indicate that approximately 11'700-23'600 cng vehicles will operate in Switzerland.

Part V. describes the influence of company vehicle fleets in encouraging the diffusion of natural gas vehicles and their effects to reduce CO₂ emissions. Company fleets are an important market segment as these vehicles are driven approximately 1,5 times further annually, they consume 12 to 13 per cent more fuel than the Swiss average and as companies own almost no vehicles with alternative traction systems. However, this potential is diminished by the small number of cng vehicle models. If all company fleets would replace their existing vehicles with cng versions, then CO₂- emissions could be reduced by 0.27 per cent (45'500 tons of CO₂ annually).

Part VI., chapter 7, describes the diffusion process for natural gas vehicles on a micro economic level using a multi-nominal Logit model (MNL). This model was used to estimate the market penetration of the natural gas vehicles for the years 2010, 2020 and 2030. Out of the 69 independent variables that were tested in the MNL-model calibration, using the information from the year 2004, the following five variables described the amount of cng vehicles and the geographical location of these vehicles the best. These variables were the number of the natural gas fuelling stations, the distance in kilometers from the centre of each of the 2909 Swiss municipalities to the nearest cng fuelling station, the average amount of federal tax paid in a municipality, the number of farms in a municipality as an indicator for the urbanization of the community and the difference in the total cost of ownership between a gasoline and a cng vehicle.

For the forecasts of the future number of natural gas stations in Switzerland two different scenarios were used: the estimations of the natural gas industry and the historical market growth of the diesel gas station diffusion.

To be able to calculate the distance of every community to the next natural gas station, the geographic distribution of the future cng vehicle fuelling stations had to be determined. This was carried out using six different model variations. Each of these model variations places the natural gas stations based on different criteria, for instance, based on the number of cars passing a fuelling station per day or based on the distance from the cng fuelling station to the nearest natural gas pipeline. In each of these model variations natural gas stations are never newly built, but always integrated in an existing petrol gas station. In addition the variable cng vehicle model availability was added to the MNL model. This variable states how many vehicle models are also available as a natural gas model.

Following identification of the appropriate set of independent variables for estimating the number of cng vehicles in Switzerland, the influence of each variable on market penetration was calculated. The variable with the highest influence (elasticity) in the MNL model was distance from the municipality centers to the nearest cng fuelling station. This result means that to increase the market penetration of cng vehicles, cng fuelling stations must be located in such a way that vehicle owners have a short journey to the next cng fuelling station. A further success factor would be to reduce the total cost of ownership difference between operating gasoline and

cng vehicles, since according to the MNL model, vehicle owners react relatively strong to lower vehicle and fuel prices.

Once the MNL model was defined, it was used to estimate the number of cng vehicles expected to be operating in Switzerland in the years 2010, 2020 and 2030. Results of this research show that about 3'500 to 8'500 cng vehicles can be expected to be in operation by 2010. The research model estimates that by 2020 between 50'000 to 100'000 cng vehicles could be on the road in Switzerland. By 2030 Switzerland could have approximately 200'000 to 300'000 natural gas vehicles in operation. The large variation in the number of cng vehicles estimated in a given year results from the difference in cng vehicle model availability, the density and geographical location of the fuelling infrastructure.

To be able to show which market penetration scenarios are the most interesting ones a cost benefit analysis was carried out for all MNL model variations. The cost benefit analysis takes into consideration the infrastructure spending to extend a petrol station to a natural gas station, the natural gas station profitability, the monetarized CO₂ savings by changing from petrol to natural gas vehicles, as well as the savings concerning the life cycle expenses. The cost benefit analysis shows that promoting natural gas vehicles only is worthwhile if a large share of natural gas stations is built in towns and their suburbs and if per natural gas fuelling station 480 natural gas vehicles exist.

In addition for every model variation the CO₂ savings were calculated. The results of the cost benefit analysis as well as the CO₂ savings allowed the comparison with the purchase-price of CO₂ certificates. It indicates a threshold for the years 2010, 2020 and 2030: if less than 470 natural gas vehicles per stations and less than 100'000 cng vehicle are operated in Switzerland than the purchasing of CO₂ certificates will be less expensive than supporting the diffusion of cng vehicles.

The research has shown that only with an immediate substitution of all vehicles by cng vehicles it will be possible to close the CO₂ gap for the year 2010, which is not realizable. No other scenarios examined in this research can reduce the CO₂ gap by more than seven per cent. Most scenarios do not even reach one per cent. Only with additional hybrid vehicles, lower average engine performance, more energy-efficient cars and a CO₂ tax will it will be possible the reach the CO₂ goals for the year 2010.

Keywords

competitive advantage, competitive analysis, competitive strategy, five forces model, ngv, compressed natural gas cars, biogas, hybrid car, automotive industry, car industry, multinominal logit model, fuelling stations, infrastructure built up, simulated annealing

Preferred citation style

Carle, G. (2006) Erdgasfahrzeuge und ihr Beitrag zu einer CO₂-Reduktion im motorisierten Personenverkehr der Schweiz, Dissertation, IVT, ETH Zurich, Zurich