

Diss. ETH No. 14291

**Integration of Life-Cycle Assessment and Energy Planning Models for
the Evaluation of Car Powertrains and Fuels**

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

presented by
Alexander Röder
Dipl.-Phys. (ETH)
born on February 19, 1971
in Würzburg (Germany)

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

Zürich 2001

Abstract

The transportation sector in general and low-duty vehicle traffic in particular are known to contribute to a lot of environmental problems, including global warming, acid rain, or emissions of ozone-forming substances, to a significant extent. New technological developments are proposed to mitigate emissions from this sector. The present dissertation deals with the problem of evaluating different powertrain configurations (conventional internal combustion engine (ICE) and fuel cell (FC) powertrain) and fuels (from crude oil, natural gas, nuclear power, biomass, and solar irradiation) for passenger cars under various aspects.

The approach developed in this thesis is the integration of Life-Cycle Assessment (LCA) and Energy-Planning Models.

In a first step, a classical LCA of the different combinations of powertrain and fuel is performed. In this kind of analysis the potential environmental impact of a system throughout its life cycle is assessed. Already at this stage some important conclusions can be drawn. The results show the reduction potentials of alternative technologies concerning emissions of pollutants and greenhouse gases (GHG), but they also underline that the simultaneous mitigation of various emissions will probably call for a compromise. Moreover, the LCA allows detecting crucial issues in both the technologies assessed and the data available for this study.

In a second step the costs for driving cars with different powertrains and fuels are assessed for various scenarios. The scenarios differ in several parameters such as the prices for fossil primary energy carriers, the potential of emerging technologies to reduce costs, and the taxes that are applied to various emissions. The results show the potential of alternative technologies to enter the market under specific boundary conditions, but they also underline that enormous cost reduction is crucial for the FC to become competitive. However, this cost analysis has several drawbacks that mainly evolve from its static character.

This is why in a final step the detailed cost and LCA data of all technologies are included into MARKAL, a successful energy-planning model. This model allows

including additional aspects into the analysis, such as restricted resource availability, the introduction of emission caps or time-dependent technological parameters. Of particular importance is the implementation of learning curves: with this feature the investment costs of some emerging technologies become an endogenous variable to the model, and these technologies are only installed when the higher investments that are necessary to mature them are outweighed by lower costs in later periods.

The results of the analyses with MARKAL, too, have a strong dependence on the boundary conditions chosen. They show, however, that under increased pressure to mitigate emissions of classical pollutants or GHG mainly the ICE car fuelled with compressed natural gas and the different FC vehicles are very attractive options.

The approach of integrating Life-Cycle Assessment (LCA) and Energy-Planning Models has proven to be a valuable tool for the comparison of different technologies. Nonetheless it has its limitations, and there is still much potential for improving the model.

Kurzfassung

Der Transportsektor im allgemeinen und der Personenwagenverkehr im besonderen gelten als Mitverursacher vieler Umweltprobleme wie des globalen Klimawandels, des Sauren Regens oder der Bildung bodennahen Ozons. Zur Verringerung der Emissionen dieses Sektors sollen neue technische Entwicklungen beitragen. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Evaluierung verschiedener Antriebssysteme (konventioneller Verbrennungsmotor (VM) und Brennstoffzellen (BZ)-Antrieb) und Treibstoffe (aus Rohöl, Erdgas, Kernkraft, Biomasse und Sonnenstrahlung) für Personenwagen unter verschiedenen Gesichtspunkten.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz ist die Integration von Life-Cycle Assessment (LCA, häufig als Ökobilanz übersetzt) und energiewirtschaftlichen Planungsmodellen.

In einem ersten Schritt wird eine klassische LCA der verschiedenen Kombinationen von Antriebssystem und Treibstoff durchgeführt. Bei dieser Art von Untersuchung wird der potentielle Umweltschaden eines Systems über den gesamten Lebenszyklus abgeschätzt. Bereits auf dieser Stufe können einige wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Resultate zeigen das Reduktionspotential alternativer Technologien bezüglich der Emissionen von Schadstoffen und Treibhausgasen (THG) auf; sie unterstreichen aber auch, dass die gleichzeitige Verminderung verschiedener Emissionen wahrscheinlich einen Kompromiss erfordert. Darüber hinaus erlaubt es die LCA, Schwachstellen sowohl der untersuchten Technologien als auch der verwendeten Daten zu identifizieren.

In einem zweiten Schritt werden die Kosten für Personenwagen mit unterschiedlichen Antrieben und Treibstoffen in verschiedenen Szenarien bestimmt. Die Szenarien unterscheiden sich in mehreren Parametern, z.B. den Preisen für fossile Primärenergieträger, dem Kostenreduktionspotential neuartiger Technologien und den Abgaben auf verschiedene Emissionen. Als Ergebnis sieht man die Potentiale alternativer Technologien, unter bestimmten Randbedingungen den Markt einzudringen, aber es wird auch deutlich, dass enorme Kostenreduktionen entscheidend sind, damit die BZ wirtschaftlich wird. Diese Kostenanalyse hat noch einige entscheidende Nachteile die hauptsächlich durch ihren statischen Charakter verursacht werden.

Darum werden in einem letzten Schritt die detaillierten Kosten- und LCA-Daten aller Technologien in MARKAL, ein erfolgreiches energiewirtschaftliches Planungsmodell, integriert. Dieses Modell erlaubt es, weitere Aspekte zu berücksichtigen, so z.B. die beschränkte Verfügbarkeit von Ressourcen, die Einführung von sektorweiten Emissions-Obergrenzen oder zeitabhängige technologische Parameter. Von besonderer Bedeutung ist die Implementierung von Erfahrungskurven: mit Hilfe dieses Werkzeugs werden die Investitionskosten einiger neuartiger Technologien modellendogene Variablen, und diese Technologien werden nur eingesetzt, wenn die höheren Investitionskosten, die in der Entwicklungsphase der Technologie benötigt werden, durch Einsparungen in späteren Perioden ausgeglichen werden.

Auch die Ergebnisse der Analysen mit MARKAL sind sehr stark von den gewählten Randbedingungen abhängig. Sie zeigen jedoch, dass unter verschärften Emissionszielen für klassische Schadstoffe und THG insbesondere das Erdgasfahrzeug mit VM als auch die verschiedenen BZ-Fahrzeuge sehr attraktive Optionen darstellen.

Es lässt sich feststellen, dass die Integration von LCA und energiewirtschaftlichen Planungsmodellen ein wertvolles Werkzeug zur vergleichenden Bewertung verschiedener Technologien darstellt. Nichtsdestotrotz hat auch dieses Werkzeug seine Grenzen, und es gibt noch ein grosses Potential zur Verbesserung des Modells.