

DISS. ETH NO. 22027

**SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF PASSENGER VEHICLES:
ANALYSIS OF PAST TRENDS AND FUTURE IMPACTS OF
ELECTRIC POWERTRAINS**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
JOHANNES HOFER
Dipl.-Phys., LMU Munich
born 27. October 1982
citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Wokaun, examiner
Dr. W. Schenler, co-examiner
Dr. S. Hirschberg, co-examiner
Prof. Dr. T. J. Schmidt, co-examiner

2014

ABSTRACT

Since 1950 the world's passenger car fleet has grown by about 5 % per year, reaching approximately 870 million vehicles in 2011 and consuming more than 20 million barrels of crude oil per day. Rising transportation demand and dependence on petroleum as its primary energy source will continue to be a major cause of greenhouse gas (GHG) and pollutant emissions leading to global warming, and damages to human health and the ecosystem. In addition, oil's security of supply and price stability are uncertain. For these reasons, several advanced vehicle and fuel technologies are currently being developed with the aim of reducing the environmental impacts of road transport and its dependence on fossil oil. However, these technologies enter the market incrementally and must meet performance, utility, and cost requirements to be accepted by consumers.

In Switzerland more than two third of personal mobility is based on gasoline and diesel passenger cars, which contribute a rising share to total Swiss CO₂ emissions. A decomposition analysis has been developed and applied to separate the contributions of changes in new vehicle efficiency, mass, and fuel technology to specific CO₂ emissions from Swiss new vehicles. The analysis showed that in the past, powertrain efficiency improvements have to a large extent been offset by the increased mass and performance of new vehicles. In the period from 2000 to 2012, potential reductions at constant fleet mass would have been ca. 9 % higher than the actual CO₂ emission reduction. The method was furthermore applied to study emissions scenarios showing the conditions under which the regulatory targets for 2015 and beyond can be met.

In this thesis an integrated framework to quantitatively assess technical, economic, and environmental criteria of a wide range of conventional and electric powertrains has been developed. Scenarios from today to 2050 are investigated, and various primary energy sources and vehicle configurations are taken into account. The novel analytic modeling methodology developed allows very short calculation time, making it useful for interactive analysis, scenario modeling and fleet simulations; as well as offering new opportunities for sensitivity analysis and optimization.

The models developed in this thesis can help to create a fundamental understanding of the complex interactions between different powertrain technologies, vehicle configuration parameters, future developments, and the corresponding impacts on cost and environmental indicators. In order to make the results of this thesis accessible to a broader public, several tools for interactive life cycle assessment, scenario analysis, and multi-criteria decision analysis have been developed and implemented online.

Life cycle assessment results show that the environmental impacts of electric vehicles are very dependent on their primary source of energy. If electricity and hydrogen for vehicle propulsion are produced from non-fossil primary energy, life cycle GHG emissions and the related impacts on human and ecosystem health, as well as fossil fuel depletion can be greatly reduced. In general,

the costs and environmental impacts from the vehicle production phase are higher for electric than conventional vehicle technologies. In particular metal use increases in electric vehicles and the further development should aim at reducing metal resource depletion and improving recycling efficiency.

Multi-criteria analysis indicates that there is no single technology which performs best in terms of all relevant criteria at the same time, but that different technologies have tradeoffs relative to each other and can provide advantages depending on the specific usage patterns, e.g. electric relative to conventional vehicles in urban driving conditions, or fuel cell relative to battery electric vehicles in terms range and fueling time. Plug-in hybrid electric vehicles appear to be a robust technology considering a broad set of technical, environmental, and economic criteria.

A model of the Swiss passenger vehicle fleet has been developed to analyze the implications of various future scenarios of electric vehicle sales, primary energy sources, and overall vehicle use patterns on vehicle stock, energy use, and GHG emissions until 2050. The results show that major drivetrain changes are not yet ready for large scale adoption, and will take a long time to penetrate the fleet against the current dominance of gasoline and diesel powertrains. On a long-term perspective (beyond 2030), electric vehicles offer the potential for large reductions of fleet fuel use and GHG emissions, if electricity and hydrogen are produced from non-fossil primary sources.

ZUSAMMENFASSUNG

Seit 1950 wächst die globale Zahl an Personenwagen mit ca. 5 % pro Jahr auf rund 870 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2011. Diese verbrauchen pro Tag mehr als 20 Millionen Barrel Rohöl. Eine zunehmende Verkehrsnachfrage und die Abhängigkeit von fossilen Treibstoffen werden auch in Zukunft Hauptgründe für steigende Treibhausgas- und Schadstoffemissionen sein, welche zum Klimawandel beitragen und negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und das Ökosystem haben. Unsicher sind zudem die Versorgungssicherheit mit Öl und dessen Preisstabilität. Aus diesem Grund werden derzeit neue Antriebs- und Kraftstofftechnologien entwickelt. Ziel ist es die Umweltauswirkungen des Personenverkehrs sowie die Abhängigkeit von fossilem Öl zu reduzieren. Diese Technologien durchdringen den Markt allerdings nur schrittweise und müssen den Anforderungen der Kunden im Hinblick auf Leistung, Nutzen und Kosten entsprechen.

Mehr als zwei Drittel des Personenverkehrsaufkommens in der Schweiz wird von Benzin- und Dieselfahrzeugen geleistet, welche in steigendem Maße zu den gesamtschweizerischen CO₂-Emissionen beitragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen von schweizer Neufahrzeugen in die Anteile aus Effizienzsteigerung, Gewichtsänderung und veränderter Kraftstofftechnologie zu trennen. Die Analyse zeigt, dass in der Vergangenheit Effizienzsteigerungen zu einem großen Teil dazu verwendet wurden, Masse und Leistung von Neufahrzeugen zu erhöhen. Im Zeitraum von 2000 bis 2012 war die potenziell mögliche CO₂-Emissionsreduktion bei konstanter Flottenmasse ca. 9 % höher als die eigentlich erreichte. Die Methode wurde zudem dazu verwendet, Emissionsszenarien zu entwickeln welche die Bedingungen aufzeigen, unter denen die Zielvorgaben für das Jahr 2015 und darüber hinaus erfüllt werden können.

In dieser Arbeit wurde ein integriertes Modell für die quantitative Bewertung der technischen, ökonomischen und ökologischen Faktoren einer breiten Auswahl konventioneller und neuer elektrischer Antriebstechnologien entwickelt. Szenarien von heute bis 2050 wurden untersucht und verschiedene Primärenergieträger und Fahrzeugkonfigurationen berücksichtigt. Die neuartige Modellierungsmethodik, welche im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, ermöglicht sehr kurze Berechnungszeiten, wodurch interaktive Analysen, Szenariomodellierungen und Flottensimulationen deutlich verbessert werden. Die Methodik eröffnet zudem neue Möglichkeiten im Bereich der Sensitivitätsanalyse und bei Optimierungsproblemen.

Die Modelle welche im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden können helfen, das grundlegende Verständnis für die komplexen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Antriebstechnologien, Konfigurationsparametern, zukünftigen Entwicklungen, und den entsprechenden Einflüssen auf Kosten und Umweltauswirkungen zu verbessern. Um die Ergebnisse einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden mehrere Tools für interaktive Ökobilanzierung

gen, Szenarienanalysen, und multikriterielle Entscheidungsanalysen entwickelt, welche online genutzt werden können.

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigen, dass die Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen sehr stark vom verwendeten Primärenergieträger abhängen. Sofern die Elektrizität und der Wasserstoff für den Antrieb des Fahrzeugs aus nicht-fossiler Primärenergie erzeugt werden, können sowohl die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus und die daraus folgenden Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen und des Ökosystems, als auch der Verbrauch fossiler Energieträger deutlich reduziert werden. Die Kosten und Umweltauswirkungen der Produktionsphase sind bei elektrischen Fahrzeugtechnologien generell höher als bei konventionellen Fahrzeugtechnologien. Besonders die Verwendung metallischer Ressourcen steigt bei elektrischen Antrieben. In der Zukunft sollte darauf geachtet werden, die Verwendung dieser Materialien zu reduzieren und die Recyclingeffizienz zu erhöhen.

Die Multi-Kriterien-Analyse zeigt, dass es bisher keine ideale Technologie gibt die alle relevanten Kriterien erfüllt. Stattdessen bieten verschiedene Antriebsarten je nach Verwendungszweck relative Vorteile. So bietet beispielsweise ein elektrischer relativ zu einem konventionellen Antrieb Vorteile in städtischem Verkehr, während Brennstoffzellenfahrzeuge relativ zu batteriebetriebenen Fahrzeugen in Bezug auf Reichweite sowie Tank- bzw. Ladezeit vorteilhaft sind. Plug-in Hybridfahrzeuge scheinen unter Berücksichtigung einer großen Bandbreite technischer, ökologischer und ökonomischer Indikatoren eine verlässliche Fahrzeugtechnologie zu sein.

Ein Modell der schweizer Personenwagenflotte wurde entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener Szenarien zukünftiger Verkäufe elektrischer Fahrzeuge, Primärenergieträger, und Verkehrsleistungen auf die Flottenzusammensetzung, den Gesamtenergieverbrauch, und die Treibhausgasemissionen bis 2050 zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass grundlegend neue Antriebstechnologien noch nicht für eine massenhafte Einführung bereit sind und eine lange Zeit benötigen um die Dominanz konventioneller Technologien zu durchbrechen. Langfristig (ab 2030) werden elektrische Antriebstechnologien das Potential für grosse Reduktionen des Flottenkraftstoffverbrauchs und Treibhausgasemissionen bieten, falls Elektrizität und Wasserstoff aus nicht-fossilen Quellen erzeugt werden.