



Doctoral Thesis

## Prospective life cycle assessment for transport systems

**Author(s):**

Spielmann, Michael

**Publication Date:**

2005

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005133146> →

**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. 16047

## **Prospective Life Cycle Assessment for Transport Systems**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

Michael Spielmann  
dipl. Ingenieur-Umwelttechnik, TU-Berlin  
born 29.06.1966

citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Roland W. Scholz, examiner  
Prof. Olivier Jolliet, co-examiner  
Dr. Peter de Haan, co-examiner  
Dr. Olaf Tietje, co-examiner

2005

## Abstract

The present thesis focuses on the assessment of environmental effects of transport. This is a research topic already since the 1980ies, as acid rain, "Waldsterben" and the rapidly increasing air pollution by road transport in urban areas led to increased public awareness resulting in a row of legislative actions. As a consequence, rapid technological changes occurred in the last ten years and will occur in the near future. And for the more distant future, new technology concepts such as fuel cell cars and maglev technology are promoted as environmental promising alternative to the existing transport technologies. This calls for continuing research in order to keep track of all technological changes. The present thesis is part of this research.

The objective of this research is to develop and demonstrate a method of prospective Life Cycle Assessment (LCA) analysis that allows for the environmental sustainability assessment of future transport alternatives. In order to achieve the overall objective two key research issues are identified and addressed:

- 1) A comparison of the environmental efficiency of selected transport services singularly; i.e. an efficiency comparison of existing transport services with new alternatives. Such an approach is applicable for a) an intra-modal comparison (e.g. diesel vs. gas bus) and/or b) an inter-modal comparison (e.g. bus vs. rail), provided a complete substitution of one mode (e.g. rail) by another mode (e.g. bus) takes place.
- 2) The assessment of transport alternatives on a transport system level, taking into account possible changes in the technology development of transport services and in the modal split. Such an approach is essential for the assessment of new high speed transport modes (e.g. maglev trains) that are likely to re-shape the balance between transport modes and services.

Prior to the assessment of future transport alternatives, a transparent and structured Life Cycle Inventory (LCI) model of transport services has been outlined. This model is applicable for all transport services and has been demonstrated for the example of freight transport. Transport services (e.g. a freight train or a passenger car) are divided into several datasets referred to as transport components. In addition to vehicle operation (comprising vehicle travel and pre-combustion), infrastructure processes such as vehicle maintenance, manufacturing and disposal, as well as transport infrastructure construction, operation and disposal, are addressed in the life cycle inventory transport model. All transport services in this thesis are calculated using this model.

In order to address the first research issue, an approach of scenario modeling organized by means of Formative Scenario Analysis (FSA) is developed to address epistemological uncertainties inherent

to prospective system analysis. The process is based on the unit process paradigm (a unit process may be a certain transport component or the generation of electricity) and is particularly designed for application in Life Cycle Assessment. Two core elements of FSA are employed: First, Impact Matrix Analysis is employed to support a transparent generation of unit process scenarios (e.g. the identification of future technology developments of a bus). Second, Consistency Analysis is applied to integrate various unit process scenarios. The developed approach is applied and tested in an illustrative case study, where we compare the environmental efficiency of future options for regional transport. Efficiency scores for two important environmental indicators ( $\text{NO}_x$ - and Climate Change emission) have been calculated for rail, bus and car transportation.

While the above approach allowed for the intra-modal and inter-modal comparison of the environmental efficiency of future transport options, it does not allow for the investigation of side effects, expected with the introduction of new high speed transport services.

For the latter, an approach to address the environmental efficiency of the total transport system was developed. In order to evaluate the environmental consequences of the introduction of a new transport service, the induced environmental impacts including rebound effects can be employed as an indicator. Uncertainties in the development of the environmental efficiency of single transport services and uncertainties in the future demand (modal split) can be principally addressed with the concept of scenario modelling resulting in a set of 2 to 4 four cornerstone scenarios.

In a comprehensive case study we have applied and tested the feasibility of this approach and investigate the induced environmental impacts – including rebound effects – caused by the introduction of a high speed maglev network (Swissmetro) in Switzerland. Swissmetro is introduced as a time saving innovation, and due to the fact that we applied the assumption of constant Travel Time Budget (TTB), a rebound effect with respect to time occurs. Employing scenario modeling, we generated a set of four cornerstone scenarios. The induced environmental impacts for each cornerstone scenario are derived by determining the difference between the environmental impacts caused by an average traveler in a scenario with and without Swissmetro.

Induced environmental impacts effects occur in all considered cornerstone scenarios, which indicates that – under the described assumptions – a future transport system without Swissmetro is the environmentally robust and thus preferable option. In order to compensate the induced environmental impacts and guarantee that the efficiency of the transport system is not decreasing, an enormous improvement of the environmental efficiency of 85–95% (for climate change gases) would be required.

The case study demonstrates that a comprehensive investigation – which goes beyond the concept of comparing the environmental efficiency of selected means of transports singularly – is essential to evaluate emerging transport technologies. The employed approach of scenario modelling is capable to incorporate the assessment of rebound effects. It is well suited to enhance our understanding of the consequences of the introduction of new emerging transport services and thus facilitate the assessment of future transport alternatives on a transport system level. Consequently, also the second key research issue could be addressed successfully.

The presented research contributes to increase the credibility of LCA as a tool for strategic decision making. The concept of scenario modelling reasons from inherent uncertainty and unpredictability of future developments and provides an approach in which each scenario is used to arrive at insights relevant for the decision making process. Thus, prospective LCA as a decision support tool provides a sound basis for discussions in an uncertain world rather than presenting definite answers.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung von Umweltaspekten des Verkehrs; einem Forschungsgebiet, das in den 1980er Jahren aufgenommen wurde, als Themen wie «saurer Regen», «Waldsterben» und die dramatisch ansteigende Luftverschmutzung in städtischen Gebieten zu einer zunehmenden öffentlichen Besorgnis führten. Dieses gestiegene Bewusstsein für Umweltfragen resultierte in einer Reihe von gesetzlichen Bestimmungen, welche in den letzten 10 Jahren einen enormen technischen Innovationsschub im Transportbereich auslösten, der auch in Zukunft anhalten dürfte. So werden zum Beispiel die Entwicklung von Brennstoffzellenautos und Maglev-Technologien als viel versprechende Alternativen zu den bereits bestehenden Transporttechnologien vorangetrieben. Diese anhaltenden Entwicklungen erfordert eine kontinuierliche Begleitforschung. Diese Arbeit ist als Bestandteil dieser Forschung einzuordnen, ihr Ziel ist die Entwicklung einer Methode für die zukunftsgerichtete Ökobilanzierung (prospective Life Cycle Assessment LCA), welche im Rahmen der Nachhaltigkeitsevaluation die Umweltbewertung von zukünftigen Transportalternativen ermöglicht. Wir unterscheiden prinzipiell zwei Forschungsschwerpunkte:

- 1) die Beurteilung von Transportalternativen beruhend auf einem Vergleich der Umwelteffizienz existierender Verkehrsmittel und neuer Verkehrstechnologien. Eine solche Analyse ist anwendbar für a) intra-modale Vergleiche (z.B. Diesel vs. Gasbus) und/oder b) inter-modale Vergleiche (z.B. Bus vs. Zug), vorausgesetzt, ein Verkehrsmittel werde vollständig durch ein anderes ersetzt.
- 2) die Beurteilung von Transportalternativen auf der Ebenen des gesamten Verkehrssystems, unter Berücksichtigung möglicher Änderungen in der technischen Entwicklung von Verkehrsmitteln und im modalen Split (Anteil der verschiedenen Verkehrsträger am Gesamtverkehrsaufkommen). Ein solcher Ansatz ist notwendig für die Beurteilung von Hochgeschwindigkeitstransportsystemen (z.B. Maglev-Zügen), welche zu einer Veränderung im modalen Split der Verkehrsträger führen können.

Der eigentlichen Entwicklung der Methode der «prospective LCA» ist die Entwicklung eines transparenten und strukturierten (Life Cycle Inventory Model) vorgeschaltet, welches für alle Verkehrsmittel anwendbar ist und hier anhand des Beispiels verschiedener Güterverkehrsmittel vorgestellt wird. Dazu wird ein Verkehrsmittel in verschiedene Komponenten unterteilt. Zum eigentlichen Fahrzeugbetrieb (Fahrzeugfahrt und Treibstoffherstellung), werden zusätzlich die so genannten Infrastrukturprozesse (Fahrzeugherstellung, Fahrzeugunterhalt und Fahrzeugentsorgung sowie Konstruktion der Verkehrsinfrastruktur, Infrastrukturbetrieb und Infrastrukturentsorgung) modelliert.

Im Rahmen des ersten Forschungsschwerpunkts wird ein Ansatz der Szenariomodellierung entwickelt, welcher auf dem Prinzip der formativen Szenarioanalyse (FSA) beruht und die epistemologischen Unsicherheiten, die jeder prospektiven Analyse inhärent sind, analysiert und dargestellt. Dieser Ansatz basiert auf dem Einheitsprozessparadigma der LCA (ein Einheitsprozess kann zum Beispiel eine bestimmte Transportkomponente oder ein Energiebereitstellungsprozess sein) und wurde eigens für die Anwendung in der Ökobilanzierung entworfen. Es werden zwei Kernelemente der FSA angewandt: erstens die Einflussmatrixanalyse zur transparenten Konstruktion von Einheitsprozessszenarien (z.B. zur Identifizierung von zukünftigen Entwicklungen der Bustechnologie) und zweitens die Konsistenzanalyse, um die Integration verschiedener Einheitsprozessszenarien zu ermöglichen. Dieser Ansatz wird in einer illustrativen Fallstudie angewandt und getestet, in welcher wir die Umwelteffizienz verschiedener Zukunftsoptionen des Regionalverkehrs (Schiene und Strasse) vergleichen.

Der obige Ansatz lässt einen intra-modalen und inter-modalen Vergleich der Umwelteffizienz verschiedener zukünftiger Transportalternativen zu. Eine Untersuchung von Nebeneffekten, welche mit der Einführung neuer Hochgeschwindigkeits- Verkehrsmittel zu erwarten sind, ist hingegen nicht möglich.

Für die Untersuchung von Nebeneffekten entwickelten wir einen weiteren Ansatz, der es erlaubt, die Umwelteffizienz des gesamten Systems zu analysieren. Als Indikator zur Evaluation der Umweltkonsequenzen, welche mit der Einführung neuer Transportalternativen zu erwarten sind, eignet sich der (Rebound Effect). Unsicherheiten in der Entwicklung der Umwelteffizienz einzelner Verkehrsmittel und Unsicherheiten in der zukünftigen Nachfrage (Modal Split) können mit einer Erweiterung der oben vorgestellten Szenariomodellierung dargestellt werden.

Um den entwickelten Ansatz zu testen, werden in einer umfangreichen Fallstudie die induzierten Umweltauswirkungen, welche die Einführung eines Hochgeschwindigkeits-Maglev-Transportnetzwerks (Swissmetro) mit sich bringen würde, analysiert. Anhand der Anwendung der Szenariomodellierung erhalten wir einen Satz von 4 (Cornerstone Scenario). Die induzierten Umweltauswirkungen werden dann als Differenz der Umwelteffizienz eines «Cornerstone Scenarios» mit Swissmetro und ohne Swissmetro bestimmt. Um auch den Zeit-Rebound-Effekt mit einzubeziehen, benutzen wir die Hypothese des (constant Travel Time Budget).

Induzierte Umweltauswirkungen sind für alle Szenarien nachzuweisen, was darauf hindeutet, das ein Verkehrsnetz ohne Swissmetro die robustere Variante für ein zukünftiges Schweizer Verkehrssystem darstellt. Um den berechneten Rebound-Effekt zu kompensieren, ist eine enorme Verbesserung der Umwelteffizienz (85-95 % für Klimagasemissionen) der Swissmetro notwendig.

Die Fallstudie demonstriert, dass eine Kombination von Rebound-Effekt-Analyse und Szenariomodellierung gut geeignet ist, um unser Verständnis der Konsequenzen einer Einführung einer neuen Transporttechnologie zu verbessern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für beide Forschungsschwerpunkte erfolgreich Verfahren entwickelt wurden, welche die Durchführung von zukunftsgerichteten Ökobilanzen (prospective LCA studies) ermöglichen. Die vorliegende Arbeit erhöht somit die Glaubwürdigkeit der Ökobilanzierung als Instrument für strategische Entscheidung. Die prospektive LCA kann somit als ein strategisches Instrument der Entscheidungsunterstützung angesehen werden, welches in erster Linie eine solide Diskussionsbasis bereitstellt und weniger auf das Präsentieren endgültiger Antworten ausgerichtet ist.