



Doctoral Thesis

Life cycle inventory analysis for decision-making scope-dependent inventory system models and context-specific joint product allocation

Author(s):

Frischknecht, Rolf

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001912175> →

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 ex. B

Diss. ETH Nr. 12599

LIFE CYCLE INVENTORY ANALYSIS FOR DECISION-MAKING

SCOPE-DEPENDENT INVENTORY SYSTEM MODELS AND
CONTEXT-SPECIFIC JOINT PRODUCT ALLOCATION

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

presented by

ROLF FRISCHKNECHT

Dipl. Bau-Ing. ETH

born 17. August 1962

citizen of Basel-Stadt and Schwellbrunn (Appenzell Ausserrhoden)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Suter, examiner

Prof. Dr. D. Spreng, co-examiner

Dr. G. Huppes, co-examiner



Zurich, 1998

ETHICS ETH-BIB



00100003605683

Abstract

Keywords: Life Cycle Assessment, Life Cycle Inventory Analysis, Systems modelling, Joint production, Allocation, Environmental external costs, Electricity model, Combined heat and power production,

In this thesis, Life Cycle Inventory Analysis (LCI) is structured in view of its use in decision-making. Emphasis is put on often encountered inconsistencies, namely the set-up of LCI system models, the representation of decisions and value choices of actors (e.g., firms) involved in a product system, and the representation of changes within the economic system.

An LCI system model consists of numerous individual processes. Their relations are identified according to economic (such as market information or contracts) instead of mere physical information. Based on such a system model, LCA provides environmental information consistently complementary to private cost statements.

A disutility function is introduced, which is used for the default choice of (marginal) technologies or technology mixes within the product system, and for joint product allocation. The disutility function adds up economic information (i.e., private costs) and environmental information to total "social" costs. For that purpose, an environmental exchange rate is introduced. The exchange rate mirrors the variable influence of environmental aspects on decisions in different political entities such as nations. It may also express differences in uncertainty perception of the actors directly and indirectly involved in the production of the good or service under analysis.

To reflect the consequences of decisions, models capable of representing changes within the economic system shall consist of processes represented by marginal technologies, the technologies put in or out of operation next. The disutility function is used for the identification of the marginal technologies throughout the whole product system. System models are classified according to the distinction of planning tasks in firms, i.e., short-, long- and very long-term decisions. It is assumed that all firms connected within the process network of a product make their decisions based on the same time horizon (i.e., short-, long-, and very long-term). Aspects of non-linearity occur in the case of short-term optimisation. Semi-dynamic modelling in the case of very long-term planning shows its limited added value compared to static modelling.

Short-term decisions comprise the optimisation of existing production facilities. That is why capital equipment is not included in the Short Run system model. In the case of long-term decisions, capital equipment is included in the Long Run system model depending on the status of the market situation of the product under analysis. In shrinking markets, where no replacement investments are made, capital equipment is left out whereas in expanding and saturated markets it is included. Very long-term decisions require consistent scenario about the future status of society, economy and the environment. For the support of very long-term decisions with the help of LCA, emphasis is put on the accuracy of

the representation of the future status, and much less on the detailed modelling of the transition period towards that future status.

The disutility function is applied in joint product allocation assuming that environmental aspects influence decisions of a firm and its clients. Joint production situations are discriminated according to the decision context, i.e., the number of decision-makers involved, and according to the market for which joint products are manufactured.

In a single decision-maker situation within sufficiently working markets, allocation factors are chosen in view of the competitiveness of the joint products. The competitiveness of two or more joint products is determined using multiobjective optimisation.

In a single decision-maker situation within monopolistic markets, the price-output relation is determined in view of maximising profits by means of constrained optimisation.

In a multiple decision-maker situation, several parties negotiate for a voluntary coalition. The aim is to evaluate an allocation key satisfactory for all parties. A game theoretic approach is used to model such situations.

The cases "national electricity mix" and "small scale gas-fired combined heat and power generation" illustrate the new methodological approaches. The Eco-indicator 95 impact assessment method is adapted to recent knowledge about environmental damages and used for the environmental assessment of the various electricity and heat generating technologies used in the case studies.

The environmental performance of the Swiss national electricity mix represented by an economically- and a physically-based model is determined. The differences in terms of single environmental impacts are significant but minor in terms of "social" costs. The determination of marginal power plants is sensitive in respect to the underlying forecast of electricity consumption. In a system model where an increase in electricity demand is prognosticated, electricity shows a relatively good environmental performance which promotes electricity applications. But also the opposite assumption, a future decrease in electricity consumption, leads to a consistent outcome. A comparison of our results with a forecast made for the European electricity supply industry confirms the accuracy of the disutility function to a considerable extent.

Context-specific allocation in combined heat and power (CHP) production is compared with traditional allocation approaches such as the "avoided burden"-approach or allocation based on economic or arbitrary physical criteria. The competitiveness of the CHP plant highly depends on the damage cost scenario for global warming. In terms of "social" costs the CHP plant is competitive compared to combinations of existing fossil-fueled power plants and natural gas-fired boilers but also compared to nuclear power and gas-fired boilers (low CO₂-damage costs scenario). Gas-fired gas combined cycle power plants show a similar performance like the CHP plant if combined with natural gas-fired boilers. However, the uncertainties in the data qualify the generalization of the conclusions from both case studies.

It is concluded, that the guiding principle formulated in this thesis, namely that LCA shall complement economic information, leads to a consistent and feasible methodology capable of representing changes within the economic system.

Zusammenfassung

Schlagworte: Ökobilanz, Sachbilanz, Systemmodellierung, Kuppelproduktion, Allokation, Externe Kosten, Strommodell, Wärmekraftkopplung

In der vorliegenden Arbeit werden Sachbilanz-Systemmodelle ausgearbeitet, und im Hinblick auf deren Verwendung in der Entscheidungsfindung strukturiert. Das Hauptgewicht liegt dabei auf der Reduktion von Widersprüchen im Modell. Widersprüche treten auf in Bezug auf die Art und Weise wie das Systemmodell aufgebaut wird, wie Entscheide von Akteuren (z.B. Firmen) innerhalb eines Produktlebenszyklus', und wie Änderungen innerhalb des ökonomischen Systems modelliert werden.

Das Systemmodell einer Sachbilanz besteht aus einer Vielzahl von individuellen Prozessen. Deren Verknüpfungen untereinander werden mit Hilfe ökonomischer Informationen (wie z.B. Marktinformationen, Verträge) eruiert. Daraus resultiert ein Systemmodell, welches bestmöglich traditionelle ökonomische Informationen (private Kosten) um die dazugehörigen Umweltinformationen ergänzt.

Eine Kostenfunktion wird eingeführt. Sie dient dazu, in genereller Weise eine (Grenz-)Technologie respektive einen Technologie-Mix zu bestimmen. Zudem wird sie bei Allokationsproblemen starr gekoppelter Prozesse verwendet. Die Kostenfunktion vereint ökonomische und ökologische Informationen zu sogenannten "sozialen" Kosten. Sie enthält einen Faktor ("Umwelt-Wechselkurs") mit Hilfe dessen die Bedeutung der Umweltauswirkungen im Verhältnis zu den privaten Kosten variiert werden kann. Dieser Faktor ist abhängig davon, wie Umweltaspekte die Entscheidungsfindung beeinflussen. So kann beispielsweise die Ausgestaltung der nationalen Umweltpolitik einen Einfluss ausüben. Zudem kann einer unterschiedlichen Wahrnehmung unsicherer Information über zukünftige Umweltschäden Rechnung getragen werden.

Einzelprozesse innerhalb entscheidungsunterstützender Systemmodelle werden durch Grenztechnologien, durch die als nächste in resp. ausser Betrieb genommenen Technologien, repräsentiert, um die Konsequenzen von Entscheidungen abbilden zu können. Innerhalb des gesamten Produktsystems werden die Grenztechnologien mit Hilfe der Kostenfunktion bestimmt. Es werden Sachbilanz-Systemmodelle für Entscheide mit kurz-, lang- und sehr langfristigem Planungshorizont unterschieden. Dabei wird angenommen, dass innerhalb dieser drei Modelle alle in einem Produktsystem involvierten Firmen auf der Basis desselben Planungshorizontes entscheiden.

Kurzfristige Entscheide werden bei der Optimierung bestehender Fabrikationsanlagen benötigt. Dementsprechend ist die Produktion der Investitionsgüter in diesem Systemmodell ausgeschlossen. Im Systemmodell für langfristige Entscheide wird die Produktion von Investitionsgütern lediglich in wachsenden oder reifen Märkten, in welchen (noch) Erweiterungs- respektive Ersatzinvestitionen getätigt werden, berücksichtigt. Entscheide mit einem sehr langfristigen Planungshorizont benötigen konsistente Szenarien über zukünftige gesellschaftliche, ökonomische und ökologische Entwicklungen. Um sehr langfristig ausgerichtete Entscheide mit Hilfe der Ökobilanzierung zuverlässig unter-

stützen zu können, müssen die möglichen zukünftigen Zustände möglichst genau bekannt sein. Hin- gegen sind Informationen über den zeitlichen Verlauf, wie diese Zustände erreicht werden, für die Ge- nauigkeit von Ökobilanz-Ergebnissen von untergeordneter Bedeutung.

Die Kostenfunktion wird im weiteren bei Allokationsproblemen in starr gekoppelten Prozessen ange- wandt in der Annahme, dass Umweltaspekte bei Entscheiden der entsprechenden Firma und ihrer Kunden eine Rolle spielen. Die Allokationsprobleme starr gekoppelter Prozesse werden kontext-spe- zifisch, d.h. bezüglich ihres Entscheidungsumfeldes klassifiziert. Dabei werden Situationen mit einem respektive mit mehreren Entscheidern unterschieden. Zudem spielt die Beschaffenheit des Marktes eine Rolle, für den die Kuppelprodukte hergestellt werden.

In einer Situation mit einem Entscheider in einem funktionierenden Markt wird die Allokation nach Massgabe der Wettbewerbsfähigkeit (oder Tragfähigkeit) der Kuppelprodukte durchgeführt. In einer Situation mit einem Entscheider in einem monopolarartigen Markt, besteht kein eigentliches Allokations- problem. Vielmehr geht es darum, das Preis-Absatz Verhältnis im Hinblick auf eine Nutzenmaxi- mierung zu optimieren. Bei mehreren Entscheidern müssen gerechte Aufteilungsschlüssel gefunden werden. Da Umweltbelastungen (noch) kaum auf dem Markt gehandelt werden, tritt dieser Fall in Ökobilanzen nicht nur bei freiwilligen Koalitionen, sondern generell bei der Aufteilung der Umwelt- belastung eines Prozesses mit mehreren mitbeteiligten Entscheidern ein. Derartige Situationen werden mit Hilfe eines spieltheoretischen Ansatzes modelliert.

Ökobilanzen nationaler Strommodelle und von Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK) kleiner Leistung dienen zur Veranschaulichung der erarbeiteten methodischen Ansätze. Die Unterschiede der Ökobilanz des Schweizerischen Strommixes, basierend einerseits auf einem ökonomischen und andererseits auf einem physikalischen Modell, unterscheiden sich signifikant in Bezug auf einzelne Um- welteinwirkungen. Bezüglich "sozialer" Kosten hingegen sind die Unterschiede gering. Die Bestim- mung der Grenzkraftwerke zeigt eine grosse Sensitivität bezüglich der zugrundeliegenden Bedarfspro- gnose. Wird eine Zunahme des Stromverbrauchs angenommen, so zeigt der zusätzlich zu produ- zierende Strom eine vorteilhafte Umweltbilanz. Dadurch können Stromanwendungen gefördert und der Strombedarf tatsächlich gesteigert werden. Aber auch ein gegenteiliges Szenario mit einem ab- nehmenden Stromverbrauch führt zu in sich konsistenten Resultaten. Ein Vergleich der Resultate dieser Fallstudie mit Prognosen über Investitionen in der Europäischen Elektrizitätswirtschaft bis zum Jahre 2010 zeigt eine ziemlich gute Übereinstimmung.

Der Ansatz der kontext-spezifischen Allokation wird am Beispiel der Ökobilanz einer Wärmekraft- kopplungs-Anlage angewendet. Der neue Ansatz wird mit klassischen Methoden der Allokation wie Restwertmethode oder Allokation nach Massgabe ökonomischer und physikalischer Parameter ver- glichen. Dabei zeigt sich, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Wärme und Strom aus WKK-Anlagen in starkem Masse vom verwendeten Szenario bezüglich Klimaschadenskosten abhängt. In Bezug auf "soziale" Kosten sind Strom und Wärme aus der WKK-Anlage wettbewerbsfähig im Vergleich zu Kombinationen von Strom aus bestehenden fossil befeuerten Kraftwerken und Wärme aus gasbe- feuerten, kondensierenden Kesseln. Unter der Annahme niedriger Klimaschadenskosten ist die WKK-Anlage auch gegenüber Kernkraftwerken in Kombination mit Gasheizungen wettbewerbs- fähig. Moderne Gas- und Dampfkraftwerke in Kombination mit Gasheizungen produzieren Strom und Wärme zu vergleichbaren sozialen Kosten. Infolge der Unsicherheiten in den angewendeten Mo- dellern und Daten sind die Schlussfolgerungen dieser Fallstudien nur begrenzt verallgemeinerbar.