

Diss. ETH No. 13047

The Use of Life-Cycle Assessment and Product Risk Assessment Within Application Development of Chemicals

A Case Study of Perchloroethylene Use in Dry Cleaning

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Peter Henri Flückiger

Dipl. Natw. ETH

born February 6, 1969

citizen of Gondiswil BE

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Konrad Hungerbühler, examiner

Prof. Dr. René Schwarzenbach, co-examiner

Dr. André Weidenhaupt, co-examiner

Dr. David Russell, co-examiner

Zürich, 1999

1. ZUSAMMENFASSUNG

Prozesse und Produkte der Chemieindustrie tragen bedeutend zum Wohlstand heutiger Industriegesellschaften bei. Leider sind diese aber auch verantwortlich für eine Reihe von Umweltproblemen. Die Chemieindustrie unternimmt heutzutage Anstrengungen, um neben ökonomischen Aspekten auch ökologische und soziale Aspekte in operativen und strategischen Tätigkeiten zu berücksichtigen. Ein möglicher Ansatz dazu ist die Integration ökologischer Aspekte in die Produktentwicklung. Hierzu existieren verschiedene Umweltanalyseinstrumente/Werkzeuge wie Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen/LCA), Produktrisikoplanalysen (PRA), Analyse des Umweltverhaltens (EFA), Prozessrisikoplanalysen und Umweltverträglichkeitsprüfungen.

In der vorliegenden Arbeit wurden Spezifikationen für eine Werkzeugkiste ("Toolbox") hergeleitet, welche eine umweltorientierte Entwicklung neuer Anwendungstechnologien und Dienstleistungen für Chemikalien unterstützen sollen. Diese "Toolbox" enthält unter anderem die Werkzeuge LCA, PRA und EFA. Mit Hilfe des Fallbeispiels Chemischreinigung mit Perchlorethylen (PER) und einem Applikationsentwicklungsschemas aus der Chemieindustrie wurden diese Werkzeuge einer integrierten Analyse unterzogen. Dabei wurden vier Fälle von Emissionen unterschieden: Normalfall, Störfall, sowie absichtlicher und unabsichtlicher Missbrauch.

Zwei wichtige Hauptschritte des Applikationsentwicklungsschemas wurden in dieser Arbeit differenziert: Die "Situationsanalyse" und der "Produktentwicklungszyklus" welcher aus verschiedenen Phasen besteht. Vor allem der erste Hauptschritt "Situationsanalyse" und die erste Phase des Produktentwicklungszykluses "Ökologische Produktevaluation" wurden nacheinander untersucht.

In der "Situationsanalyse" wurden firmeninterne und -externe Umwelttreiber für einen bedeutenden PER Produzenten (Dow Europe S.A.) bestimmt. In der Phase der "ökologischen Produktevaluation" wurden die externen Umwelttreiber mit Hilfe der folgenden quantitativen Studien für den Normalfall evaluiert:

- **Ökologischer Vergleich der Chemischreinigungstechnologien mit PER, Kohlenwasserstoff-Lösungsmitteln (KWL), flüssigem Kohlendioxid (CO₂) und mit wässrigen Verfahren (H₂O).** Dazu wurden chemische und physikalische Eigenschaften der Lösungsmittel PER, KWL und CO₂ verglichen sowie eine komparative LCA der vier Technologien durchgeführt. Basierend auf einem Set von Annahmen (z.B. nur neue Technologien, keine Störfälle) stellte sich heraus, dass die Reinigung mit PER vergleichbar grosse ökologische Auswirkungen hat wie die Reinigung mit KWL. Die Reinigung mit CO₂ scheint ökologisch vielversprechend. Leider ist für CO₂ die Datenlage schwach, da sich dieses Verfahren noch in der Entwicklung befindet. Die wässrige Reinigung schneidet schlechter ab als die anderen drei Verfahren aufgrund ihres relativ hohen Energieverbrauches.
- **Evaluation der umweltrelevantesten Prozesse über den Lebenszyklus von PER** in der Textilreinigung mittels einer LCA und Stoffstromanalyse von PER (MB). Der Stromverbrauch der Textilreinigung sowie der Privat-Transport von Textilien zum Chemischreinger und zurück sind die weitaus umweltproblematischsten Prozesse (>60% respektive >13%). PER-Emissionen in die Luft tragen dagegen wenig zur Umweltlast bei (<2%). PER wird über den Lebenszyklus gesehen hauptsächlich beim Reiniger in die Luft emittiert (17% des eingesetzten PER).
- **Evaluation von toxikologischen und ökologischen Effekten von PER-Emissionen in die Umwelt** mittels PRA. Keine kontinentalen und regionalen Probleme konnten evaluiert werden. Auf einer lokalen Ebene stellt sich heutzutage (in der Schweiz) zum Teil ein potentiell Problem für Anwohner von Textilreinigungen. Dies kann aufgrund von schlechter Technologieführung (Unfälle, Missbräuche) oder veralteter Technologie sein.
- **Evaluation des Umweltverhaltens und der Umweltauswirkungen von PER-Emissionen in die Luft** mittels EFA. Es entstehen Metaboliten (>80% Phosgen welches sich zu Kohlendioxid und Salzsäure zersetzt, <20% Trichloressigsäure), welche potentiell zu verschiedenen Umwelteffekten (Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Versauerung) beitragen können. Deren Beitrag zu globalen und regionalen Umweltproblemen wird generell als gering angesehen. Aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der Umweltauswirkungen des Metaboliten Trichloressigsäure und zukünftigen Umweltrisiken durch

die ubiquitäre Präsenz von PER in der Atmosphäre sind aber weitere Untersuchungen durchzuführen.

Die beschriebenen quantitativen Studien für den Normalfall können nicht alle identifizierten Umwelttreiber erklären. Daher wurde auch der Störfall und Missbrauch qualitativ untersucht wodurch zusätzliche Umweltrisiken für PER ersichtlich wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmung und Kommunikation von Risiken lassen sich einige weitere Umwelttreiber auf nicht-naturwissenschaftliche Weise erklären.

Basierend auf diesen Resultaten konnten zusammenfassend für eine ökologische Applikationsentwicklung folgende Spezifikationen für eine "Toolbox" postuliert werden:

- **Anwendungsreihenfolge von Werkzeugen (Normalfall):** Analyse chemisch-physikalischer Eigenschaften → komparative LCA → LCA → MB → PRA → EFA.
- **Anwendungsumfang von Werkzeugen (Normalfall):** Die Analyse von chemisch und physikalischen Effekten kann mittels Checklisten vereinfacht werden. Eine LCA kann in einem ersten Ansatz durch eine Energiebilanz (EB) (und MB der untersuchten Chemikalie) angenähert werden. Die PRA kann auf ersten Konzentrations- und Effektabschätzungen beruhen. Die EFA wird nur für die Umweltkompartimente durchgeführt in die der Stoff emittiert wird.
- **Anwendungsverantwortung von Werkzeugen (Normalfall):** Die LCA, PRA sowie die EFA sollten durch entsprechende Experten ausgeführt werden. Die Anwendung von Checklisten einer MB oder EB kann durch einen Ingenieur oder Naturwissenschaftler vorgenommen werden.

2. ABSTRACT

Chemical processes and products contribute greatly to the increase of quality of life. Unfortunately they are also responsible for a variety of environmental problems. Today, the chemical industry is facing the challenge of integrating ecological and societal issues into strategies, planning and the design of (new) chemical substances, application technologies, services, products and processes to fulfil our modern society's needs. One approach to reduce chemical product related environmental impacts is the inclusion of environmental aspects at the product development stage. Different environmental assessment tools supporting this approach exist such as Life-Cycle Assessment (LCA), Product Risk Assessment (PRA), Environmental Fate Analysis (EFA), Process Risk Assessment, and Environmental Impact Assessment.

In this study specifications for a toolbox supporting the environmental sound development of application technologies of chemicals and related services are investigated. The toolbox includes the tools LCA, PRA, and EFA. Based on the case study perchloroethylene (PER) & dry cleaning and following an application technology and service development scheme for chemicals, toolbox specifications were investigated. The following four emission cases were differentiated: Normal case, accidental case, misuse case, and abuse case.

Two main steps within application technology and service development were distinguished in this thesis: "Situation Analysis" and "Product Development Cycle" consisting of different phases. Primarily the "Situation Analysis" and the first phase "Environmental Product Evaluation" of a chemical application in the development cycle were focused upon.

In the "Situation Analysis" step company internal and external environmental drivers were identified for a major PER producing chemical company (Dow Europe S.A.). In the "Environmental Product Evaluation" phase an understanding of external environmental drivers was pursued through the following quantitative studies dealing with the normal case:

- **A comparison of dry cleaning with PER, hydrocarbon solvent (HC), liquid carbon dioxide (CO₂), and wet-cleaning (H₂O)** performing an analysis of chemical and physical solvent properties of PER, HC and CO₂ as well as a comparative LCA of the four technologies. Based on a range of assumptions (e.g., new technologies, no accidents) PER and HC dry cleaning have a similar and average environmental performance compared to the other dry cleaning technologies. CO₂ dry cleaning looks better from an environmental point of view. Nevertheless, CO₂ is still at a development stage and therefore the results include a lot of uncertainties. Wet-cleaning has a worse environmental performance due to its relatively high energy consumption.
- **An evaluation of the most impacting processes over the life-cycle of PER** by performing a LCA and a mass-balance (MB) for PER. The electricity use at the dry cleaning facility and the transportation of textiles with a private car to and from the dry cleaner have been found to create major environmental impacts for PER dry cleaning (>60% and >13% respectively). PER emissions to air at the dry cleaner contribute little to the overall environmental impact (<2%). The main amount of PER emitted to air over the life-cycle is at the dry cleaning facility (17% of the totally consumed PER).
- **An evaluation of toxicological and ecological risks of PER emissions in the environment** by applying a PRA. No problems on a continental and regional level were found. On a local level some potential risks for people living adjacent to a dry cleaning facility exist (in Switzerland). Inappropriate technology standards or/and accidental/misuse/abuse scenarios can be responsible for this result.
- **An evaluation of the environmental fate of PER emissions to air** by applying an EFA. A range of metabolites (<80% phosgene leading to carbon dioxide and hydrochloric acid, <20% trichloroacetic chloride) are created potentially contributing to different environmental impacts (e.g., global warming, ozone depletion, acidification). The contribution to global and regional environmental effects is generally assumed to be negligible. Nevertheless, further investigations are necessary related to the environmental impact of trichloroacetic acid, being a metabolite of PER and future environmental risks due to ubiquitous presence of PER in the atmosphere.

The described quantitative environmental evaluations of PER used in dry cleaning did not consider the accidental, misuse or abuse scenarios. These scenarios were investigated qualitatively. It is shown that they provide significant information to understand external environmental drivers related to PER use in dry cleaning. Furthermore, some non-natural science based company external drivers can be understood when investigating qualitatively different types of risk perception of actors influencing the dry cleaning market.

Based on these experiences and results the following specifications for an integrated toolbox for chemical application development were put together:

- **Application sequence of tools (normal case):** Analysis of chemical & physical properties (of the considered chemical) → comparative LCA → LCA → MB → PRA → EFA.
- **Application extent of tools (normal case):** The analysis of chemical & physical properties of a chemical compound can be simplified through the use of checklists. A LCA can be approximated by an energy balance (EB) of the considered technology (and a MB of the considered chemical product). A PRA might be based on some first concentration and toxicity estimations (including monitoring data and safety factors). An EFA should in a first step only be performed for those environmental compartments to which (most of) the product is emitted.
- **Application responsibility (normal case):** PRA, LCA, and EFA should be performed by environmental experts. More simple tools such as checklists, MB or EB can be applied by product developers with natural science or engineering backgrounds.