

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH No 12259

Eco-Efficiency Evaluation of Waste Gas Purification Systems in the Chemical Industry

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

Presented by
MARKUS ANDREAS MEIER
dipl. Natw. ETH
born on 30 March 1967
citizen of Signau (Berne) and Waltenschwil (Aargau)

accepted on recommendation of
Prof. Dr. Konrad Hungerbühler, examiner
Prof. Dr. René Schwarzenbach, co-examiner
Prof. Dr. Renate Schubert, co-examiner
Dr. André Weidenhaupt, co-examiner

Zurich 1997



Date

Abstract

In the last few years, the chemical industry has begun to implement the ideas of sustainable development by applying, for example, the concept of integrated product and process development. In the iterative process of integrated product and process development, the companies fulfil their responsibility towards economy, ecology and society. Although proactive measures (*e.g.* substitution of toxic reactants or products) have begun to be realised in the chemical industry, end-of-pipe technologies reducing the remaining environmental impacts are still necessary. However, in the step towards integrated process and product development, these end-of-pipe technologies have to be evaluated in the socio-political, technical, ecological and economic contexts.

To develop and illustrate the integrated evaluation of end-of-pipe technologies, gas purification systems (GasPSs) have been chosen as a case study. The corresponding case-study waste gas stream originates from a biological treatment stage of an industrial waste water plant (Pratteln, Switzerland). In 1990, the waste gas stream had on average a volume of 57000 m³/h, a concentration of 200 mg/m³ and consisted of a mix of twenty different volatile organic compounds.

The decision-making process for the choice of the *most adequate* GasPS may be divided into two more or less independent decision levels. The first decision level evaluates different alternatives of gas purification technologies with respect to their compliance with clean air legislation and their technical feasibility. Based on these socio-political and technical evaluations, the following GasPSs were identified as possible alternatives for purifying the case-study waste gas stream: biofilter, activated carbon filter, catalytic incinerator and thermoreactor. The second decision level evaluates the selected GasPS alternatives with respect to their ecological and economic performance. This requires appropriate evaluation methods to prepare the decision-making process. This study focuses on the definition of appropriate ecological and economic performance indicators, and on the improvement of existing evaluation methods for the investigation of GasPSs. The ecological performance of GasPSs was evaluated using the life-cycle assessment methodology (LCA). For the impact assessment phase, the methods of Eco-Indicator 95 and Swiss Ecopoints were applied. Because both life-cycle impact assessment methods did not classify volatile organic compounds adequately, a new toxicity classification method had to be developed and integrated into both methods. The toxicity classification method was developed based on fate and exposure modelling using fugacity models. The volatile organic compounds were classified on the basis of a critical discharge flow, which was related to an adequate reference substance and defined as the substance discharge flow leading to an impairment of either humans or ecosystems. Finally, these new factors were introduced in the impact assessment methods mentioned above.

The ecological evaluation of the four GasPSs (*i.e.* biofilter, activated carbon filter, catalytic incinerator, thermoreactor) showed that the electricity use of the waste gas ventilators contributes more than 50% to the ecological burden. In the case of the activated carbon filter, the steam production is additionally important for the ecological burden (>20%). The use of furnace gas causes over 15% of the ecological burden of the catalytic incinerator and the thermoreactor.

The economic evaluation based on the Net Present Value (NPV) showed that the GasPSs may be ranked with respect to economic costs as follows: biofilter < catalytic incinerator < thermoreactor ~ activated carbon filter.

The ecological benefit (due to the elimination of volatile organic compounds from the waste gas stream), the ecological burden (due to the use of energy and materials) and the economic costs of GasPSs were combined to 'eco-efficiency' performance indicators. The Net Ecological Benefit (NEB_N) describes the ecological *effectiveness* of GasPSs (= reaching the goal of an overall ecological benefit), whereas the Ecological Yield Efficiency (lgEYE) represents the ecological *efficiency* of GasPSs (= low environmental costs for reaching this goal). The Ecological Economic Efficiency (EEE) finally combines the NEB_N of the GasPSs with the economic costs (NPV). For all investigated GasPSs, the median of Net Ecological Benefit (NEB_N) and the Ecological Yield Efficiency (lgEYE) was positive for both life-cycle impact assessment methods. A sensitivity analysis illustrated that the highest optimisation of the ecological performance is achieved by reducing the waste gas volume. Additionally, the ecological effectiveness and efficiency may significantly decrease, or even become negative, if the substance load in the waste gas stream decreases.

For the life-cycle assessment, a detailed quantitative uncertainty analysis using Monte Carlo simulation was performed. The uncertainty analysis enabled statements to be made about the uncertainty of the evaluation results and about the ranking significance of the GasPSs with respect to the performance indicators. For all GasPSs, the ecological burden varies by a factor of 1.3, whereas the ecological benefit by a factor of 1.5 (15% to 85%-percentiles). Based on a ranking significance of 80%, the GasPSs may be ranked with respect to the Net Ecological Benefit (NEB_N) as follows: biofilter ~ activated carbon filter ~ catalytic incinerator > thermoreactor. With respect to the Ecological Yield Efficiency (lgEYE), the corresponding ranking is: biofilter > activated carbon filter > catalytic incinerator > thermoreactor.

The uncertainty analysis additionally revealed that (1) the choice either of both life-cycle impact assessment methods does not affect the relative ranking of the GasPSs, (2) the aggregation of inventory data to an overall environmental score represents a trade-off between smoothing uncertainties in the inventory step and adding new uncertainties through aggregation factors, and (3) the correlation of various uncertainties in the ecological evaluation (e.g. due to the use of same valuation factors) has a high influence on the ranking significance.

Finally, the integration of the ecological and economic evaluations showed that the performance with respect to the effectiveness (NEB_N , NPV) and with respect to the efficiency (lgEYE, EEE) complement each other in the overall evaluation. The overall integration using an ABC-analysis revealed that the following overall ranking is possible: biofilter >> catalytic incinerator > activated carbon filter >> thermoreactor.

The results show that end-of-pipe technologies in the chemical industry have to be evaluated in the socio-political and the technical context on the one hand, and in the ecological and the economic context on the other. The defined performance indicators and the adapted evaluation methods allow an integrated evaluation of gas purification systems with respect to their effectiveness and efficiency. Although the evaluation methods involve many uncertainties, the quality of the results were enhanced by a detailed uncertainty analysis.

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren werden in der chemischen Industrie die Bestrebungen der nachhaltigen Entwicklung zunehmend umgesetzt. Durch die Verpflichtung zur integrierten Produkt- und Prozessentwicklung nehmen Chemieunternehmen ihre Verantwortung gegenüber der Ökonomie, Ökologie und der Gesellschaft wahr. Auch wenn proaktive Massnahmen (z.B. Substitution von toxischen Edukten und Produkten) zunehmend zu einer Reduktion von Emissionen an der Quelle führen, sind auch in Zukunft nachsorgende Massnahmen (End-of-Pipe Lösungen) zur Reduktion der verbleibenden Emissionen in die Umwelt notwendig. Im Rahmen der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung müssen diese technischen Umweltschutzmassnahmen bezüglich ihrer gesetzlichen, technischen, ökologischen und ökonomischen Verträglichkeit beurteilt werden. Zur Entwicklung einer entsprechenden integrierten Beurteilungsmethode wurde in dieser Arbeit das Fallbeispiel von Abluftreinigungsanlagen (GasPSs) gewählt. Der Referenzabluftstrom entstammt der biologischen Reinigungsstufe einer industriellen Abwasserreinigungsanlage. Im Jahr 1990 setzte sich das Abluftgemisch aus 20 verschiedenen leichtflüchtigen, organischen Substanzen (VOC) zusammen (Konzentration: 200 mg/m^3 ; Abluftvolumen: $57'000 \text{ m}^3/\text{h}$).

Der Entscheidungsprozess zur Auswahl der geeigneten GasPS kann in zwei unabhängige Entscheidungsebenen strukturiert werden. Die erste Ebene beurteilt die verschiedenen Abluftreinigungsverfahren bezüglich der Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen und der technischen Machbarkeit. Aufgrund dieser Beurteilungen, können folgende GasPSs als mögliche Alternative zur Reinigung des Referenzabluftstromes in Betracht gezogen werden: Biofilter, Aktivkohlenfilter, katalytische Abluftoxidation und Thermoreaktor. Auf der zweiten Entscheidungsebene werden die ausgewählten GasPSs bezüglich ihres ökologischen Nutzens und ihrer ökonomischen Kosten beurteilt. Die Entwicklung von geeigneten Indikatoren und ökologischen Beurteilungsmethoden von GasPSs bildet dabei den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

Die GasPSs wurden mit Hilfe der Ökobilanzmethode beurteilt, wobei der Eco-Indicator 95 und die Methode der ökologischen Knappheit (Stoffflussmethode) zur ökologischen Bewertung verwendet wurden. Da beide Bewertungsmethoden die toxischen Auswirkungen von VOCs nicht zufriedenstellend berücksichtigten, wurde eine neue Klassifikationsmethode für die toxische Auswirkungen von VOCs entwickelt. Diese neue Klassifikationsmethode beurteilt die VOCs aufgrund ihres Umweltverhaltens (Verteilung, Exposition) und aufgrund ihrer toxischen Wirkung. Zur Berechnung von Gewichtungsfaktoren wurden kritische Emissionsflüsse in die Umwelt für die einzelnen Substanzen bestimmt. Erreicht eine Substanz ihren kritischen Emissionsfluss, so treten Schäden beim Menschen oder in der Umwelt auf. Die neuen Gewichtungsfaktoren wurden schliesslich in die beiden Ökobilanzbewertungsmethoden integriert.

Die ökologische Beurteilung der vier ausgewählten GasPSs zeigte, dass der Stromverbrauch der Abluftventilatoren mehr als 50% zu den ökologischen Belastungen beiträgt. Im Falle des Aktivkohlenfilters trägt zudem der Dampfverbrauch entscheidend zur ökologischen Belastung bei (>20%). Der Erdgasverbrauch der katalytischen Abluftoxidation und des Thermoreaktors macht einen Anteil von über 15% von deren ökologischen Belastungen aus.

Die ökonomische Beurteilung basierend auf der Kapitalwertmethode (NPV, Net Present Value) zeigte, dass die Anlagen bezüglich der ökonomischen Kosten wie

folgt eingestuft werden können: Biofilter < katalytische Abluftoxidation < Aktivkohlenfilter ~ Thermoreaktor.

Zur Beurteilung der 'Ökoeffizienz' von GasPSs wurden deren ökologische Nutzen (infolge der Elimination von VOCs), deren ökologische Belastung (infolge des Verbrauchs von Energie und Materialien) und deren ökonomischen Kosten zu geeigneten Indikatoren kombiniert. Der Gesamtnutzen (NEB_N , Net Ecological Benefit) umschreibt die ökologische Effektivität der GasPS (wird das verfolgte Ziel überhaupt erreicht?), wobei die ökologische Ausbeute (lgEYE, Ecological Yield Efficiency) die ökologische Effizienz charakterisiert (wie gross ist die ökologische Belastung, um das Ziel zu erreichen?). Die ökologisch-ökonomische Effizienz (EEE) verbindet schliesslich den NEB_N mit den ökonomischen Kosten (NPV). Die Berechnungen aufgrund beider Ökobilanzmethoden zeigten, dass sowohl der Median des NEB_N als auch des lgEYE für alle untersuchten GasPSs positiv ist. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass das grösste Optimierungspotential für die GasPSs in der Reduktion des Abluftvolumens besteht. Im Fall sinkender Schadstoffbelastung in der Abluft, können sich die Effektivität und die Effizienz von GasPSs signifikant verschlechtern oder sogar negativ werden.

Mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation wurde für die Ökobilanz eine detaillierte Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Dadurch wurden zusätzliche Aussagen über die Unsicherheit der Resultate und über die relative Einstufung der GasPSs möglich. So variiert die ökologische Belastung für alle GasPSs mit einem Faktor von 1.3 und der ökologische Nutzen mit einem Faktor 1.5 (15% bis 85% Perzentile). Mit einer Signifikanz von 80% können die GasPSs aufgrund ihres Gesamtnutzens (NEB_N) folgendermassen eingestuft werden: Biofilter ~ Aktivkohlenfilter ~ katalytische Abluftoxidation > Thermoreaktor. Gemäss der ökologischen Ausbeute (lgEYE) ergibt sich folgende Einstufung: Biofilter > Aktivkohlenfilter > katalytische Abluftoxidation > Thermoreaktor.

Die Unsicherheitsanalyse zeigte zudem, (1) dass die Wahl der verwendeten Ökobilanzbewertungsmethode die relative Einstufung nicht beeinflusst, (2) dass die Aggregation von Emissionsdaten zu einem einzigen Belastungsindikator die Unsicherheit in den Emissionsdaten ausmittelt, jedoch zusätzlich neue durch die Aggregation bedingte Unsicherheiten hinzufügt, (3) dass die Korrelation von Unsicherheiten in der ökologischen Beurteilung (z.B. Verwendung derselben Gewichtungsfaktoren) die Signifikanz der relativen Einstufung entscheidend beeinflusst.

Die Integration der ökologischen und der ökonomischen Betrachtung zeigte, dass sich die Beurteilungen bezüglich der Effektivität (NEB_N , NPV) und der Effizienz (lgEYE, EEE) gegenseitig ergänzen. Mithilfe einer ABC-Analyse konnte schliesslich die folgende, gesamthafte Einstufung erfolgen: Biofilter >> Aktivkohlenfilter > katalytische Abluftoxidation >> Thermoreaktor.

Die Resultate dieser Arbeit verdeutlichen, dass technische Umweltschutzmassnahmen bezüglich den gesetzlichen Anforderungen und der technischen Machbarkeit einerseits und andererseits bezüglich ihres ökologischen Nutzens und der ökonomischen Kosten beurteilt werden müssen. Die definierten 'Ökoeffizienz' Indikatoren und die Weiterentwicklung der Beurteilungsmethoden erlauben in Zukunft eine integrierte Betrachtung von Abluftreinigungsanlagen in Bezug auf deren Effektivität und deren Effizienz. Wenn auch die Beurteilungsmethoden viele Unsicherheiten beinhalten, so konnte die Qualität der Resultate durch eine detaillierte Unsicherheitsanalyse verbessert werden.