

Diss. ETH Nr. 17665

**Computergestützte Berechnung  
ökonomischer und ökologischer Kennzahlen  
in vernetzten Systemen**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN  
der  
ETH ZÜRICH

vorgelegt von

DANIEL XAVER GANTNER  
Dipl. Betr.- u. Prod.-Ing. ETH  
geboren am 17. Juni 1977  
von Flums SG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Urs Meyer, Referent  
Prof. Dr. Konrad Wegener, Korreferent

2008

## Zusammenfassung

Die Prozess-Orientierte Analyse (POA) ist ein grafisches Tool zur Analyse, Entwicklung und Dokumentation vernetzter Systeme. Seine Stärke ist die Visualisierung komplexer Prozessabläufe. Dies wird durch eine Vielzahl von marktgängigen Computerprogrammen unterstützt. Was die quantitative Analyse betrifft, kann diese mit POA von Hand durchgeführt werden. Die Rechengrundsätze sind in der Methode integriert, nicht jedoch die Umsetzung durch ein Computerprogramm. Weder monetäre, noch energetische und andere umweltrelevanten Betrachtungen sind quantitativ durchführbar und liefern Resultate. Die nötigen Algorithmen zur Berechnung dazu fehlen für die Ausführung durch ein Computerprogramm.

Quantitative Betrachtungen müssen in einer Tabellenkalkulation wie Excel durchgeführt werden, was in vielerlei Hinsicht nicht befriedigend ist. Die Vernetzung des Systems ist in Excel nicht mehr erkennbar. Es erfolgt keine Prüfung der Konsistenz des modellierten Systems. Zirkelschlüsse, welche bei der Aufarbeitung von Ausschuss in der Produktion und Recycling häufig auftreten, werden erkannt, deren Lösung aber nicht unterstützt. Auch prüft Excel nur die Lösbarkeit von Gleichungssystemen, bietet aber keine Hilfe an, wie ein überbestimmtes System korrigiert werden kann. Zudem ist das Erstellen eines Modells, welches sämtliche Abhängigkeiten berücksichtigt, sehr aufwendig.

Das Ziel dieser Arbeit besteht deshalb darin, POA mit den nötigen Algorithmen zu hinterlegen. Ein einziges Computerprogramm soll sämtliche Anwendungen anbieten können, von der Visualisierung und Dokumentation bis hin zur Konsistenzprüfung und Berechnung des Modells.

Das Erstellen und Verändern eines Modells mit POA kann zu inkonsistenten Ausprägungen führen, die keinen Sinn ergeben und von einem Computerprogramm nicht mehr gelöst werden können. Deshalb werden die Voraussetzungen definiert, die ein Modell erfüllen muss, damit die darauf aufbauenden Berechnungen überhaupt sinnvoll sind. Es werden die nötigen Algorithmen entwickelt, um diese Voraussetzungen computergestützt zu prüfen. Ein weiterer Algorithmus wird

formuliert, um das Modell in einer Form vorliegen zu haben, welche als Datenstruktur für die Berechnungen genutzt werden kann. Dieses Modell beschreibt das System in Form eines Gleichungssystems und dient als Grundlage für die Berechnungen.

Anschliessend werden Algorithmen zur Berechnung ökonomischer und ökologischer Kennzahlen aufgestellt. Neben dem Berechnen von Flusswerten ist das Beurteilen der Bestimmbarkeit des Modells von zentraler Bedeutung, insbesondere das Überführen eines überbestimmten Modells in ein bestimmtes. Die Validierung der Algorithmen erfolgt anhand elementarer Netzwerkstrukturen. Aus diesen kann jede Netzwerkstruktur von beliebiger Komplexität hergeleitet werden.

Schliesslich liegt ein computergestütztes Rechenverfahren vor, welches hierarchische Modelle ebenso löst wie vernetzte Modelle. Die nötigen Voraussetzungen für die Konsistenz eines Modells sind definiert und dessen Prüfung durch Algorithmen beschrieben. Zudem werden vom Rechenverfahren die Gleichgewichtsgrundsätze von POA sowie die weiteren in POA definierten Regeln eingehalten.

Die Interaktion zwischen dem Ersteller des Modells und dem Computerprogramm ist eindeutig geregelt. Die Laufzeit der Algorithmen ist dem Verwendungszweck des Computerprogramms angepasst. Eine interaktive Unterstützung des Modellerstellers beim Modellieren von Systemen, insbesondere beim Auftreten von inkonsistenten oder überbestimmten Modellzuständen, erleichtert die Arbeit.

Die praktische Anwendung in Produktions- und Dienstleistungsbetrieben erfolgt über den Einbau der Algorithmen in ein grafisches Computerprogramm zur Modellierung und Darstellung von Diagrammen. Damit entsteht ein Werkzeug zur grafischen Behandlung von Kosten- und Energiebilanzen mit integrierter Berechnung. Nutzen für den Anwender entsteht in der Steigerung der Effizienz im Betrieb, der Planung neuer Anlagen, der Dokumentation der Abläufe und Steuerungen, der Beurteilung der Sicherheit von Anlagen, der Kommunikation sowie der ökologischen Bewertung des Unternehmens. Die Anwendung von POA mit den Berechnungen setzt ein benutzerfreundliches Computerprogramm voraus. Die entsprechenden Komfortfunktionen wurden inzwischen entwickelt, das Programm zur kommerziellen Nutzung freigegeben.

## **Abstract**

The Process Oriented Analysis (POA) is a graphical tool for analysis, development and documentation of systems in form of a network. Its strength is the visualization of complex processes and workflows. This is supported by many commercially available computer programs. In addition, POA carries out a quantitative analysis. However, this has to be done manually. There are no computer programs available with integrated calculations for monetary, energetic or other environmental analysis and depicting of the results. The necessary algorithm to carry out such a calculation in a graphical visualized, hierarchical network is missing.

Quantitative analysis have to be carried out in a spreadsheet calculation as Excel. Which is not at all satisfactory. A system in form of a network is not recognizable in Excel. There is no consistency check of the modeled systems. Circular calculations, that occur often in production when reworking reject or recycling material, are recognized. But there is no help in finding a solution. Excel recognizes is a equation system is solvable. However, if the system is overdefined, the model's designer has to such himself how to solve the problem. In addition, the consideration of all connections and interlinked conditions makes the modeling very complex and time-consuming.

The goal of thesis is to develop algorithms, based upon the graphical method of the Process Oriented Analysis (POA). A single computer program shall offer all applications, from visualization and documentation up to consistency check and calculation of a model.

The creation and changing of a POA model may lead to inconsistency that cannot be solved by a computer program any more. Requirements for a model are defined in order to enable the calculations based on it. An algorithm has to be developed to check these requirements by a computer program. In addition, an algorithm is set up to transform the model into a form that is usable as a data base for calculations. This leads to an equation system that describe the system and serves as a base for the calculation.

The economical and ecological figures are calculated within a calculation cycle, the algorithm for which has to be developed. On one hand, the calculation for the flow values takes place. On the other hand, the determinability of the model is crucial, especially the transfer of an over-defined model into a definable model. The validation of the developed algorithm is carried out by elementary network structures. Every kind of network structure of every degree of complexity can be derived from these elementary network structures.

Eventually, a computer based calculation method is available that can solve models with hierarchical structures as well as in form of networks. The necessary requirements for the consistency of a model are defined and the check by algorithm described. The calculation method complies to the principle of balance of POA and the other rules defined by POA.

The interaction of the model's designer and the computer program is clearly set. The run-time of the algorithm is adjusted to the application of the computer program. The interactive help of the model's designer when modeling a system facilitate the work. This is especially the case, when inconsistency or overdefined model states occur.

By integrating the algorithm into a graphical computer program for modeling and depicting diagrams, a tool for graphical cost and energy calculation in combination with diagrams emerges. The benefit for the user lies within the rise of the efficiency in the enterprise, the planning of new plants, the documentation of manufacturing and control processes, the evaluation of security of plants, the communication as well as the ecological assessment of an enterprise. The practical application of POA with integrated calculations requires a user-friendly computer program. In the meantime, the corresponding comfort functions of such a program have been development into a computer program and is now commercially available.