EnviroInfo 2000: Umweltinformatik '00 Umweltinformation für Planung, Politik und Öffentlichkeit
Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

Einbettung von Transportmodellen und diskreten Simulationsmodellen in Stoffstromnetze

Volker Wohlgemuth[1] und Bernd Page[1]

Abstract

Material Flow Networks provide a wide range of options for describing and representing complex material flow systems and evaluating them efficiently for environmental management. Thus, many of the properties and much more of the scope resulting from the Material Flow Network approach can be used to gain a better insight into production, consumption, transport, waste treatment, etc. processes with regard to their effects on the environment. In Material Flow Networks these processes are represented by transitions, which are describing material transformations associated with these processes. They play a vital role in Material Flow Networks. In correspondence with the theoretical foundations of the Material Flow Network approach a material transformation can be specified using rather sophisticated models. In this sense this paper provides two examples how Material Flow Networks can be extended using methods from completely different fields of computer science. Both examples are technically based on Microsoft's Active Scripting architecture and are further using Microsoft's Component Object Model (COM). The first example describes how methods from the field of Operations Research can be used to specify a transition. It deals with a material flow analysis of a trading company and focuses on the optimisation of the route plan for the delivery of goods to the company's branches. This example shows the use of writing a script using the Python programming for specifying a transition. The second example describes the use of a discrete event simulation model (a factory where bottles are delivered for cleaning, refilling, packing and selling) within a Material Flow Network. It illustrates the combination of material and energy flow information with more dynamic performance indicators like throughput, average waiting times or mean service times.

1. Einführung

Betrieblicher Umweltschutz rückt seit längerer Zeit immer mehr in das Bewußtsein der Entscheidungsträger in einem Unternehmen. Dies liegt zum einen am zunehmenden Umweltbewusstsein der Verbraucher als auch an der sich stetig verschär-

[1] Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik (ASI), Vogt-Kölln-Str. 30, 22527 Hamburg.
Email: wohlgemuth | page@informatik.uni-hamburg.de.

fenden Umweltgesetzgebung. Ziel dabei ist die kontinuierliche Verbesserung der betrieblichen Umweltschutzleistungen. Dazu gehören hauptsächlich die Verringerung der Umweltbelastungen und die Optimierung des Ressourceneinsatzes. Außerdem wird in vielen Unternehmen erkannt, dass eine Berücksichtigung der betrieblichen Umweltauswirkungen auch einen ökonomischen Stellenwert besitzt, so dass sich der Schwerpunkt des Umweltmanagements der Betriebe von der Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen und Gesetzesvorgaben immer mehr zur stärken Berücksichtigung der monetären Bewertung der Umweltauswirkungen hin verschiebt (Letmathe 1998, 21).

Eine Realisierung eines derartigen aktiven und integrierten Umweltschutzes bedingt eine Analyse der umweltbezogenen Zusammenhänge entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die bei dieser Analyse zu berücksichtigenden technisch-wirtschaftlichen Entscheidungszusammenhänge beziehen sich sowohl auf bereichs- und betriebsübergreifende als auch auf stoff- und medienübergreifende Maßnahmen zur Vermeidung oder zumindest zur Verminderung von Umweltbelastungen. Eine solche Erfassung und Analyse der mit der Herstellung eines Produktes oder der Erzeugung mehrerer Produkte an einem Standort verbundenen Umweltauswirkungen in Form von Stoff- und Energieströmen führte zur Idee des Stoffstrommanagements (Enquête-Kommission 1994). Leider sind die Vorgänge und Prozesse, die entlang der Wertschöpfungskette eines Produktes oder an einem Betriebsstandort zu umweltrelevanten Stoffströmen führen, nicht gerade einfach zu fassen und zu beschreiben. Eine derartige Unterstützung des betrieblichen Umweltschutzes bedarf aufgrund der Komplexität und des hohen Vernetzungsgrades des betrieblichen Handels der Computerunterstützung und stellt eine große Herausforderung an die Angewandte Informatik dar. Basis einer Computerunterstützung des betrieblichen Umweltschutzes ist eine Abbildung der betrieblichen Abläufe in einem Unternehmen oder der mit einem Produkt zusammenhängenden Prozesse und der hiermit verbundenen Auswirkungen in einem Computermodell. Aufbauend auf diesem Modell kann eine betriebliche Stoffstromanalyse erfolgen, die die für das modellierte System relevanten Stoff- und Energieströme mengenmäßig erfasst, was dann der Sachbilanz im Rahmen einer Ökobilanzierung entspricht. Auf der so gelegten Basis können weitere Auswertungen in Form von Kennzahlensystemen zur Bewertung der Umweltauswirkungen oder aber Kostenanalysen vorgenommen werden.

2. Stoffstromnetze

Im betrieblichen Produktionsbereich hat sich die graphentheoretische Methodik der Stoffstromnetze mittlerweile zur Modellierung der Stoff-, Energie- und Güterflüsse mit ihren Betriebszuständen als ein Funktionsbereich des Stoffstrommanagements etabliert (Rautenstrauch 1999, Schmidt und Häuslein 1997). Stoffstromnetze beruhen auf dem aus der Theoretischen Informatik stammenden Konzept der Petrinetze

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

und übernehmen dessen Definition eines Netzes[2]. Insofern gelten nun für Stoffstromnetze im Allgemeinen dieselben Definitionen und Regeln wie für Petrinetze auch. Allerdings unterscheiden sich Petrinetze und Stoffstromnetze in Bezug auf ihr dynamisches Verhalten. Während in einem Petrinetz Transitionen „feuern“, wenn Vor- und Nachbedingungen erfüllt sind und Kapazitätsbeschränkungen im Umfeld der entsprechenden Transition nicht verletzt werden (Baumgarten 1996, 81), begnügt man sich bei Stoffstromnetzen mit dem einmaligen Schalten einer Transition innerhalb der betrachteten Berechnungsperiode. Folglich fehlt hier der direkte Ereignisbezug des Schaltens einer Transition und somit streng genommen ein wesentliches Merkmal von Petrinetzen, wie sie ursprünglich zur Modellierung und Regelung dynamischer Systeme entwickelt worden sind. „Eine Schaltregel kann daher für Stoffstromnetze nicht angegeben werden“ (Möller 2000, 79). Stoffstromnetze verwenden somit die statische Struktur und das Lokalitätsprinzip der Petrinetze und kombinieren diese mit den Ansätzen der doppelten Buchführung.

Stoffstromnetze interpretieren Petrinetze daher in anderer Form, indem sie ihren Schwerpunkt auf die Erhebung, Verdichtung und Auswertung *periodenbezogener* Umweltdaten legen. Auf diese Weise können zustandsbezogene Daten mit periodenbezogenen Daten verknüpft werden. Dabei bestehen die Stroffstromnetze aus zwei Kategorien von Knoten, den Stellen und Transitionen (Möller 2000, 77):

1. Die Knoten der ersten Kategorie nehmen Stoff- und Energiebestände auf und stellen eine Idealisierung dar: Was eingebracht wird, kann auch wieder entnommen werden. Nichts geht verloren, nichts entsteht neu. Ein solcher Ort der Lagerung wird in Anlehnung an die Petri-Netz-Terminologie *Stelle* genannt. Allgemein erfolgt mit einer Stelle die Modellierung eines Zustands. Hier finden somit keine Materialumwandlungen statt, sondern nur das Halten und Verteilen von Energie- und Stoffbeständen. Es gibt ferner noch Sondertypen, u.a. die Input- und Outputstellen. Diese Stellen bilden die Grenzen des analysierten Systems, hier betreten oder verlassen Stoffe den betrachteten Modellraum.
2. Die Konten der zweiten Kategorie stehen stellvertretend für stoffliche und energetische Umwandlungsprozesse. Der Ort einer solchen Transformation wird *Transition* genannt. Sie nehmen dabei in den Stoffstromnetzen eine zentrale Rolle ein: Aus verschiedenen Stoffen auf der Inputseite entstehen nach vordefinierten Umwandlungsvorschriften neue Stoffe und/oder Energien als Ergebnis. Hier finden somit auch die aus der Produktionstheorie bekannten Produktionskoeffizienten Verwendung. Die Transition stellt somit eine *Aktivität* dar.

---

[2] Ein Netz (net) wird definiert als ein Tripel N = (S,T,F) wobei gilt:
$S \cap T = \emptyset$, $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$.
Die Elemente der Menge S werden als *Stellen* bezeichnet, die Elemente der Menge T heißen *Transitionen*. Die Elemente der Flussrelation F heißen *Kanten* (Baumgarten 1996, 50).

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

Die Pfade der Stoff- und Energieströme werden durch Verbindungen zwischen Stellen und Transitionen dargestellt (Abbildung 1). Damit geht gemäß der zu Grunde liegenden Petrinetzmethodik gleichzeitig eine systematische Einschränkung möglicher Verbindungen zwischen den Knoten einher. Es sind nämlich keine direkten Verbindungen zwischen zwei Stellen oder zwischen zwei Transitionen möglich. Deshalb passt der Begriff Lager für die Stellen nicht immer. Die Stellen dienen einerseits dazu, die Orte der Transformation voneinander abzugrenzen. Gleichzeitig werden die einzelnen Transitionen über die Stellen miteinander verbunden, so dass größere Netze modelliert werden können. Die Stellen erlauben es dann, zeitliche Differenzen zwischen verschiedenen Transitionen abzubilden.

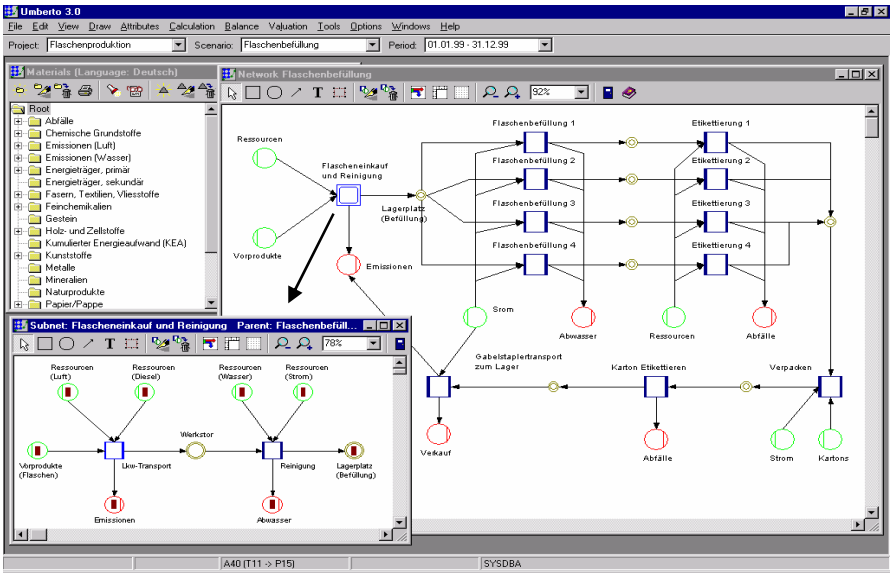

Abbildung 1
Ein Stoffstromnetz [3]

Ein Stoffstromnetz, das einen Betrieb oder Produktionslebensweg darstellt, liefert dann für eine bestimmte Betrachtungsperiode und bei gegebenen Anfangsbeständen Aussagen darüber, welche Stoff- und Energieströme wo in diesem System fließen und welche Endbestände daraus resultieren. Diese Strom- und Bestandsdaten stehen dann weiteren Auswertungen zur Verfügung.

---

[3] Das abgebildete Stoffstromnetz wurde mit dem Softwarewerkzeug Umberto® modelliert. Umberto® ist ein Kooperationsprodukt des ifu Institut für Umweltinformatik GmbH, Hamburg und des ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg. Zur weiteren Information siehe www.ifu.com.

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

Es sei hier auch angemerkt, dass aufgrund der den Stoffstromnetzen zugrundeliegenden Petrinetzmethodik eine hierarchische Vorgehensweise, die sowohl top-down als auch bottom-up orientiert sein kann, bei der Modellierung eines Betriebs mit all ihren Vorteilen durchgeführt werden kann. Das führt dann zu den sogenannten hierarchischen Stoffstromnetzen mit dem Vorteil der Komplexitätsreduktion und einer verbesserten Übersichtlichkeit. Beispielsweise wird im linken unteren Teil der Abbildung 1 ein Stoffstromnetz dargestellt, welches die Transition „Flascheneinkauf und Reinigung“ verfeinert (Wohlgemuth und Page 1999, 37).

Softwarewerkzeuge auf der Basis von Stoffstromnetzen bieten daher eine gute Unterstützung des betrieblichen Umweltschutzes, indem sie es erlauben, einen Betrieb nicht mehr als „Black Box“ anzusehen. Es ist mit ihnen möglich, die einzelnen Stoffumwandlungsprozesse und –ströme in einem komplexen Betrieb bis auf die Ebene eines einzelnen Prozesses oder einer einzelnen Maschine aufzuzeigen, so dass eine ökologische Schwachstellenanalyse optimal unterstützt wird. Als betriebswirtschaftliche Kennzahlen erhält der Benutzer mengenmäßige Informationen zu den Stoffen und Beständen in Form einer Ökobilanz mit entsprechenden Kosteninformationen und ggf. weiteren Kennzahlen. Außerdem ist es mit auf Stoffstromnetzen basierten Softwarewerkzeugen möglich, auf einheitlicher Datengrundlage sowohl betriebliche Stoffstromanalysen als auch Analysen des Lebensweges eines Produktes durchzuführen.

3. Erweiterungsmöglichkeiten von Stoffstromnetzen

Eine wesentliche Aufgabe bei der Durchführung von Stoffstromanalysen auf der Basis von Stoffstromnetzen ist die Spezifikation von Transitionen. Die Transitionen stehen stellvertretend für stoffliche und energetische Umwandlungsprozesse. Sie nehmen deshalb in Stoffstromnetzen eine zentrale Rolle ein. Bis vor kurzem konnten solche Spezifikationen mit dem Softwarewerkzeug Umberto® auf folgende Arten erfolgen (Möller 2000):

1. mittels linearer Produktionskoeffizienten,
2. durch einen Satz von Funktionen und
3. wiederum durch ein Stoffstromnetz (wie bereits in Abbildung 1 gezeigt).

Seit der Version 3.2 bietet Umberto® aber auch die Möglichkeit, komplexe Algorithmen innerhalb einer Transition mittels eines Skriptes zu „programmieren“. Auf diese Weise ist der Benutzer theoretisch kaum mehr hinsichtlich der Möglichkeiten beschränkt, energetische und stoffliche Transformationen innerhalb einer Transition zu beschreiben. Dieser Ansatz entspricht somit der schon länger an Werkzeuge im Umweltbereich gestellten Forderung nach Offenheit und Verwendungsmöglichkeit unterschiedlichster Methoden (Page et al. 1997). Auf diese Weise wäre es somit recht einfach realisierbar, beispielsweise das Produktionssystem einer Färberei

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

(Tuma et al. 1997) mittels eines Fuzzymodells in der Programmiersprache Python in der Transition eines Stoffstromnetzes abzubilden. Voraussetzung wäre nur, dass das Fuzzymodell eben als Transitionsspezifikation fungiert, indem es Input- und Outputstoffströme in qualitativer und quantifizierter Form an das Stoffstromnetz über eine Schnittstelle zurück liefert. Erreicht nun der Berechnungsalgorithmus die so spezifizierte Transition wird das entwickelte Fuzzymodell automatisch ausgeführt. In diesem Sinne stellt eine mittels eines Skriptes definierte Transitionsspezifikation eine Komponente dar, welche vom Stoffstromnetz verwendet wird. Auf Basis dieser von der Komponente berechneten Daten kann der Benutzer dann trotz Verwendung einer nicht stoffstromnetzimmanenten Methodik zur Transitionsspezifikation die gesamte Funktionalität des Softwarewerkzeuges Umberto® verwenden wie z.B. das Erstellen von Stoffstrombilanzen, der Verwendung von Kennzahlensystemen oder den graphischen Darstellungsmöglichkeiten. Die Anwendung derartiger eigener Modulkomponenten für Transitionsspezifikationen erfolgt dann, ohne das Softwarewerkzeug wechseln zu müssen und ohne sich mit Problemen mit dem Datenaustausch herumschlagen zu müssen. Gleichzeitig können diese mittels eines Skriptes definierten Transitionsspezifikationen sogar in einer Bibliothek zur Wiederverwendung bereit gestellt werden. Umgekehrt kann dann auch vom Stoffstromnetzwerkzeug auf externe Komponenten wie Tabellenkalkulationsprogramme, Textverarbeitungsprogramme etc. zugegriffen werden, die ggf. sogar auf entfernten Rechnern ausgeführt werden könnten.

Voraussetzung für eine derartige Interaktion zwischen dem Stoffstromnetz, genauer gesagt, dem Berechnungsalgorithmus, und einer Komponente zur Transitionsspezifikation ist eine Schnittstelle (Interface), die gängigen Komponentenarchitekturen folgt. Die von Umberto® realisierte Komponentenarchitektur folgt Microsofts ActiveX/(D)COM-Architektur[4]. Dabei stellt eine (D)COM-Komponente eine Klasse dar, die als Sammlung von Methodenaufrufen zu verstehen ist, von denen die jeweils zusammengehörigen zu einer Schnittstelle zusammengefasst werden (Griffel 1998, 80). Für den Zugriff und die Modifikation der Elemente eines Stoffstromnetzes stellt Umberto® eine COM-Schnittstelle bereit, auf die von anderen Applikationen zugegriffen werden kann, und registriert diese automatisch beim Betriebssystem. Über eine eindeutige Referenz, der CLSID, erfolgt dann intern der Zugriff auf diese COM-Objekte. Umberto® definiert für alle wesentlichen Stoffstromnetzelemente wie z.B. Flussgrößen, Bestandsinformationen, Transitionsparameter etc. ein entsprechendes COM-Interface, so dass man bei diesen Objekten quasi von „Business-Objekten“ sprechen kann. Andere Programme oder sogar das Skript einer Transition können diese Business-Objekte dann ansprechen (Abbildung 2).

Die Anbindung des Skript-Mechanismus in Umberto® erfolgt ebenso gemäß der beschriebenen Architektur über die von Microsoft entwickelte Komponente „Script

[4] Hierbei steht (D)COM für (Distributed) Component Object Model.

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

Control“. Diese Komponente vermittelt zwischen der Anwendung, die ein Skript ausführen möchte, und der verwendeten Skriptsprache, wobei sich die Skriptsprache jedoch an den Active Scripting Standard von Mircosoft halten muss. Die Interpretation des Programmskriptes wird vom Microsoft Script Control überwacht. Dabei handelt es sich um eine Scripting Engine, die den Aufruf von DLLs für die jeweilige Skriptsprache regelt und die Interpretation des Skriptes kontrolliert. Unterstützte Skriptsprachen vom Script Control sind u.a. VBScript, Jscript, Python, Pearl und Rexx. Andere Skriptsprachen können bei einer entsprechenden DLL jedoch konfiguriert und nutzbar gemacht werden.

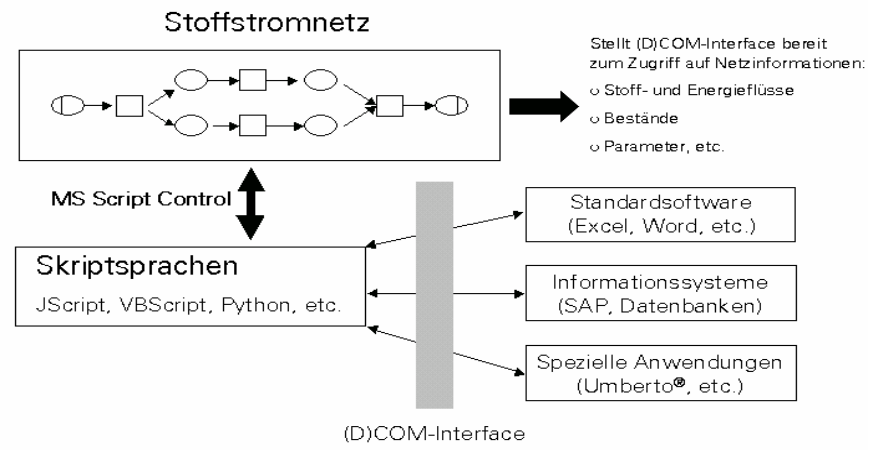

Abbildung 2
Technische Grundlagen des Skriptingmechanismuss in Stoffstromnetzen

Es sei hierzu noch abschließend betont, dass dieser skriptgesteuerte Ansatz nicht die methodischen Grundlagen der Stoffstromnetze verletzt, sondern konzeptionell eine Erweiterung der Möglichkeiten zur Transitionsspezifikation darstellt. Die Verwendung der Standardarchitektur (D)COM erlaubt es, andere Komponenten, in das Stoffstromnetz zu integrieren, solange diese das COM-Modell unterstützen. Dieses ist insofern von Bedeutung, als typischerweise die für Stoffstromanalysen relevanten Daten im Unternehmen in unterschiedlichen Formaten und Informationssystemen verstreut sind (Möller et al. 1997). Hier wäre die Komponententechnik ein Ansatz, unterschiedliche Datenbestände zu integrieren. Außerdem erlaubt es der beschriebene Mechanismus, Modelle als Komponenten im Stoffstromnetz zu verwenden, die ggf. für bestimmte Fragestellungen besser geeignet sind als die Stoffstromnetze.

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

4. Anwendungsbeispiele

Zur Illustration der Kopplung von Stoffstromnetzen mit anderen Komponenten bzw. der Verwendung des Skriptingmechanismusses in Transitionsspezifikationen werden im Folgenden zwei Anwendungsbeispiele beschrieben, die auf der Basis von Diplomarbeiten an unserem Arbeitsbereich entwickelt worden sind (Hefter 1999, Kempe 2000). Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt hauptsächlich auf dem Gebiet der technischen Machbarkeitsanalyse.

4.1 Einbettung von Tourenplanungsmodellen in Stoffstromnetze

Umweltmanagement kann auch durch den Einsatz von Methoden des Operations Research unterstützt werden, indem beispielsweise Tourenpläne im Bereich der Distribution optimiert und so die Gesamtemissionen der mit der Distribution verbundenen Transporte reduziert werden. Verwendet man hierbei noch Kosteninformationen, kann die Verknüpfung von Methoden des Operations Research mit der stofflichen Betrachtungsweise zu einer engeren Verzahnung von Ökonomie und Ökologie führen.

Als ein Beispiel hierfür betrachten wir das Distributionssystem eines Handelsunternehmens (Möller et al. 1997). Die Distribution beschreibt hier die Auslieferung von Waren an eine Menge von Filialen eines Handelsunternehmens. Die Auslieferung wird durch einen Tourenplan spezifiziert, der die Zusammenstellung der Touren und die Reihenfolge der Filialen für die Belieferung festlegt. Bei einem Warentransport kommt es zu Stoff- und Energieströmen in Form der transportierten Waren, der Kraftstoffe für den Transport und den dabei emittierten Schadstoffen. Diese gilt es, im Rahmen einer Stoffstromanalyse zu erfassen und zu bilanzieren. Durch Änderung der Stoff- und Energieströme in Struktur und Quantität lassen sich Alternativszenarien bilden (z.B. die Ermittlung von kürzeren Touren, bessere Auslastung der LKW, etc.), die u.U. durch die Realisierung von ökologischen Verbesserungspotentialen den Ressourcenverbrauch und die Emission von Schadstoffen in die Umwelt minimieren. Die Änderung der Stoff- und Energieströme erfolgt dabei durch die Anwendung von Methoden des Operations Research, indem ein Tourenplanungsmodell und geeignete Lösungsverfahren in die Transition eines Stoffstromnetzes eingebettet werden, so dass bei Berechnung des Stoffstromnetzes ein optimaler Tourenplan hinsichtlich der Zielsetzung der Minimierung der zurückzulegenden Entfernungen und damit der Schadstoffemissionen bestimmt wird. Die ermittelten Werte bilden die Grundlage für die Berechnung der Transformationsprozesse der Transition. Auf diese Weise können Methoden der Optimierung helfen, sowohl ökologische als auch ökonomische Verbesserungspotentiale aufzudecken.

Aufbauend auf dem Standardproblem der Tourenplannung wird in unserem Modell davon ausgegangen, dass von einem Depot L_0 eine Zahl von Filialorten L_i

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

(i=1(1)n) zu beliefern ist. Jede Filiale hat eine fest vorgegebene Nachfrage von D_i Mengeneinheiten nach einem bestimmten Gut, die nicht auf mehrere Lieferungen aufgeteilt werden darf. Zur Belieferung stehen k_{max} Fahrzeuge gleichen Typs mit einer Kapazität von C ME pro Fahrzeug zur Verfügung. Die Entfernung zwischen zwei Orten L_i und L_j beträgt d_{ij} Entfernungseinheiten. Denkbar ist auch eine Optimierung der benötigten Zeit oder, aus betriebswirtschaftlicher Sicht, der anfallenden Kosten. Dies wurde hier aber nicht weiter betrachtet. Zudem wird eine reellwertige Hilfsvariable μ_i eingeführt, welche die Position des Ortes L_i innerhalb der Tour bei der Auslieferungsfahrt des Fahrzeuges bezeichnet. Sie dient der Vermeidung von Kurzzyklen. Binäre Entscheidungsvariablen x_{ijk} geben an, ob Fahrzeug k direkt von L_i nach L_j fährt (x_{ijk}=1) oder nicht (x_{ijk}=0). Es gibt also k_{max} Touren. Aus der Belegung der x_{ijk} ergibt sich als Lösung ein Tourenplan mit zugehörigem Zielfunktionswert z_{TP}. Als mathematisches Entscheidungsmodell (Miller et al. 1960) ergibt sich folgendes:

Minimiere die Zielfunktion

$$\text{(Z.TP)} \qquad z_{TP} = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n} \sum_{k=1}^{k\,\max} d_{ij} \cdot x_{ijk}$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\text{(TP.1)} \qquad \sum_{i=0}^{n} \sum_{k=1}^{k\,\max} x_{ijk} = 1 \qquad \text{(j=1(1)n)}$$

$$\text{(TP.2)} \qquad \sum_{i=0}^{n} x_{isk} - \sum_{j=0}^{n} x_{sjk} = 0 \qquad \text{(s=1(1)n, k=1(1)}k_{max}\text{)}$$

$$\text{(TP.3)} \qquad \mu_j \geq \mu_i + 1 - M\left(1 - \sum_{k=1}^{k\,\max} x_{ijk}\right) \qquad \text{(i=1(1)n, j=1(1)n, j}\neq\text{i)}$$

$$\text{(TP.4)} \qquad \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{n} D_j \cdot x_{ijk} \leq C \qquad \text{(k=1(1)}k_{max}\text{)}$$

$$\text{(TP.5)} \qquad \mu_i \geq 0 \qquad \text{(i=1(1)n)}$$

$$\text{(TP.6)} \qquad x_{ijk} \in \{0,1\} \qquad \text{(i=0(1)n, j=0(1)n, k=1(1)}k_{max}\text{)}$$

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

Die insgesamt zurückzulegende Entfernung wird durch die Zielfunktion (Z.TP) minimiert. Die Restriktionen von (TP.1) garantieren, dass jeder Ort L_j genau einmal angefahren wird. Die Nebenbedingungen (TP.2) sorgen dafür, dass der Ort L_s mit dem Fahrzeug k wieder verlassen wird, wenn er damit auch angefahren wurde. Die Bedingungen (TP.3) gewährleisten, dass keine Kurzzyklen auftreten, also jede Fahrzeugroute im Depot L_0 beginnt und auch dort wieder endet. Für die Einhaltung der Fahrzeugkapazität sorgen die Restriktionen (TP.4), die Bedingungen (TP.5) und (TP.6) sind Nichtnegativitäts- und Binärbedingungen.

Ausgehend von den vorliegenden Daten des Tourenplanungsproblems wird ein erster hinsichtlich einer festgelegten Zielsetzung (z.B. Entfernungsminimierung) optimierter Tourenplan mit Hilfe des Savings- oder Sweep-Verfahrens errechnet. In diesem Schritt wird somit die Zusammensetzung der Touren, die Clusterung, festgelegt. Eine anschließende Verbesserung kann durch Anwendung des 2-optimalen und 3-optimalen Kantenaustauschverfahrens erreicht werden, so dass Verbesserungspotentiale aufgrund einer günstigeren Reihenfolge der Filialen innerhalb der einzelnen Touren, also des Routings, berechnet werden können (Hefter 1999).

Die verwendeten Algorithmen sind dabei innerhalb einer Transition in Form eines Skriptes in der Programmiersprache Python abgelegt worden (Abbildung 3, unten). Sie werden ausgeführt, wenn der Berechnungsalgorithmus des Stoffstromnetzes die so spezifizierte Transition erreicht. Als Ergebnis werden auf Grundlage der errechneten Tourenzusammsetzung und somit der zurückgelegten Entfernung mit Hilfe von durch Umberto® bereitgestellter Emissionsfaktoren die errechneten Emissionen und der Energiebedarf für den LKW-Transport an das Stoffstromnetz zurückgegeben. Dieses erfolgt über ein entsprechendes COM-Interface, welches das Setzen von Stoffströmen an der entsprechenden Transition gestattet. Z. B. konnte unter den gegebenen Annahmen durch Anwendung der beschriebenen Algorithmen eine Emissionsersparnis des optimierten Tourenplans gegenüber eines Tourenplanes, der die Routen per Himmelsrichtung festlegt[5], von ca. 10 Prozent ermittelt werden.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt die Mächtigkeit der Verwendung von Skripten zur Transitionsspezifikation in Stoffstromnetzen. Die Verwendung der COM-Architektur erfolgt hierbei durch den Aufruf eines Skriptes von einem Stoffstromnetz aus und durch Übergabe der errechneten Stoffströme an das Stromnetz nach Ausführung der im Skript spezifizierten Algorithmen. Eine Verwendung von anderen Applikationen, wie z.B. einem Tabellenkalkulationsprogramm, findet in diesem Beispiel nicht statt, ist aber grundsätzlich durchführbar, da z.B. Excel den Zugriff über COM-Interfaces weitgehend unterstützt.

In diesem besonderen Fall reduziert die Verwendung eines Skriptes in einer Transition für geübte Anwender sogar den Modellierungsaufwand, da nur noch eine einzige Transition einen kompletten Tourenplan im Stoffstromnetz repräsentiert. Beim

[5] Ein Verfahren, das in der Praxis weit verbreitet ist.

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

traditionellen Ansatz müsste nämlich für jede Tour die entsprechende Route in Form von Stellen/Transition/Stellen-Ketten nach den Regeln der Stoffstromnetze modelliert werden (Abbildung 3). Dieses entfällt bei der beschriebenen Problemlösung. Nichtsdestotrotz ist der Datenaufwand in beiden Fällen der gleiche, da sowohl bei der herkömmlichen Modellierweise als auch bei dem Skriptansatz jeweils die Entfernung zwischen den Filialen bestimmt und eingetragen werden muss.

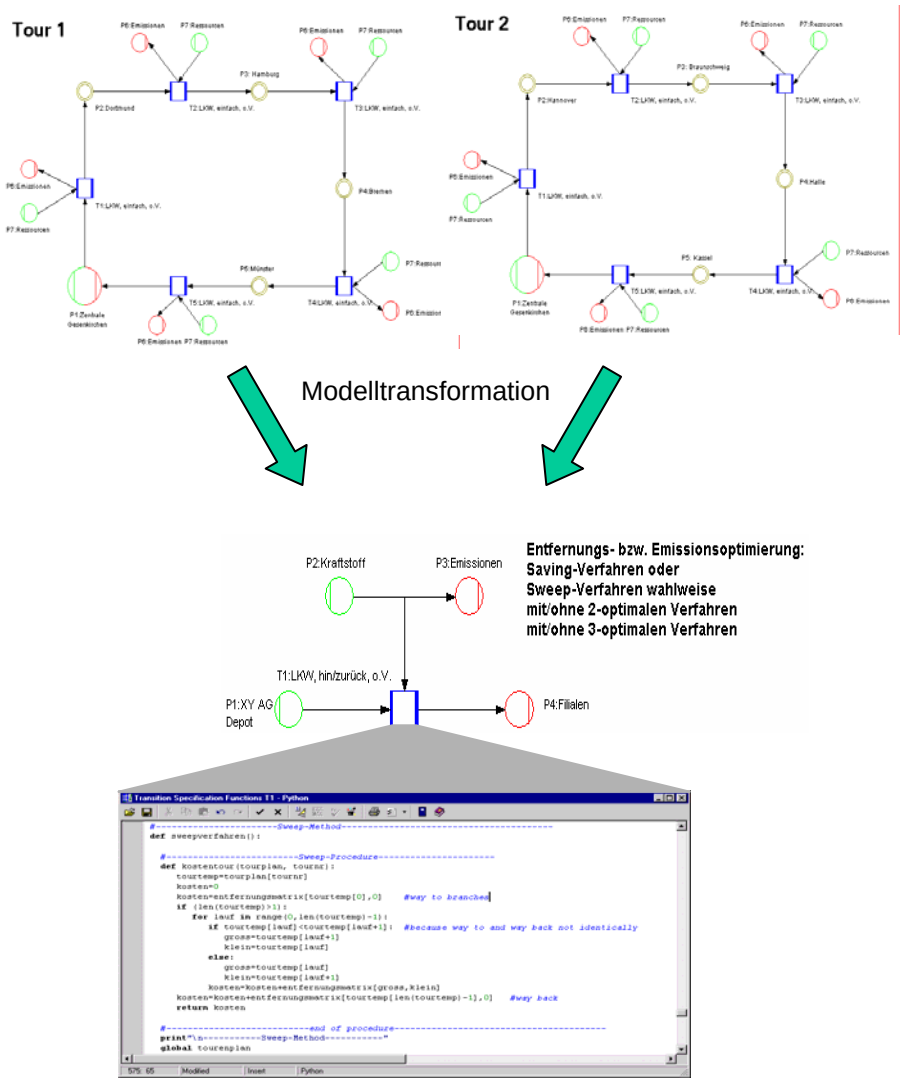

Abbildung 3
Herkömmliche Modellierung von Transportketten im Vergleich zur skriptbasierten Modellierung

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

4.2 Einbettung von ereignisorientierten Simulationsmodellen in Stoffstromnetze

Wie bereits oben diskutiert, kann in Stoffstromnetzen nicht nachvollzogen werden, wie oft in der Betrachtungsperiode eine Transition wirklich aktiviert worden ist und somit „gefeuert“ hat, da dort nur die mit der Summe aller Schaltungen verbundenen Stoff- und Energieflüsse eines Zeitraumes protokolliert werden. Dieses erfolgt ja auch in Übereinstimmung mit dem Erkenntnisziel, der Gewinnung einer Sachbilanz im Rahmen der Ökobilanzierung. In diesem Kontext umfasst der zeitliche Aspekt der Stoffstrombetrachtung immer eine bestimmte Periode. Neben dieser periodenbezogen Betrachtungsweise finden sich in Bezug auf Stoffstromanalysen noch stationäre (Sieverdingbeck et al. 1998) und kontinuierliche Ansätze (Baccini und Bader 1996). Hingegen finden sich kaum Ansätze, die Stoffstromanalysen mit einer zeitdiskreten, ereignisorientierten Sichtweise verknüpfen. Eine derartige Verknüpfung würde jedoch eine stärkere Betrachtung zeitdynamischer Abläufe in Verbindung mit einer mehr auftragsbezogenen Sichtweise von Produktionssystemen zu Planungszwecken ermöglichen. Auf diese Weise könnten neben den Stoff- und Energieströmen auch Informationen über marktorientierte Parameter (Durchlaufzeiten, Terminabweichungen, etc.) und betriebsorientierte Kennzahlen (Durchsatz, mittlere Verweilzeiten, Auslastung, etc.) über das modellierte Produktionssystem erzeugt werden (Wohlgemuth und Page 1999).

Wie eine derartige Verknüpfung aussehen könnte, beschreibt das folgende Beispiel. Hierbei haben wir ein einfaches Modell entwickelt, das den Reinigungs-, Befüllungs- und Verpackungsprozess einer fiktiven Brauerei beschreibt. Die zu befüllenden Bierflaschen gelangen von extern in die Abfüllanlage. Ihre Ankunftsrate ist dabei ebenso wie die mittleren Bedienzeiten der Reinigungs-, Befüllungs- und Verpackungsmaschinen mittels stochastischer Verteilungen modelliert worden. Wir haben außerdem angenommen, dass durch Reinigung und Befüllung ein Prozent der angelieferten Flaschen beschädigt werden und ausgesondert werden müssen. In der Verpackungsmaschine werden dann abschließend jeweils sechs gefüllte Flaschen zu einem Sechserpack abgepackt. Es sei hier jedoch klargestellt, dass im Gegensatz zum vorherigen Beispiel die Daten für dieses Modell nicht auf einer empirischen Untersuchung, sondern auf Annahmen unsererseits beruhen.

Implementiert worden ist das ganze Modell dann mit Hilfe eines Rahmenwerkes (Framework) zur Erstellung von zeitdiskreten Simulationsmodellen in der Programmiersprache Delphi (Kempe 2000). Dieses Rahmenwerk stellt uns die benötigten Simulationsfunktionalitäten wie der Erzeugung von Zufallszahlen, der Zeitsteuerung und der Ereignisbehandlung zur Verfügung, so dass es auf diese Weise recht einfach war, das oben beschriebene Modell als Simulationsmodell zu implementieren. Um nun noch die Stoff- und Energieflüsse, die mit den o.a. Prozessen zusammenhängen, zu erfassen, sind Erweiterungen am Rahmenwerk vorgenommen worden. Ein entsprechendes Konzept zur Verbindung dieses ereignisorientierten, simu-

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

lationsbasierten Ansatzes mit Stoffflüssen befindet sich noch in Bearbeitung. Kernpunkte sind jedoch eine Stücklistenauflösung der eingehenden und ausgehenden Aufträge und eine Buchung der mit jedem Auftrag an einer Maschine zusammenhängenden stofflichen Vorgänge anhand von typischen Maschinenleistungsdaten wie Produktionsmenge, Maschinenstunden, Rüstzeiten, etc. Im Vergleich zu den Stoffstromnetzen nimmt dieser Ansatz also eine mehr auftragsbezogene Sichtweise ein und protokolliert sämtliche stofflichen Transformationen je Maschine und Auftrag während der Simulationsdauer mit.

Kopplung von Stoffstromnetzen
mit Simulationsmodellen

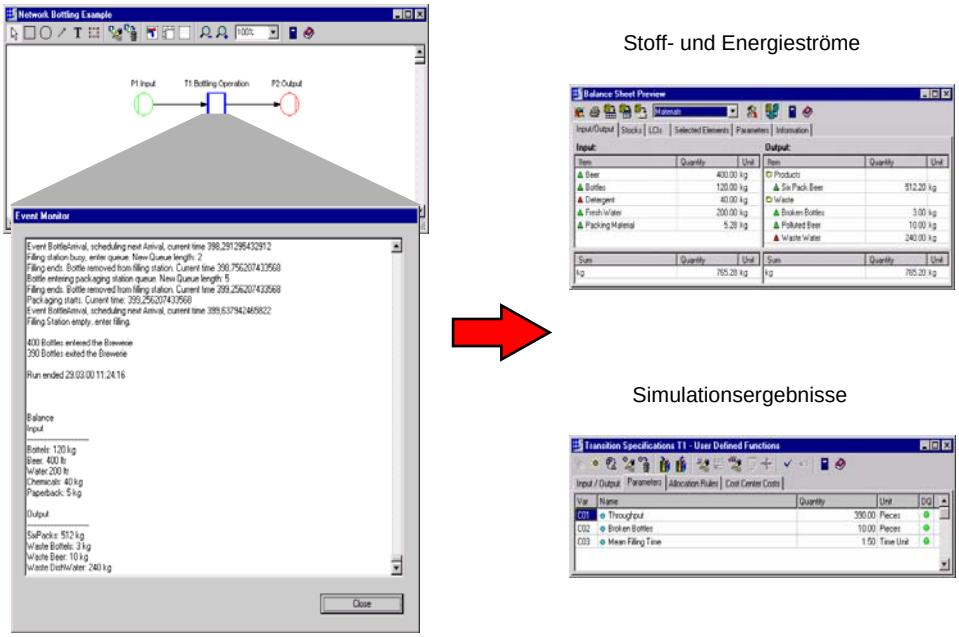

Abbildung 4
Kopplung von Stoffstromnetz und Simulationmodel per Skript

Auf der Basis der COM-Architektur ist dann eine Verknüpfung des Simulationsmodells mit dem Stoffstromnetz möglich, indem wir das beschriebene Simulationsmodell mit einer COM-Schnittstelle ausgestattet haben. Diese COM-Schnittstelle erlaubt das Setzen von Simulationsparametern wie der Simulationsstartzeit und der Simulationsdauer, den Zugriff auf die ermittelten Simulationsergebnisse wie Durchsatz und mittlere Bedienzeiten ebenso wie den Zugriff auf die berechneten Stoff- und Energieströme. Um nun dieses Simulationsmodell von einem Stoffstromnetz

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

aufrufen zu können, müssen wir wie im obigen Beispiel eine Transition mittels eines Skriptes spezifizieren, welches das entwickelte COM-Interface für dieses Modell verwendet. Erreicht nun der Berechnungsalgorithmus des Stoffstromnetzes die so spezifizierte Transition, erlangt das Script Control die Ablaufkontrolle und führt das entsprechende Skript aus. In dem Skript werden dann per COM-Aufruf die Simulationsparameter gesetzt, die Simulationsergebnisse bestimmt und die Simulationsergebnisse mit den Stoffflüssen berechnet. Das Skript übernimmt die Ergebnisse und übergibt mittels des COM-Interfaces von Umberto® diese Ergebnisse an das aufrufende Stoffstromnetz, so dass dort neben den Stoff- und Energieströmen zu unserem Modell auch noch dynamische Kennzahlen zusammenfließen und weiteren Auswertungen zugänglich sind. Auf diese Weise gelingt es, Stoffstromnetze um eine ereignisorientierte Sichtweise zu erweitern, da es uns nun möglich ist, im Stoffstromnetz die Einzelereignisse nachzuvollziehen (Abbildung 4, links unten). Voraussetzung ist allerdings, dass der Anwender dafür Sorge trägt, dass der Simulationszeitraum mit der betrachteten Periode des Stoffstromnetzes übereinstimmt. Außerdem ist eine derartige ereignisorientierte Erweiterung jeweils nur für eine Transition möglich. Funktionale Abhängigkeiten zwischen Transitionen eines Stoffstromnetzes können auf diese Weise nicht berücksichtigt werden.

Abschließend sei zu diesem Beispiel angemerkt, dass wir hierbei mittels des Skripts im Gegensatz zum ersten Beispiel zwei Applikationen über die COM-Architektur miteinander verknüpft haben, nämlich Umberto® und unser Simulationsmodell. Hier dient das verwendete Skript quasi als Kit zwischen den beiden Anwendungen. Dabei ist es irrelevant, welche Anwendung von dem Skript gesteuert wird, z.B. hätte auf diese Weise auch ein Datenaustausch zwischen Umberto® und einem Excel-Arbeitsblatt erfolgen können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebenen Beispiele haben gezeigt, dass die Verwendung einer Skriptsprache zur Transitionsspezifikation ein mächtiges Instrument darstellt, um das Konzept der Stoffstromnetze und die sie unterstützenden Softwarewerkzeuge um benutzerdefinierte Modelle und Methoden zu erweitern. Allerdings darf dabei nicht übersehen werden, dass die Verwendung von Skriptsprachen vom Anwender entsprechende programmiertechnische Kenntnisse voraussetzt. Noch mehr Kenntnisse werden benötigt, wenn über das Skript in einer Transition das Stoffstromnetzwerkzeug mit anderen Applikationen gekoppelt werden soll. Diese Kenntnisse können in der Regel sicherlich nicht von „normalen“ Endbenutzern auf dem Gebiet der Stromstromanalysen vorausgesetzt werden. Benutzer mit entsprechenden Kenntnissen sind auf der anderen Seite aber nicht mehr auf die von Umberto® automatisch angebotenen Möglichkeiten einer Transitionsspezifikation beschränkt. Umberto® kann in diesem Sinne als offenes System bezeichnet werden, welches für spezielle Anwendungen be-

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

nutzerspezifisch erweiterbar ist, ohne jedoch dann auf dessen weitreichende Funktionalitäten verzichten zu müssen. Beschränkt wird der Anwender bei der Kopplung nur durch die Mächtigkeit der angebotenen COM-Schnittstelle und dessen Zugriffsmethoden auf die Objekte eines Stoffstromnetzes.

Neben methodischen Erweiterungen kann der in diesem Beitrag beschriebene Mechanismus allerdings auch dazu genutzt werden, um auf der Basis der COM-Architektur auf andere für das Umweltmanagement relevante Informationssysteme (z.B. SAP oder andere ERP-Systeme) mit entsprechenden Daten zuzugreifen. Zu überprüfen wäre auch, ob andere gängige Komponentenarchitekturen wie z.B. CORBA in ähnlicher Weise unterstützt werden könnten. Die beschriebene Verwendung von Komponenten mit unterschiedlichen Funktionalitäten erlaubt es, die Methodik der Stoffstromnetze als Rahmenwerk und Integrationsbasis für ein umfassenderes betriebliches Umweltinformationssystem zu nutzen. Stoffstromnetze bieten jedenfalls aufgrund ihrer methodischen Basis und der mit ihrer Verwendung einhergehenden guten Visualisierungsmöglichkeiten eine günstige Ausgangsbasis hierfür.

Literatur

Baccini, P., Bader, H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt : Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg

Baumgarten, B. (1996): Petri-Netze. Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg

Enquête -Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (1994): Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn

Griffel, F. (1998): Componentenware. Konzepte und Techniken eines Softwareparadigmas. Heidelberg

Kempe, O. (2000): Erstellung eines Frameworks zur zeitdiskreten Simulation in Delphi. Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik.

Heffter, J. (1999): Konzepte und Realisierung einer Einbettung von Tourenplanungsmodellen in Stoffstromnetze. Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik.

Letmathe, P. (1998): Umweltbezogene Kostenrechnung. München

Miller, C. E., Tucker, A. W., Zemlin, R. A. (1960): Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems, Journal of the ACM, Vol. 7, S. 326-329

Möller, A., Häuslein, A., Rolf, A. (1997): Öko-Controlling in Handelsunternehmen: ein Leitfaden für das Stoffstrommanagement. Berlin/Heidelberg

Möller, A. (2000): Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Bochum

Page, B., Kreutzer, W., Wohlgemuth, V., Brüggemann, R.: Ein Anwendungsvergleich ausgewählter graphischer Modellierungswerkzeuge in der Expositionsanalyse von Chemi-

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5

kalien in der Umwelt, in: Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Braunschweig/Wiesbaden, S. 147-172

Rautenstrauch, C. (1999): Betriebliche Umweltinformationssysteme. Berlin/Heidelberg

Schmidt, M., Häuslein, A. (1997): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung. Berlin/Heidelberg

Sieverdingbeck, A., Engels, B., Spengler, T., Renz, O. (1998): EDV-gestützte Simulation industrieller Stoff- und Energieströme mittels des kommerziellen Flowsheeting-Systems ASPEN Plus – dargestellt am Beispiel der Eisen- und Stahlindustrie, in: Umweltinformatik '98, Band I. Marburg, S. 151-164

Tuma, A., Siestrup, G., Haasis, H.-D. (1997): Stoffstrommanagement auf der Basis von Fuzzy-Petri-Netzen, in: Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Braunschweig/Wiesbaden, S. 87-102

Wohlgemuth, V., Page, B. (1999): Konzeptionelle Überlegungen zur Entwicklung eines Simulationswerkzeuges für den betrieblichen Umweltschutz, in: Werkzeuge für die Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Marburg, S. 33-46

Copyright 2000 Metropolis Verlag, Marburg, ISBN: 3-89518-307-5