

Fachhochschule
Pforzheim

**Hochschule
für Gestaltung
Technik und
Wirtschaft**



*Pforzheim University
of Applied Sciences*

**BEITRÄGE DER
HOCHSCHULE PFORZHEIM**

Mario Schmidt und René Keil

**Stoffstromnetze und ihre Nutzung für
mehr Kostentransparenz sowie die Ana-
lyse der Umweltwirkung betrieblicher
Stoffströme**

Nr. 103

Herausgeber: Ansgar Häfner, Norbert Jost, Karl-Heinz Rau,
Roland Scherr, Christa Wehner, Helmut Wienert
(geschäftsführend; wienert@fh-pforzheim.de)

Sekretariat: Alice Dobrinski
Fachhochschule Pforzheim,
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
dobrinski@vw.fh-pforzheim.de
Telefon: 07231/28-6201
Telefax: 07231/28-6666

Ausgabe: März 2002

Mario Schmidt und René Keil

**Stoffstromnetze und ihre Nutzung
für mehr Kostentransparenz und
die Analyse der Umweltwirkung
betrieblicher Stoffströme**

Der Beitrag ist die überarbeitete und erweiterte Fassung eines Vortrags am Internationalen Hochschulinstitut IHI Zittau im Oktober 2001 und eines Artikels in Cramer/Eifler (Hrsg.): Win-Win-orientiertes Umweltmanagement. Gabler 2002 (in Vorber.)

Prof. Mario Schmidt
Hochschule Pforzheim
Fachbereich 3 „Beschaffung und Logistik, Wirtschaftsingenieurwesen“
Ökologische Unternehmensführung
schmidt@fh-pforzheim.de

Mario Schmidt, geboren 1960 in Freiburg/Brsg., hatte nach seinem Studium der Physik und Astronomie in Freiburg und Heidelberg als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Umweltschutz gearbeitet, bevor er 1989 als Referatsleiter zum Umweltsenator des Landes Hamburg ging. Danach baute er Anfang der 90er Jahre als Abteilungsleiter und Prokurist einen Arbeitsbereich zum Umweltmanagement und betrieblichen Stoffstrommanagement am ifeu-Institut für Energie- und Umweltschutz Heidelberg GmbH auf. Er beriet zahlreiche Unternehmen und Ministerien und leitete diverse Forschungsvorhaben. 1997 wurde er vom Bundesumweltministerium als Prüfer für das bundesweite Zulassungsverfahren für Umweltgutachter bestellt. Es folgten Lehraufträge u. a. an der RWTH Aachen und an der Universität Hamburg. Seit September 1999 ist er Professor für Ökologische Unternehmensführung an der Hochschule Pforzheim. Er ist Schwerpunktssprecher für Umweltökonomie am Institut für Angewandte Forschung und leitet dort größere vom BMBF geförderte Verbundvorhaben in enger Kooperation mit namhaften deutschen Unternehmen.

René Keil
Hochschule Pforzheim
Institut für Angewandte Forschung
Schwerpunkt Umweltökonomik
keil@fh-pforzheim.de

René Keil, geboren 1976 in Spremberg, studierte von 1996 bis 2001 Ökologie und Umweltschutz an der Hochschule Zittau/Görlitz. Seine Diplomarbeit schrieb er über Abbildung und Bewertung von Stoffströmen im Rahmen des Umweltcontrollings bei der Deutschen Telekom AG. Seit Anfang 2001 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Forschung der Hochschule Pforzheim angestellt. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der ökologischen Stoffstromanalyse.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	2
2	Modellierung von Stoffstromsystemen	4
2.1	Petri-Netze als Ausgangskonzept	4
2.2	Interpretation und Berechnen eines Stoffstromnetzes	7
2.3	Nichtlineare Ansätze zur Prozessmodellierung	10
2.4	Nutzen der Modell-Bildung mit Stoffstromnetzen	13
3	Leistungsverrechnung in Stoffstromnetzen	15
4	Aufwand und Ertrag von Prozessen	20
5	Kuppelprozesse und Allokation bei einzelnen Prozessen	23
6	Berücksichtigung prozessbezogener Kostenanteile	25
7	Bilanzieren in Stoffstromnetzen	27
8	Anwendung auf die sogenannte Reststoffkostenrechnung	29
9	Umsetzung als Software	31
10	Ausblick	35

Zusammenfassung

Die Modellierung und Analyse von betrieblichen Stoffstromsystemen gewinnt in der Praxis zunehmend an Bedeutung. Die Methode der Stoffstromnetze erweisen sich hierbei als mächtiges Instrumentarium für die Durchführung verschiedenster Analysen. Durch die saubere methodische Trennung von Mengen- und Wertebene erschließt sich dem Anwender ein ungewöhnlich großes Anwendungsspektrum. Der Beitrag führt in die methodischen Hintergründe der Stoffstromnetze ein und erläutert die Umsetzung in der Software Umberto®. Wesentliche Punkte sind die Leistungsverrechnung und die monetären Bewertungs- und Analysemöglichkeiten von Stoffstromnetzen.

Summary

The modelling and analysis of operational material flow systems win in practice increasingly in meaning. The method of the material flow networks proves here as powerful equipment for the execution of most diverse analyses. By the clean methodical separation from quantity and value level an unusually large application scope is opened for the user. The contribution leads into the methodical background the material flow networks and describes the conversion in the software Umberto®. Substantial points are the performance offsetting and the monetary evaluation and analysis possibilities of material flow networks.

1 Einführung

Stoffstrom- oder Materialflussanalysen gewinnen in Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Das zeigen derzeit zahlreiche Kongresse (z.B. LfU 2000, DECHEMA 2002, IAO 2002), aber auch eine zunehmende Zahl an Fachveröffentlichungen (Haehre 2000, Rentz et. al. 2000, Rüdiger 2000). Bemerkenswert ist, dass hier die Synthese von Ökologie und Ökonomie auf betrieblicher Ebene erstmals tatsächlich gelingt: Die Einsparung von Ressourcen und die Erhöhung der Ressourcenproduktivität – das Hauptanliegen der Stoffstromanalyse – sind Handlungsgrundlage sowohl einer nachhaltigen Entwicklung als auch eines Homo Oeconomicus. Und nicht nur auf der Zielebene, sondern auch im methodischen Bereich gibt es Konvergenzen zwischen ökologischer und ökonomischer Modellierung von Produktionssystemen.

Zu beachten ist, dass die Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Zielen in unterschiedlichen Wertsystemen erfolgen muss – eine Konsequenz davon ist, dass Umweltschäden immer noch weitgehend externalisiert werden und viele Umweltgüter keinen „ökologisch wahren“ Marktpreis besitzen. Die Bewertung von Umweltbelastungen durch Produktions- oder Produktsysteme erfolgt deshalb zwangsläufig in anderen als den monetären Wertsystemen der Ökonomie: mittels naturwissenschaftlicher Modelle, Ursachen-Wirkungsforschung, der Bildung von Wirkungspotentialen oder Grenzwerten. Sie schlagen sich bisher i.d.R. in gesetzlichen Auflagen, Regelwerken und Standards nieder.

Grundlage sind hier stets die Informationen über die physischen Stoff-, Material- und Energieströme auf einer Mengenebene in kg, t oder kWh. Würde man hier zu früh auf die Wertebene (Angaben der Stoffströme z.B. in €) wechseln, so wäre ein Informationsverlust für eine umfassende ökologische Bewertung die Folge. Aus diesem Grund wird in der Stoffstromanalyse überwiegend auf der *Mengenebene* analysiert und bilanziert. Erst die Bewertung der Mengenströme, z.B. mit Marktpreisen oder ökologischen Wirkungspotentialen, ergibt dann eine Wertsicht der Stoffströme.

Der Vorteil einer parallelen Bewertung nach ökologischen *und* ökonomischen Wertmaßstäben liegt auf der Hand: So kann nun sauber angegeben werden, was „ein Stück“ Umweltentlastung kostet – in den Größen, die für die Bewertung jeweils entscheidungsrelevant sind: einerseits als Kosten (oder Erlöse) in Euro, andererseits in ökologischen Wirkungspotentialen, z.B. Global Warming Potential (GWP) für treibhausrelevante Emissionen. Dieses Wissen ist grundlegend für die Bildung von soliden Effizienz- und Produktivitätsgrößen und basiert auf den Massenströmen im System.

Methodisch bieten die Wirtschaftswissenschaften und hier speziell die Produktionstheorie interessante Ansätze zur innerbetrieblichen Leistungsverrechnung an, die auch für die ökologische Bewertung von Stoffströmen sehr wichtig sind: Was sind zum Beispiel die Ursachen für die CO₂-Emissionen eines Betriebes, auf welche Produkte und Tätigkeiten sind sie zurückzuführen? In der Betriebswirtschaftslehre gehören solche Fragen – natürlich bezogen auf die Kosten – zum Standardrepertoire des Rechnungswesens und zur Kostenträgerrechnung; in der Stoffstromanalyse entpuppen sich diese Ansätze als mächtiges Instrumentarium, Stoffstromsysteme aus betrieblicher oder produktbezogener Sicht zu analysieren, jetzt aber auf der materiellen Ebene.

Genau in diesem Spannungsfeld bewegt sich die Software Umberto[®], die wir in den vergangenen Jahren mit Kollegen aus Hamburg entwickelt haben (Schmidt et al. 1994, Möller u. Rolf 1995, Möller 2000). Was ursprünglich als Software zur Erstellung von Produktökobilanzen oder Life Cycle Assessments (LCA) gedacht war, wurde schnell zu einem umfassenden Werkzeug auch für betriebliche Umweltbilanzierungen und die Verknüpfung mit der Kostenseite. Hierbei wurde sehr viel Wert auf eine methodisch saubere Herangehensweise gelegt – sowohl in naturwissenschaftlicher, als auch in betriebswirtschaftlicher und informationstheoretischer Hinsicht. Der Vorteil ist, dass damit das Anwendungsspektrum, das Umberto[®] heute abdeckt, ungewöhnlich groß ist.

2 Modellierung von Stoffstromsystemen

Die stofflichen (und energetischen) Abläufe z.B. in einem produzierenden Unternehmen können als ein *System* aus Stoff- und Energieströmen verstanden werden, dass in geeigneter Weise als Modell abgebildet werden soll. Das Modell soll einerseits die realen Verhältnisse der Stoffströme wiederspiegeln – das wäre der bilanzierende oder deskriptive Charakter des Modells, wie er für die Erstellung von Umweltbilanzen in Umweltberichten u.ä. benötigt wird. Hauptfunktion ist hier der strukturierende Charakter des Modells, etwa durch einen Ökokontenrahmen oder die Gliederung nach Produktionsbereichen. Andererseits soll ein Modell aber auch Einblick in die Ursachen und Zusammenhänge bieten, es soll ermöglichen, die Auswirkung von Änderungen im System zu ermitteln. Ein solcher präskriptiver Modellcharakter dient der Analyse, der Planung und der Entscheidungsunterstützung.

Die Wahl eines mehr oder weniger anspruchsvollen Modellansatzes entscheidet darüber, was damit im Einzelnen alles gemacht werden kann. Unter Umberto[®] kommt ein Konzept zum Einsatz, dass als die Methode der Stoffstromnetze bekannt geworden ist. In Stoffstromnetzen (siehe z.B. Brockhaus 1998, 175) werden die Stoff- und Energieströme eines Systems sowie deren Umwandlung in Produktions- und Reduktionsprozessen als ein Netz modelliert. Sie basieren auf dem mathematischen Formalismus der sogenannten Petri-Netze, unterscheiden sich aber in einigen wesentlichen Punkten davon.

2.1 Petri-Netze als Ausgangskonzept

Um den Modellansatz der Stoffstromnetze und seine Mächtigkeit zu verstehen, ist es nützlich, auf die methodischen Hintergründe einzugehen.

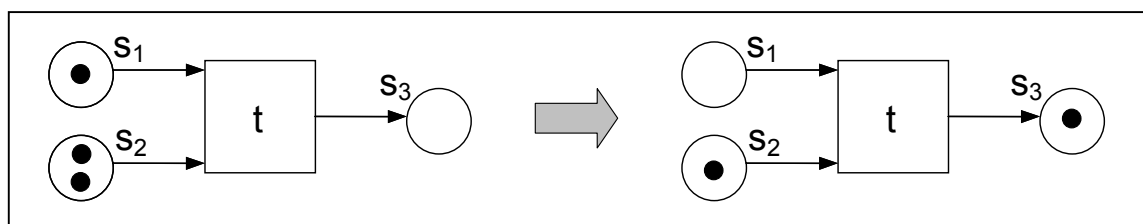
Die Netzstruktur von Petri-Netzen besteht aus 3 Arten von Netzelementen (siehe z.B. Reisig 1986): den *Kanten* oder Pfeilen und 2 Typen von Knoten, den *Transitionen* und den *Stellen*. Der Graph ist dann das Tripel $N = (S, T, F)$ wobei S die Menge der Stellen und T die Menge der Transitionen mit der disjunkten

Eigenschaft $S \cap T = \emptyset$ ist. F ist die Flussrelation mit $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ und enthält die Kanten oder Verbindungen zwischen den Knoten. Es handelt sich also um einen bipartiten Graphen, d.h. jede Kante verbindet einen Knoten aus der Menge T mit einem Knoten aus der Menge S bzw. umgekehrt.

Petri-Netze dienen u.a. der Abbildung von zeitlich parallelen Abläufen und der Synchronisation von Ereignissen. In sogenannten Stellen-/Transitions-Netzen werden dazu *Marken* eingeführt, die von Stellen getragen werden können bzw. auf Kanten „fließen“. Sie bestimmen, wann eine Transition schalten kann. Der Anfangszustand eines Netzes wird mit einer Anfangsmarkierung für die Menge aller Stellen festgelegt.

Abbildung 1

Schalten einer Transition mit Weitergabe der Marken



Nach Möller (2000, 74).

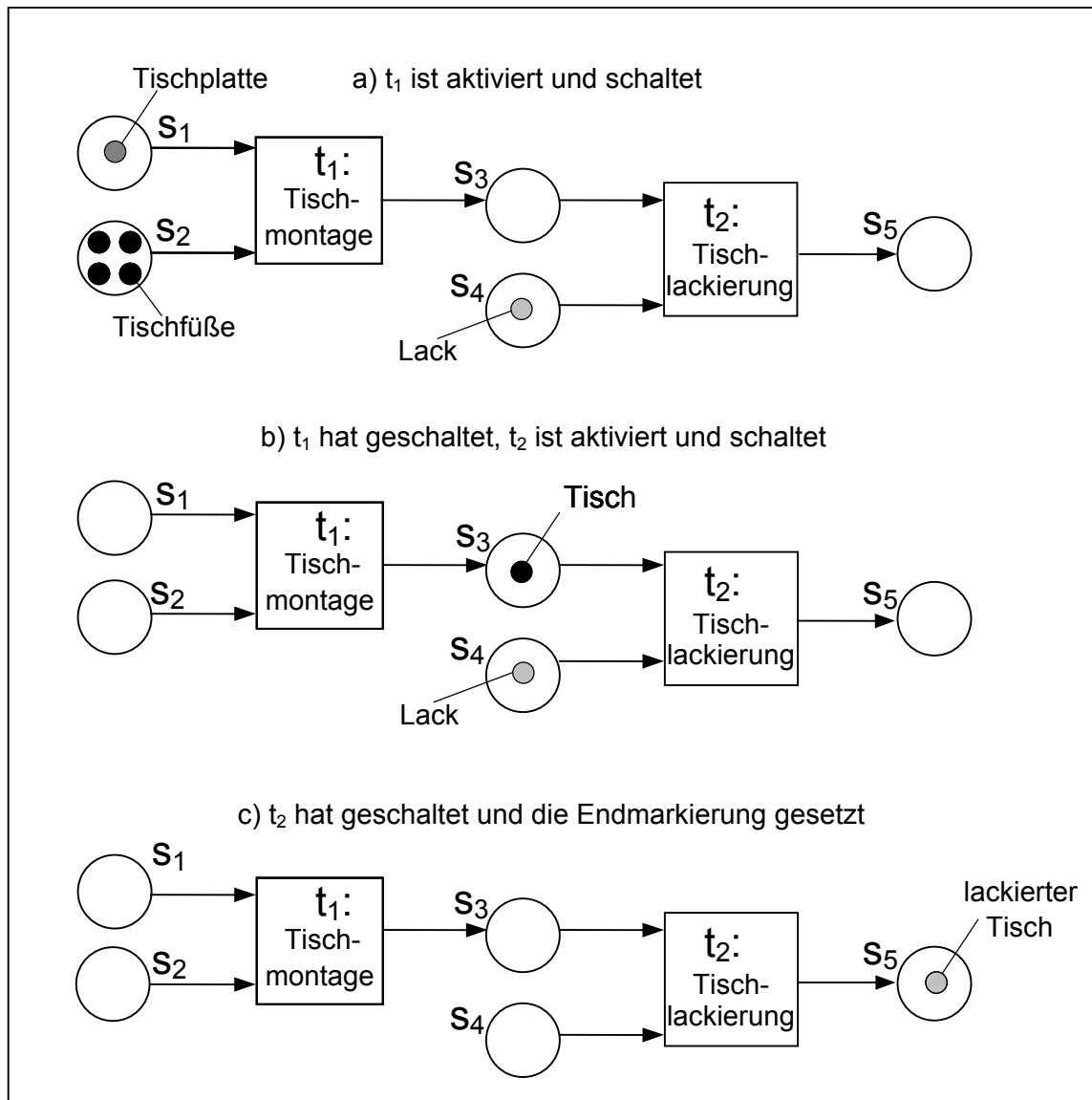
In Abb. 1 tragen beispielsweise die Stellen s_1 und s_2 links eine bzw. zwei Marken; die Anfangsmarkierung beträgt $m_0 = \{(s_1, 1), (s_2, 2), (s_3, 0)\}$. Wenn alle Vorgängerstellen einer Transition markiert sind, so ist die Transition aktiviert und „schaltet“: Von jeder Vorgängerstelle wird eine Marke weitergereicht; die Nachfolgerstelle s_3 erhält eine Marke. Es entsteht dann die Markierung $m_1 = \{(s_1, 0), (s_2, 1), (s_3, 1)\}$. Der Schaltvorgang einer Transition hängt also nur von dem lokalen Umfeld ab. Das Netz stellt dieses lokale Verhalten jedoch in einen globalen Zusammenhang.

Gerade der Zusammenhang zwischen lokalem Verhalten des Schaltelements und der Einbettung in ein globales Netz macht die Stellen-/Transitions-Netze so interessant für die Stoffstrommodellierung. So kann die Transition als ein Stoff- oder Energieumwandlungsprozess interpretiert werden, die Marken hingegen als die Flussobjekte, die zudem nicht anonym bleiben müssen, sondern als be-

stimmte Stoff- oder Energiearten verstanden werden können. Das Schalten der Transition hängt davon ab, ob *lokal* die für eine Produktion erforderlichen Rohstoffe bereitstehen. Die Stellen können als Lager interpretiert werden. Das Schalten stellt dann die Stoffumwandlung dar und führt zur Bereitstellung eines Produkts, das seinerseits Rohstoff eines nachfolgenden Umwandlungsprozesses sein kann. In Abb. 2 enthält t_1 die Schaltvorschrift, dass aus einer Tischplatte und 4 Tischfüßen ein Tisch montiert und eine Marke „Tisch“ an S_3 weitergereicht wird.

Abbildung 2

Interpretation eines Stellen-/Transitions-Netzes als ein Netz von Umwandlungsprozessen.



2.2 Interpretation und Berechnen eines Stoffstromnetzes

In Stoffstromnetzen werden die Transitionen als Stoffumwandlungsprozesse (Produktion, Reduktion) verstanden, Stellen als Lager und die Marken als die (individuellen) Materialien und Energien, die in dem System auftreten (Möller u. Rolf 1995). An die Stelle der Marken treten Mengen. Wesentlicher Unterschied ist, dass Stoffstromnetze nicht ereignisbezogen sind und es ein Schalten der Transitionen streng genommen nicht gibt. Es geht nicht um die Synchronisation von Ereignissen, sondern um die Abbildung und Verknüpfung parallel laufender Produktionsstränge und ihrer mengenmäßigen Verflechtungen.

Die Berechnung eines Stoffstromnetzes bezieht sich deshalb auf eine *Zeitperiode*, z.B. ein Produktionsjahr oder einen Produktionstag. Es gibt für das gesamte Netz eine Anfangsmarkierung zu Beginn der Periode und eine Endmarkierung am Ende der Periode. Die Anfangsmarkierung ist i.d.R. vorzugeben und enthält nichts anderes als die Mengen der Anfangsbestände von verschiedenen Materialien und Energien in den Stellen des Netzes. Diese werden wie Lager interpretiert. Ziel der Berechnung ist es, mittels der Rechenvorschriften der Transitionen die Endmarkierung des Netzes, also die Bestände in den Stellen am Ende der Periode zu berechnen. Dazu muss auch bekannt sein, welche Materialflüsse in der Periode an den Kanten aufgetreten sind.

Zwei Berechnungen sind dabei zu unterscheiden: Die Berechnung der Transition analog dem Schaltvorgang im Petri-Netz (I) und die Arithmetik der Bestände und Flüsse im Netz, also wie die „Marken“ im Netz quasi verwaltet werden (II).

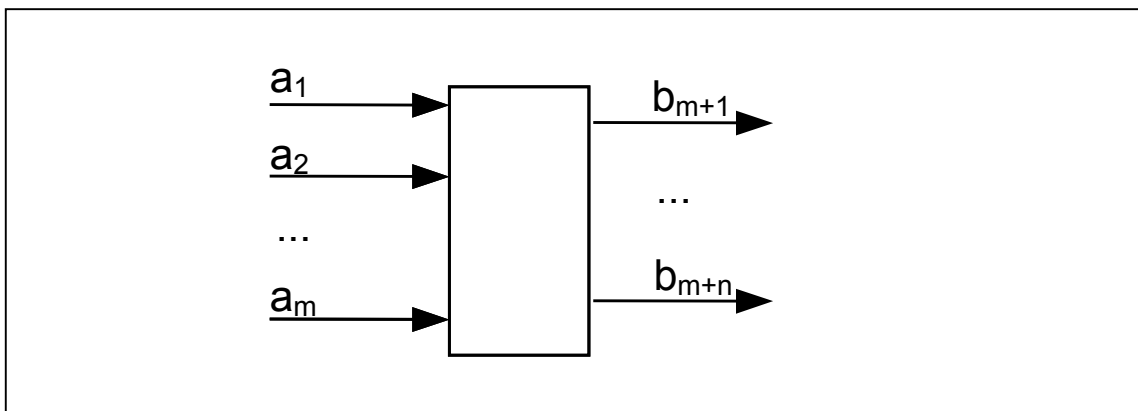
I. Die *Transition* beschreibt den Umwandlungsprozess: Aus Inputströmen entstehen Outputströme – im Produktionsfall entstehen outputseitig Produkte, im Reduktionsfall werden inputseitig Abfälle bzw. Redukate vernichtet. Im einfachsten Fall kann eine lineare Technologie unterstellt werden, wie dies z.B. mit Stücklisten oder Rezepturen häufig erfolgt. D.h., der Umwandlungsprozess wird durch einen Input-/Outputvektor (\mathbf{x}, \mathbf{y}) mit m Inputs und n Outputs zu einem bestimmten Prozessniveau λ beschrieben (Dyckhoff 1994, 183ff.):

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \lambda \cdot (\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \lambda \cdot (a_1, a_2, \dots, a_m; b_{m+1}, \dots, b_{m+n})$$

a_i und b_j sind in diesem Fall die Produktionskoeffizienten. Sind sie alle bekannt, so können mit *einem* vorgegebenen Input- oder Outputfluss das Prozessniveau und alle anderen Flüsse des Prozesses bestimmt werden. Sei x_i ein bekannter Fluss auf der Inputseite, so können mit $\lambda = x_i/a_i$ das Aktivitätsniveau und daraus die anderen Input- und Outputflüsse (\mathbf{x}, \mathbf{y}) bestimmt werden. Das Gleiche gilt für einen bekannten Fluss auf der Outputseite y_j mit $\lambda = y_j/b_j$. Dies ist die wesentliche Grundlage, um aus lokal bekannten Flussgrößen auf unbekannte zu schließen.

Abbildung 3

**Beschreibung eines linearen Prozesses
mittels Produktionskoeffizienten.**



II. Die angesprochene Netzarithmetik erfolgt an den *Stellen*. Hier erfolgt für die betrachtete Zeitperiode eine kombinierte Fluss- und Bestandsrechnung. $s_{l,t}^p$ sei für eine Stelle P (für engl. Place) der Anfangsbestand eines Materials l zur Periode t . $s_{l,t+1}^p$ ist dann der Endbestand zur Periode t , der gleich dem Anfangsbestand der direkt anschließenden Periode $t+1$ ist. $x_{l,i}^p$ seien die m Inputflüsse des Materials l zur Stelle P, $y_{l,j}^p$ die n Outputflüsse. Dann gilt:

$$s_{l,t+1}^p = s_{l,t}^p + \sum_{i=1}^m x_{l,i}^p - \sum_{j=m+1}^{m+n} y_{l,j}^p$$

Eine entsprechende Bilanzgleichung wird für jede Stelle mit den jeweiligen Materialbeständen und -flüssen aufgestellt. Dadurch wird im gesamten Netz gewährleistet, dass keine Materialien, die in das System von außen einfließen bzw. in den Prozessen entstehen, verschwinden können, ohne in Produktionsprozessen verbraucht zu werden.

Es kann allerdings passieren, dass ein Prozess weniger (oder mehr) Rohstoffe benötigt, als der Vorgängerprozess gerade liefert. Die Aktivitätsniveaus der beiden Prozesse sind dann nicht aufeinander eingestellt mit der Folge, dass Bestandsveränderungen auftreten und z.B. in dem System Material verbleibt. Hier dienen die Stellen als Lager dieser Materialien.

Die Abstimmung der Aktivitätsniveaus von nachfolgenden Prozessen aufeinander kann man erzwingen, wenn in den zwischengeschalteten Stellen keine Lagerung zugelassen wird. Kennt man einen Prozess samt seines Aktivitätsniveaus, so lässt sich daraus – ähnlich wie bei mehrstufigen Gozintographen (Dyckhoff 1994, 215) – das Aktivitätsniveau der damit verknüpften Prozesse ableiten.

Dies wäre dann der Spezialfall für eine Stelle (sogenannte Connection Place), bei der $s_{i,t+1}^p = s_{i,t}^p = 0$ gilt. Es erfolgt also in der betreffenden Zeitperiode t keine Bestandsänderung. Alle einfließenden Materialmengen müssen in der gleichen Periode auch wieder abfließen. Sind beispielsweise 2 Transitionen miteinander über eine solche Stelle verbunden, dann ist der Output der einen Transition in der Periode t gleich dem Input der anderen Transition in der gleichen Periode. Allgemeiner kann lokal aus $m+n-1$ bekannten Flüssen durch Verrechnung auf einen unbekanntem Fluss geschlossen werden (Möller 1997, 124).

Mit diesen beiden Berechnungsansätzen lassen sich in einem Stoffstromnetz aus bekannten Anfangsbeständen (die für eine Nettobetrachtung ggf. auf Null gesetzt werden können), einer begrenzten Anzahl von bekannten Materialflüssen und den Prozessbeschreibungen der Transitionen die unbekanntem Materialflüsse im Netz sowie die Endbestände zu einer Periode t berechnen. Daran könnte die Berechnung einer weiteren Zeitperiode $t+1$ anschließen, wobei die

verbliebenen Bestände übertragen werden. Damit sind sogar zeitabhängige Berechnungen mit zeitlich variablen Materialflüssen möglich.

2.3 Nichtlineare Ansätze zur Prozessmodellierung

Bisher wurde bei den Transitionen der Einfachheit halber von linearen Technologien ausgegangen. Für die Berechnung des Mengengerüsts der Stoffströme und -bestände in einem Stoffstromnetz ist das aber keine zwingende Voraussetzung. Entscheidend ist hier die Bereitstellung von Input-Output-Daten durch die Transitionen – ggf. im Sinne einer Black Box.

Die Linearität ist eine häufige Annahme bei Prozessen, etwa im Bereich des Life Cycle Assessments (vgl. Heijungs 1994). Sie ermöglicht einfach die Skalierbarkeit der Produktionsmengen auf eine Einheit des zu betrachtenden Produktes, der sogenannten funktionellen Einheit sowie die Berücksichtigung von zyklischen Stoffströmen im Produktionssystem, etwa beim Recycling. Viele Prozesse werden damit allerdings in unzulässiger Weise vereinfacht. Nichtlinearitäten treten beispielsweise durch Stillstandsverbräuche oder auslastungsabhängige Produktivitäten auf. Gerade bei den umweltrelevanten Materialflüssen müssen oft Nichtlinearitäten durch komplexe chemische oder katalytische Reaktionen, etwa bei der Bildung bestimmter Emissionen usw., berücksichtigt werden.

An die Stelle der Produktionskoeffizienten tritt im allgemeinen Fall eine Produktionsfunktion $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$, die explizit nach den Input- und Outputflüssen formuliert werden kann:

$$x_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_m; y_{m+1}, \dots, y_{m+n})$$

$$y_j = f_j(x_1, \dots, x_m; y_{m+1}, \dots, y_{j-1}, y_{j+1}, \dots, y_{m+n})$$

Solche nichtlinearen Produktionsfunktionen werden i.allg. die Berechenbarkeit lokaler Stoffflüsse in der Umgebung einer Transition stark einschränken. Üblicherweise kann nur aus einem speziellen Satz an bekannten Flüssen auf die unbekanntes geschlossen werden, z.B. bei einer Müllverbrennungsanlage aus der Müllmenge und -zusammensetzung auf die Dioxinmissionen, aber nicht

umgekehrt aus den Dioxinmissionen auf die Müllmenge oder die Zusammensetzung.

Bei der Software Umberto[®] wurde bereits frühzeitig realisiert, in Transitionen die Produktions- oder Reduktionsprozesse auf verschiedene Weise zu beschreiben. Folgende Möglichkeiten bestehen heute:

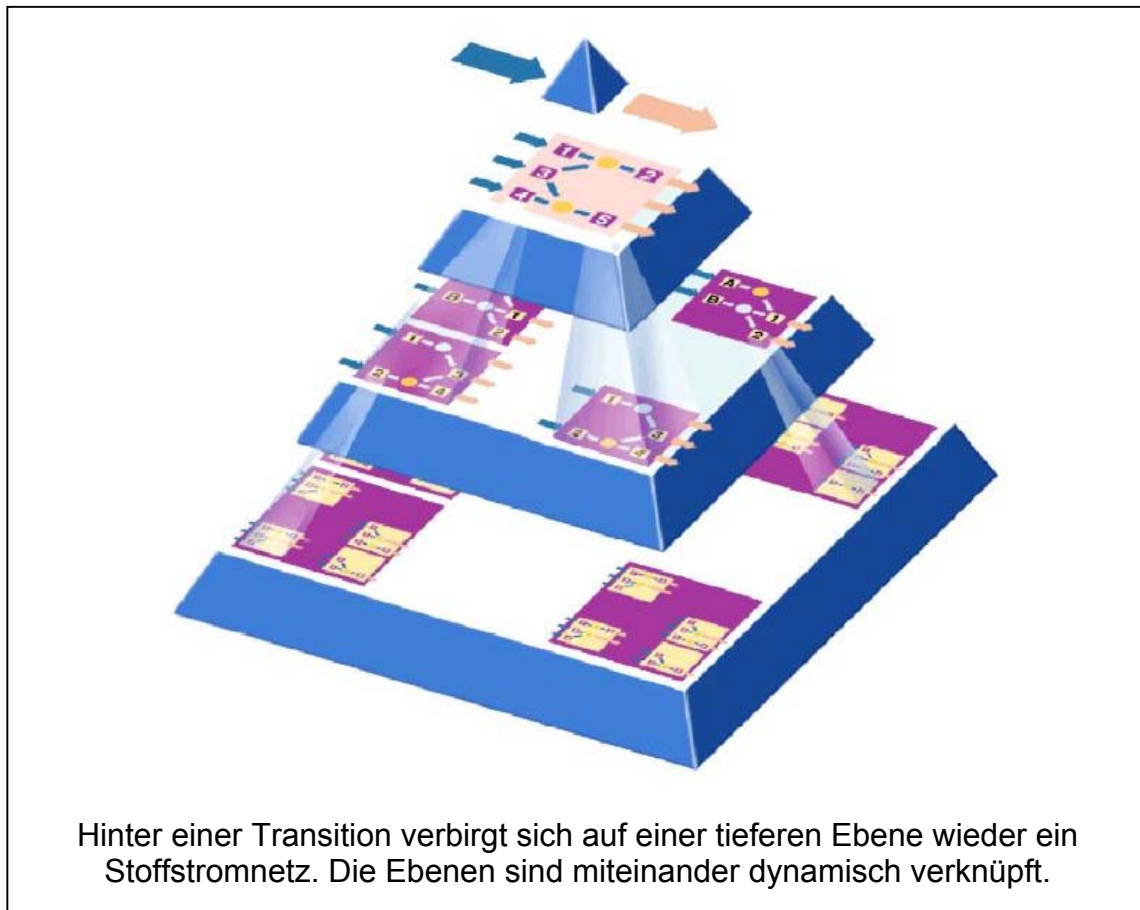
1. Lineare Technologien stellen, wie in Kap. 2.2 beschrieben, die einfachste Form der Prozessbeschreibung dar.
2. Es werden nichtlineare Produktionsfunktionen zugelassen, die explizit formuliert sind, also in der o.g. Form $x_i = f_i$ und $y_j = f_j$. Hierfür können auch mathematisch transzendente Funktionen, logische Operatoren usw. verwendet werden (vgl. Möller 1997, 122 f.).
3. Eine Transition kann als Aggregation eines größeren „darunter liegenden“ Stoffstromnetzes verstanden werden. Dies führt zum Aufbau hierarchischer Netze (vgl. Abb. 4).
4. In Transitionen kann auf externe Daten zugegriffen werden, z.B. empirisch ermittelte Datenbestände über Input- und Outputflüsse.
5. Eine Transition wird wiederum als Modell verstanden, das auch extern – d.h. in Form einer anderen Software etc. – vorliegen kann. Das Stoffstromnetz wird dann zu einem Metasystem, das unterschiedliche Modelle verschiedener Prozesse verbindet (siehe Schmidt 2002).

Damit wird eine große Vielfalt geboten, Produktions- und Reduktionsprozesse unterschiedlich zu beschreiben. Die Modellierung erfolgt lokal – in einer Transition – und kann sich darauf konzentrieren, den Prozess angemessen abzubilden. Hingegen bietet das Stoffstromnetz die Gewähr, dass die unterschiedlichen Prozessmodelle miteinander verbunden werden können. Sie werden als Black Boxes über ihre „Input-Output-Schnittstelle“ in das Stoffstromnetz eingebettet und stehen über die Stoffströme zueinander in Verbindung. Dies entspricht im Prinzip vielen realen Situationen, bei denen unterschiedliche Stationen eines materiellen Wertschöpfungsprozesses nur über die Zwischenprodukte miteinander verbunden sind, die einzelnen Prozesse aber eigenständig arbeiten und hierzu die jeweils adäquate Technologie einsetzen. Einen nachfolgen-

den Prozess „interessiert“ die Arbeitsweise seines Vorgängers nicht im Detail; für ihn ist nur wichtig, dass Menge, Qualität und Preis des Zwischenproduktes seinen Ansprüchen genügt.

Abbildung 4

Hierarchisches Stoffstromnetz



Das Stoffstromnetz bietet die Möglichkeit, Stoffstromsysteme modular aus Einzelprozessen aufzubauen, ohne für alle Prozesse eine bestimmte Art an Produktionsfunktion zur Modellierung vorauszusetzen. Dies unterscheidet die Methode der Stoffstromnetze und der darauf basierenden Software-Anwendungen von anderen Ansätzen wie sie im Life Cycle Assessment oder bei betrieblichen Stoffflussanalysen üblich sind. Zwar sind die gängigen Software-Anwendungen im LCA-Bereich auch modular aufgebaut und bieten große „Bibliotheken“ an vorgefertigten generischen Prozessmodulen. Typischerweise handelt es sich

dabei aber ausschließlich um rein lineare Modellierungen, meistens sogar nur für Einproduktprozesse.

Ein Prozessmodul im Rahmen der Stoffstromnetze hat dagegen Methodenfreiheit auch hinsichtlich der Modellierung. Es kann als lineare Technologie abgebildet sein, aber auch mit einer erheblich komplexeren Produktionsfunktion beschrieben werden oder gar ein eigenes Subsystem sein, das wiederum als Stoffstromnetz dargestellt werden kann. Die Frage, welche Modellklassen zur Prozessbeschreibung innerhalb einer Transition zugelassen werden, ist dann eher eine Frage der konkreten software-technischen Realisierung. Denkbar ist, dass Modelle zugelassen werden, in denen schwierige stöchiometrische oder reaktionskinetische Systeme gelöst werden, z.B. durch numerisches Lösen von Gleichungssystemen oder Differentialgleichungen. Es bietet sich in diesem Fall an, eine Transition als ein gekapseltes Submodell aufzufassen, das nur via Übergabe-Parameter – nämlich den Input- und Outputgrößen und ggf. throughput-bestimmenden Größen – mit dem Restnetz in Verbindung steht.

In der Software Umberto[®] können Transitionen u.a. mit sogenannten Skriptsprachen, wie etwa JavaScript, VisualBasicScript, Perl oder Python, definiert werden. Diesen Sprachen stehen alle Möglichkeiten moderner Programmiersprachen zur Verfügung und es lassen sich nahezu beliebige numerische Algorithmen umsetzen. Dazu kommt mittels moderner Schnittstellentechnologie – basierend auf dem von Microsoft entwickelten Component Object Model (COM) – die Verbindung zur externen Software-Umgebung, zu Datenpools und anderen Modellen.

2.4 Nutzen der Modell-Bildung mit Stoffstromnetzen

Die Materialflüsse eines modellhaften Systems sind – wie in der Realität – meistens unvollständig bekannt. Oft liegen nur die erzeugten Produktmengen oder bestimmte Einsatzmengen an Rohstoffen in einer Zeitperiode vor. Im Fall des Life Cycle Assessments wird sogar nur von einer Einheit des betrachteten Produktes, der funktionellen Einheit, ausgegangen. Aus diesen wenigen be-

kannten Flussgrößen müssen dann die unbekanntes erschlossen werden, z.B. der Verbrauch an Hilfs- und Betriebsstoffen, Emissionen usw.

An dieser Stelle greift die Lokalität der Stoffstromnetze: Aus lokal bekannten Flussgrößen wird mit Hilfe der Rechenvorschriften für Transitionen (Prozesse) und Stellen (Lager) auf die lokal unbekanntes Flussgrößen geschlossen, diese dienen dann der Berechnung weiterer Flussgrößen usw. Im Idealfall kann damit sukzessiv das gesamte Netz bestimmt werden. Eine Vorzugsrichtung, in der die Berechnung erfolgt, gibt es dabei nicht. Es muss z.B. nicht in oder gegen die Flussrichtung der Materialien gerechnet werden. Die bekannten Flussgrößen können in einem Netz sogar verstreut vorliegen. Durch einen iterativen und sequentiellen Berechnungsalgorithmus werden die lokalen Netzbereiche nacheinander berechnet, bis das gesamte Netz bestimmt ist.

Ist das Netz unterbestimmt, bleiben Flüsse und Bestände einzelner Netzbereiche allenfalls unbekannt. Ist ein Netz überbestimmt, treten ggf. Inkonsistenzen an den Schnittstellen der berechneten Netzbereiche auf, z.B. wenn die Aktivitätsniveaus verschiedener Prozesse nicht aufeinander eingestellt sind oder ein Prozess mehr Produkte herstellt, als ein anderer verbraucht. Zu solchen Situationen kann es insbesondere dann kommen, wenn in Netzen Recyclingströme, Stoffrekursionen oder allgemeiner: Zyklen auftreten. Hier kann die Pufferfunktion der Stellen genutzt werden, die dann in der betreffenden Periode einen Materialüberschuss aufweisen werden.

Dieser Materialüberschuss in zyklischen Netzen ist problemlos, solange über Zeitperioden bilanziert und er in die nächste Periode übertragen wird. Zu einer periodenbezogenen Bilanz gehört deshalb neben den Input- und Outputströmen auch immer die Bestandsveränderung des Systems hinzu. Dagegen sind solche Situationen in Produkt(öko)bilanzen misslich, da dieser Materialüberschuss der Leistung oder Ausbringungsmenge des Systems einer späteren Periode zugeordnet werden müsste. Das Problem löst sich allerdings im Rahmen der Leistungsverrechnung elegant auf (s.u.).

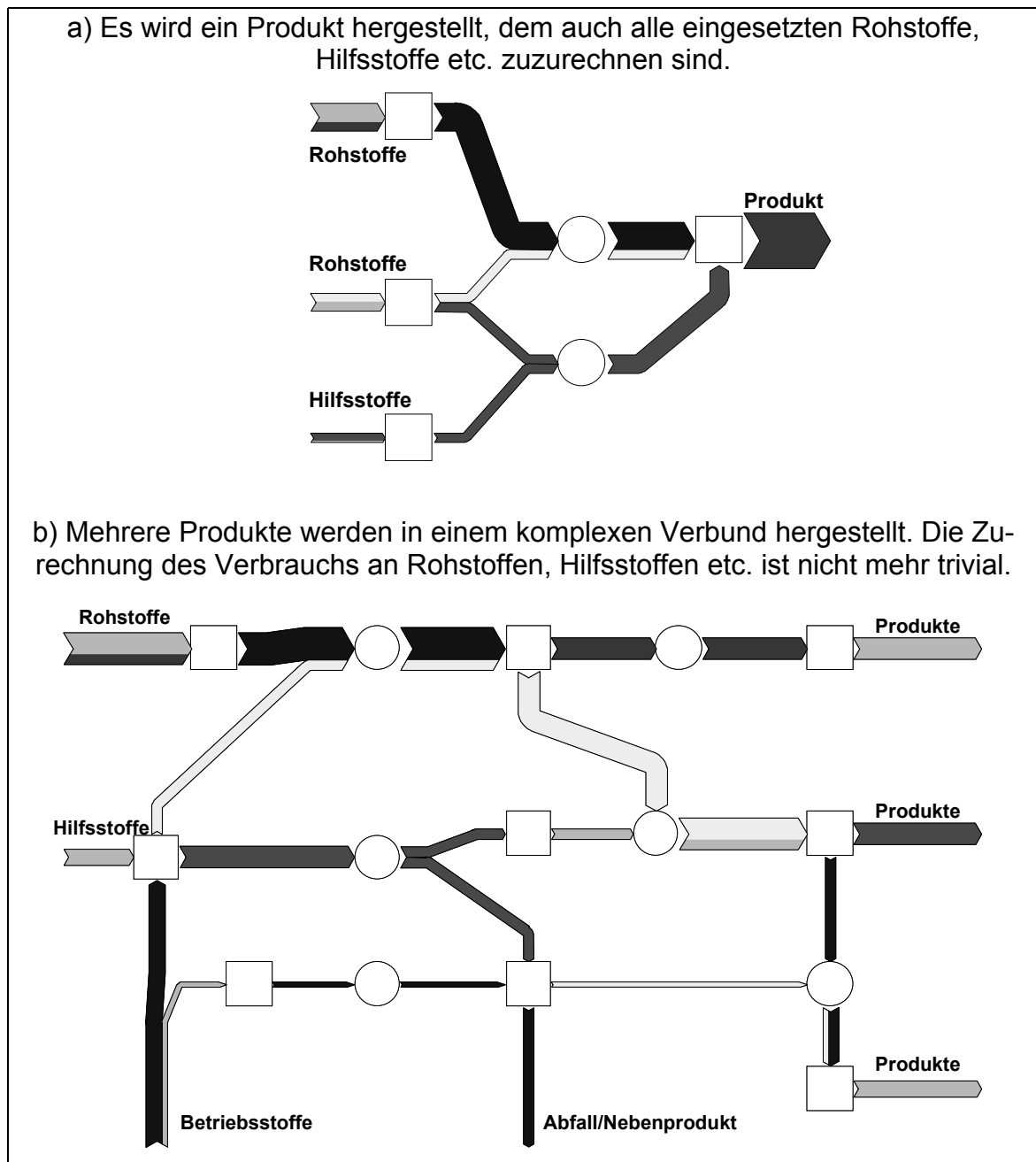
Der Nutzen dieser ganzen Berechnungen liegt darin, dass in einem Stoffstromsystem – z.B. in einem produzierenden Unternehmen oder längs eines Produktlebensweges – nicht alle Stoff- und Energieströme explizit bekannt sein müssen, z.B. aus Messungen, Erhebungen usw. Trotzdem kann mit den Informationen über die beteiligten Produktionsprozesse, einigen ausgewählten bekannten Stoffströmen usw. das Stoffstromsystem im Ganzen und im Detail quantifiziert werden. So ist in vielen Unternehmen zwar der Verbrauch an Erdgas und Diesel-Kraftstoff bekannt, nicht aber die damit verbundenen Emissionen an CO₂, NO_x etc. Werden für die Verbrennungs- oder Transportprozesse entsprechende Technologien angesetzt, so berechnet das Stoffstromnetz die Emissionen aus den wenigen Verbrauchsangaben. Außerdem werden durch die Modellierung Zusammenhänge hergestellt, die bei reiner Datensammlung nicht möglich gewesen wären.

3 Leistungsverrechnung in Stoffstromnetzen

Einer dieser hergestellten Zusammenhänge gibt Antwort auf die Frage, wie Aufwand und Nutzen oder Ertrag eines System zueinander stehen. Als Ertrag können die Produkte oder Dienstleistungen (z.B. Transport) verstanden werden. Der Aufwand wäre im einfachsten Fall die dazu erforderlichen Rohstoffe – sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht. Welche Produkte verbrauchen also welche Rohstoffe in welchen Mengen bzw. zu welchen Kosten? Welcher Umweltverbrauch, welche Umweltbelastungen sind damit verbunden?

Diese Fragen sind einfach zu beantworten, wenn das System nur *einen* Nutzen – etwa nur ein Produkt – hervorbringt. Üblich sind heute jedoch Produktionssysteme mit einer *Vielzahl* an Produkten (siehe Abb. 5), die häufig im Verbund hergestellt werden oder zumindest die gleichen Produktionsanlagen benutzen. Der Einsatz von Rohstoffen, Hilfs- und Betriebsstoffen lässt sich dann nicht mehr trivial den Produkten zurechnen.

Abbildung 5

Rohstoffströme im Ein- und Mehrproduktbetrieb

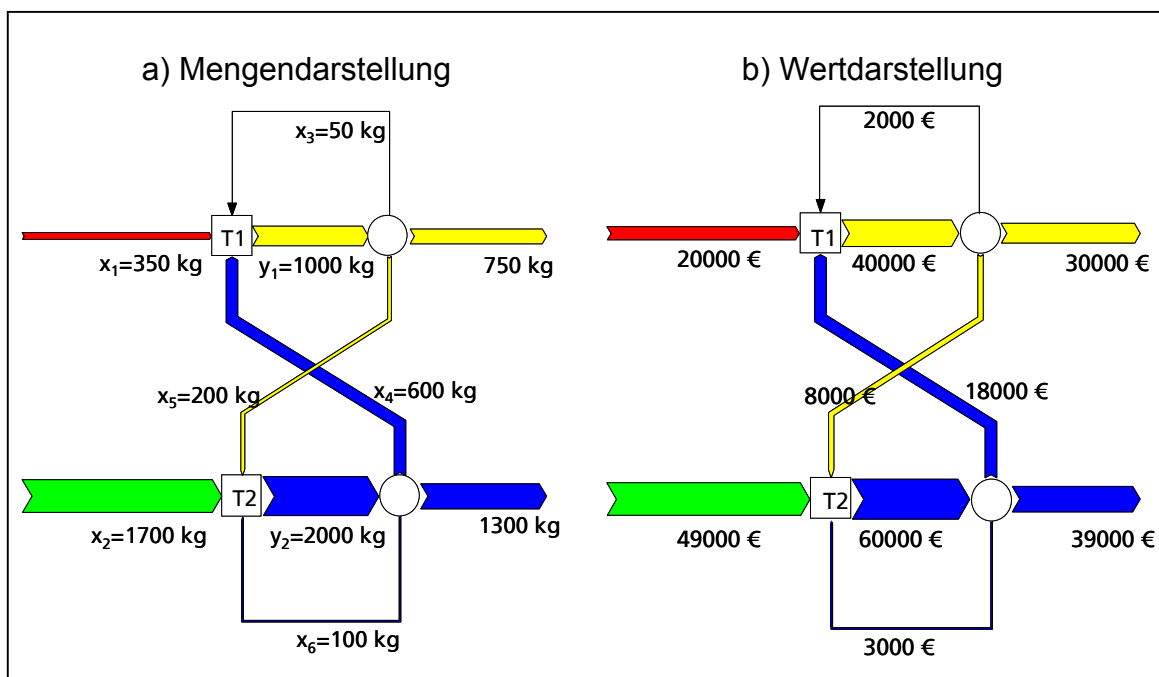
An diesem Punkt wird eine Leistungsverrechnung erforderlich. Bei Stoffstromnetzen, wie sie beispielsweise mit der Software Umberto® praktisch realisiert sind, setzt die Leistungsverrechnung auf ein bereits vollständig bestimmtes Mengengerüst auf (vgl. Möller 2000). Fluss- und Bestandsgrößen wurden bereits bestimmt. Inkonsistenzen können ggf. durch Bestandspuffer ausgeglichen

werden. Nur die Flüsse und Bestände sind für die Leistungsverrechnung von Interesse. Völlig uninteressant ist die Frage, wie in den Transitionen die Flüsse der Prozesse berechnet wurden und ob hier Nichtlinearitäten aufgetreten sind. Die Transitionen werden hier als Black Boxes betrachtet, die nur über ihr äußeres Input-Output-Mengengerüst dargestellt sind.

Ein Beispiel einer Leistungsverrechnung ist in Abb. 6 zu sehen. Dort sind auf der linken Seite die Mengenflüsse insgesamt dargestellt (nach Dyckhoff 1994, 313). Es treten bei den zwei Prozessen gegenseitige Leistungsverflechtungen auf, die eine Zurechnung des (Rohstoff-)Aufwandes auf die Produkte erschweren. T1 benötigt $x_1=350$ kg Rohstoff (mit Kosten von 20000 €) und stellt 1000 kg des Produktes y_1 her. Davon werden 50 kg in einem direkten Zyklus in T1 verbraucht, 200 kg in T2. Umgekehrt stellt T2 aus $x_2=1700$ kg Rohstoff (mit Kosten von 49000 €) eine Menge von 2000 kg eines weiteren Produktes y_2 her. Davon gehen 100 kg für den Eigenbedarf und 200 kg für die Produktion in T1 ab. Die Darstellung mit größenvariablen Pfeilen nennt man Sankey-Diagramm. Die unterschiedlichen Grautöne stehen für verschiedene Materialien.

Abbildung 6

**Leistungsverrechnung in einem einfachen Beispiel mit 2 Prozessen,
Zyklen und gegenseitigem Gütertausch.**



Wie kann man die Kosten auf die Ausbringungsmengen, also die 750 kg von Produkt 1 und die 1300 kg von Produkt 2 verteilen? Die Kostensätze für Produkt 1 und Produkt 2 müssen durch Lösen eines Gleichungssystems berechnet werden. kx_i und ky_j sind dabei die Kostensätze für die Rohstoffe bzw. die Produkte:

$$ky_1 \cdot y_1 = kx_1 \cdot x_1 + ky_1 \cdot x_3 + ky_2 \cdot x_4$$

$$ky_2 \cdot y_2 = kx_2 \cdot x_2 + ky_1 \cdot x_5 + ky_2 \cdot x_6$$

Alle Größen bis auf die Kostensätze ky_1 und ky_2 sind bekannt. Damit lassen sich die Kostensätze für die Produkte 1 und 2 berechnen, die der Produktkalkulation dienen, aber auch die internen Verrechnungspreise darstellen. So lässt sich die Wertdarstellung in Abb. 6b vollständig ergänzen. Die Produkte haben Kostensätze von 40 bzw. 30 €/kg.

Zwei Fragestellungen sind bei der Leistungsverrechnung zusätzlich zu berücksichtigen:

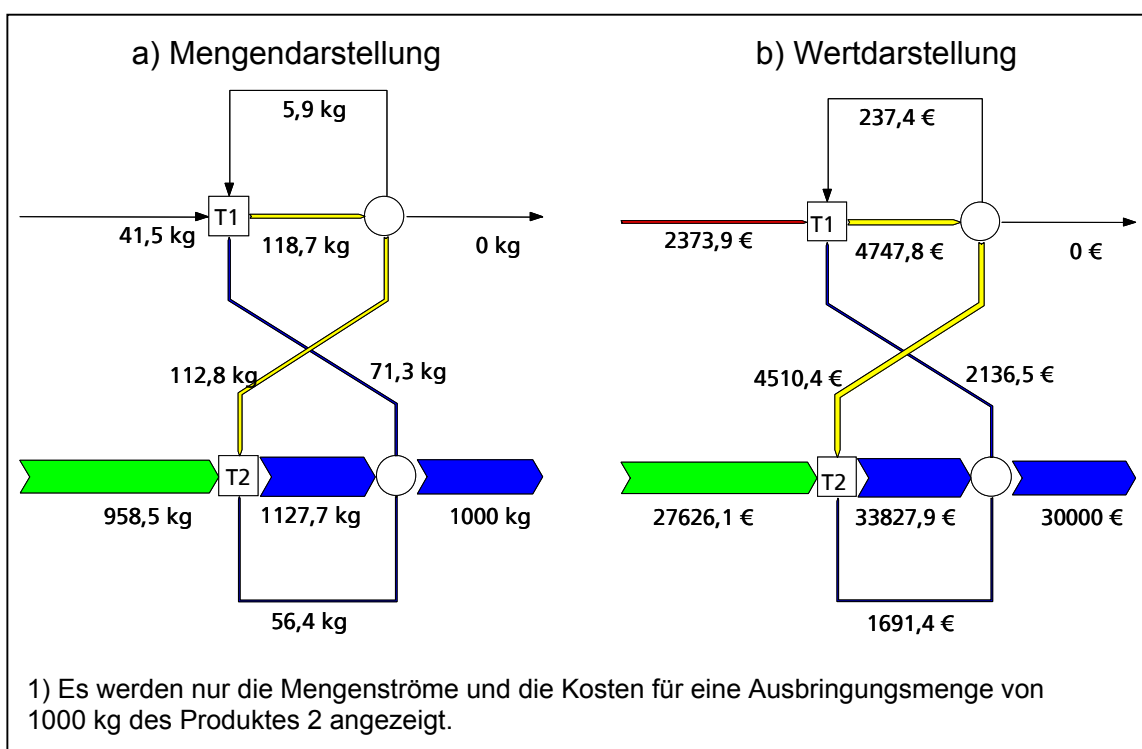
1. Wie verändern sich die Kostensätze, wenn beispielsweise statt der 1300 kg des Produktes 2 nur 1000 kg ausgeliefert werden, 300 kg aber im System verbleiben? Sie dürfen sich in dem Fall nicht ändern. Die Bestandsmenge und ihr Aufwand an Rohstoffen etc. muss herausgerechnet werden bzw. die im System gelagerte Menge an Produkten wird mit dem gleichen Kostensatz bewertet und stellt einen im System vorhandenen Wert dar.
2. Kann – basierend auf dem Mengengerüst aus Abb. 6 – auch für ein einzelnes Produkt der anteilige Aufwand (mengenmäßig und kostenmäßig) dargestellt werden? Dies ist in Abb. 7 dargestellt. Links erkennt man, welche Rohstoffmengen und internen Teilströme benötigt werden, um 1000 kg des Produktes 2 herzustellen. Rechts sind die Mengenströme mit den Kostensätzen bewertet. Innerhalb des Systems liegen damit die internen Verrechnungspreise vor. Das Produkt 2 hat wieder einen Kostensatz von 30 €/kg. Deutlich wird nun aber, wie er sich auf den Rohstoffeinsatz verteilt.

De facto wird bei Stoffstromnetzen die Leistungsverrechnung auf einer Mengenebene durchgeführt und die Mengen anschließend mit den Kostensätzen

bewertet (Möller 2000, 135 f.). Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass aus Mehrproduktsystemen eine stoffliche Einproduktbilanz erzeugt werden kann, wie sie auch im Life Cycle Assessment benötigt wird. Der zu schnelle Wechsel auf die Wertebene würde hingegen zu einem Informationsverlust bei zahlreichen Materialflüssen, die z.B. eine ökologische, aber keine ökonomische Bedeutung haben, führen.

Abbildung 7

Produktbezogene anteilige Leistungsverrechnung¹



Für die Stoffstrommodellierung ergibt sich damit ein zweistufiges Vorgehen: Zuerst erfolgt eine Ermittlung der Stoffströme (und ggf. -bestände) im System, wobei die realen Produktions- oder Aktivitätsniveaus wiedergegeben werden sollten. Darauf setzt eine Leistungsverrechnung in stofflich-materieller Hinsicht auf, die dann wertbezogen – ökonomisch oder ökologisch – interpretiert werden kann. Diese Vorgehensweise hat weitere Vorteile, wie im folgenden gezeigt wird.

4 Aufwand und Ertrag von Prozessen

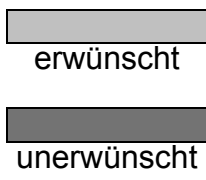
Doch wie kann eine Leistungsverrechnung auf der reinen Materialebene erfolgen? Es müsste zumindest festgelegt sein, was das Produkt und was die Rohstoffe, Abfälle etc. sind. Hier steckt natürlich eine implizite Bewertung der Materialien drin – allerdings eher qualitativer Art. Insbesondere für softwaretechnische Anwendungen sind Algorithmen erwünscht, die weitgehend eigenständig arbeiten und bei den Prozessen die entsprechende Festlegung treffen können.

Das gelingt durch eine Systematisierung der Stoff-, Material- und Energieströme nach sogenannten Objektkategorien oder -typen (Dyckhoff 1994, 65; Schmidt 1998, 300 f.). Dabei wird im wesentlichen zwischen Gütern und Übeln unterschieden. Güter haben – ökonomisch betrachtet – im allgemeinen einen positiven Marktwert, ihr Besitz ist erstrebenswert. Übel haben dagegen einen negativen Marktwert, man will sich ihrer entledigen (z.B. Abfälle) und ist bereit, dafür Geld zu bezahlen. Allein die Klassifizierung nach „Gut“ und „Übel“ reicht an dieser Stelle aus; es sind beispielsweise keine Marktpreise o.ä. erforderlich.

Abbildung 8

Klassifizierung der Stoff- und Energieströme eines Prozesses nach den Kategorien Gut und Übel

	Gut	Übel
Input	Faktor (z.B. Rohstoffe)	Redukt
Output	Produkt	Abprodukt (z.B. Abfall)



erwünscht

unerwünscht

Nach Dyckhoff (1994, 67).

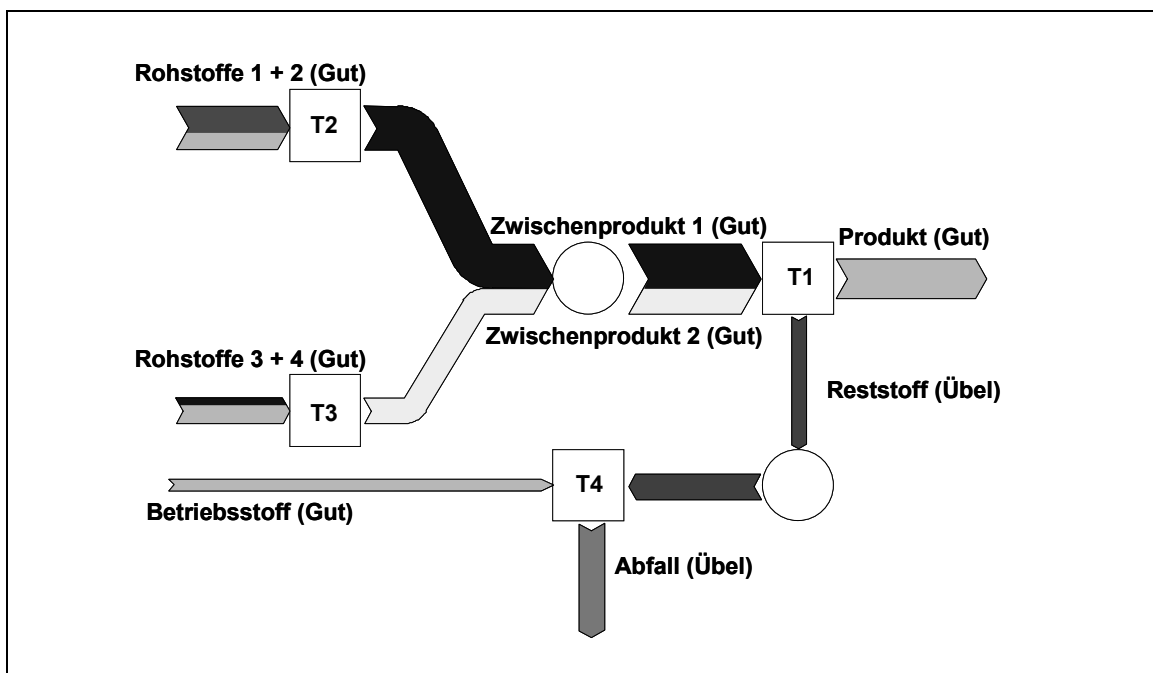
Bei einer Produktion werden meistens Güter auf der Inputseite verbraucht (Rohstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe). Die Güter auf der Outputseite sind die Produkte (siehe Abb. 8). Treten bei einem Prozess mehrere Produkte – also Güter auf

Güter auf der Outputseite – auf, so liegt ein Kuppelprozess vor. Allerdings muss dieser Ansatz noch für den Fall der Reduktion erweitert werden, der immer häufiger im Bereich der Entsorgungswirtschaft auftritt. Hier werden inputseitig Übel (z.B. Abfälle) vernichtet; daraus ergeben sich der Ertrag und i.d.R. die Erlöse des Prozesses. Die inputseitige Menge des Übels ist damit ein Referenzfluss des Prozesses, auf den alle anderen Aufwendungen (Energieverbrauch, Hilfsmittel etc.) anzurechnen sind.

In Abb. 9 ist dargestellt, wie mittels der Gut- und Übel-Kategorisierung der Stoffe und Energien im System verfolgt werden kann, was Ertrag und was Aufwand ist.

Abbildung 9

Beispiel für die Klassifizierung der im Stoffstromnetz fließenden Materialien als Übel oder Güter



Die Güter auf der Inputseite der Prozesse sind stets Aufwand, die Güter auf der Outputseite der Ertrag; das gilt gleichermaßen für das Gesamtsystem. Die Zwischenprodukte sind einerseits die Erträge der Prozesse T2 und T3, im Prozess T1 gehören sie andererseits zum Aufwand. So lässt sich von dem Systemertrag (also dem Endprodukt) ausgehend zurückverfolgen, was der Systemaufwand

zur Herstellung dieses Ertrages ist. Bei dem Abfall als einem Übel dreht sich die Logik um: Er taucht auf der Outputseite auf und muss als Aufwand gezählt werden – seine Entsorgung ist mit Kosten verbunden und auch aus ökologischen Gründen zu minimieren. Bei dem Prozess T4 ist der Ertrag die Beseitigung des inputseitigen Reststoffes als Übel.

Die unterschiedlichen Sichtweisen – Input-Output-Darstellung oder Ertrags-Aufwands-Darstellung – sind in Abb. 10 zusammengestellt. Auf die zahlenmäßigen Zusammenhänge wurde hier verzichtet. Zusammen mit ihnen lässt sich jedoch der Gesamtaufwand ermitteln, der zur Herstellung des Produktes erforderlich ist.

Abbildung 10

**Input-Output-Darstellung und Ertrags-Aufwand-Darstellung
der Prozesse¹ aus Abbildung 9**

	Input	Output		Ertrag	Aufwand
T1	Zwischenprodukt1 (G) Zwischenprodukt2 (G)	Produkt (G) Reststoff (Ü)		Produkt (G)	Zwischenprodukt1 (G) Zwischenprodukt2 (G) Reststoff (Ü)
T2	Rohstoff 1 (G) Rohstoff 2 (G)	Zwischenprodukt1 (G)		Zwischenprodukt1 (G)	Rohstoff 1 (G) Rohstoff 2 (G)
T3	Rohstoff 3 (G) Rohstoff 4 (G)	Zwischenprodukt2 (G)		Zwischenprodukt2 (G)	Rohstoff 3 (G) Rohstoff 4 (G)
T4	Reststoff (Ü) Betriebsstoffe (G)	Abfall (Ü)	➔	Reststoff (Ü)	Abfall (Ü) Betriebsstoff (G)
Insg.	Rohstoff 1 (G) Rohstoff 2 (G) Rohstoff 3 (G) Rohstoff 4 (G) Betriebsstoff (G)	Produkt (G) Abfall (Ü)		Produkt (G)	Rohstoff 1 (G) Rohstoff 2 (G) Rohstoff 3 (G) Rohstoff 4 (G) Betriebsstoff (G) Abfall (Ü)

1) Jeder Prozess hat einen Ertrag. Damit lässt sich auch der Ertrag bzw. Aufwand des Systems insgesamt feststellen. G bedeutet Gut, Ü steht für Übel.

Die Verrechnung des Aufwandes muss wohlgermerkt nicht auf einer Wertebene (z.B. in €) durchgeführt werden, sondern kann sich auf die physischen Mengen

beziehen. Eine Bewertung – ökonomisch oder ökologisch – kann danach erfolgen. Damit steht die Leistungsverrechnung nicht nur einer Kostenrechnung, sondern auch einer ökologischen Aufwandsbetrachtung zur Verfügung. Die Einführung der Gut/Übel-Kategorien hat noch einen anderen Vorteil: Auch unter ökologischen Kriterien können Materialien und Stoffe in dieses Schema eingeordnet werden. Unliebsame Emissionen, Abfälle, Abwasser werden als Übel dargestellt – auch dann, wenn sie keine negativen Marktpreise haben, also Kosten verursachen, sondern einfach nur in der Umwelt „unerwünscht“ sind. Hier tritt wieder die ökonomisch-ökologische Dualität in der Wertdarstellung auf. Die Wertung, was ein Übel ist, kann sich auf unterschiedlichen Wertebenen verschieden darstellen. Viele ökologische Übel sind ökonomisch betrachtet ein Neutrum – indifferent, da sie keine Kosten verursachen. So kann mit einer Leistungsverrechnung auch verfolgt werden, wie z.B. die CO₂-Emissionen eines Systems den unterschiedlichen Nutzenfunktionen (Produkte, Abfallvernichtung, etc.) angerechnet werden können und sollten.

Die Darstellung des Aufwandes und des Ertrages eines Prozesses oder gar eines ganzen Systems passt gut in die Handlungsstrategie der Produktivitätssteigerung – oft auch ungenügend als „Effizienzsteigerung“ oder „Ökoeffizienz“ bezeichnet. Hier gilt es allgemein, den Ertrag pro Aufwandseinheit zu erhöhen, entweder durch gesteigerten Ertrag und/oder durch verringerten Aufwand. Dies bezieht sich gleichermaßen auf eine ökonomische wie auch ökologische Wertigkeit des Aufwandes: weniger Kosten, weniger Ressourceneinsatz, weniger Abfallaufkommen oder weniger Emissionen für mehr Ertrag. Diese Ziele lassen sich mit dem gewählten Vorgehen einheitlich nebeneinander darstellen und entsprechend verfolgen.

5 Kuppelprozesse und Allokation bei einzelnen Prozessen

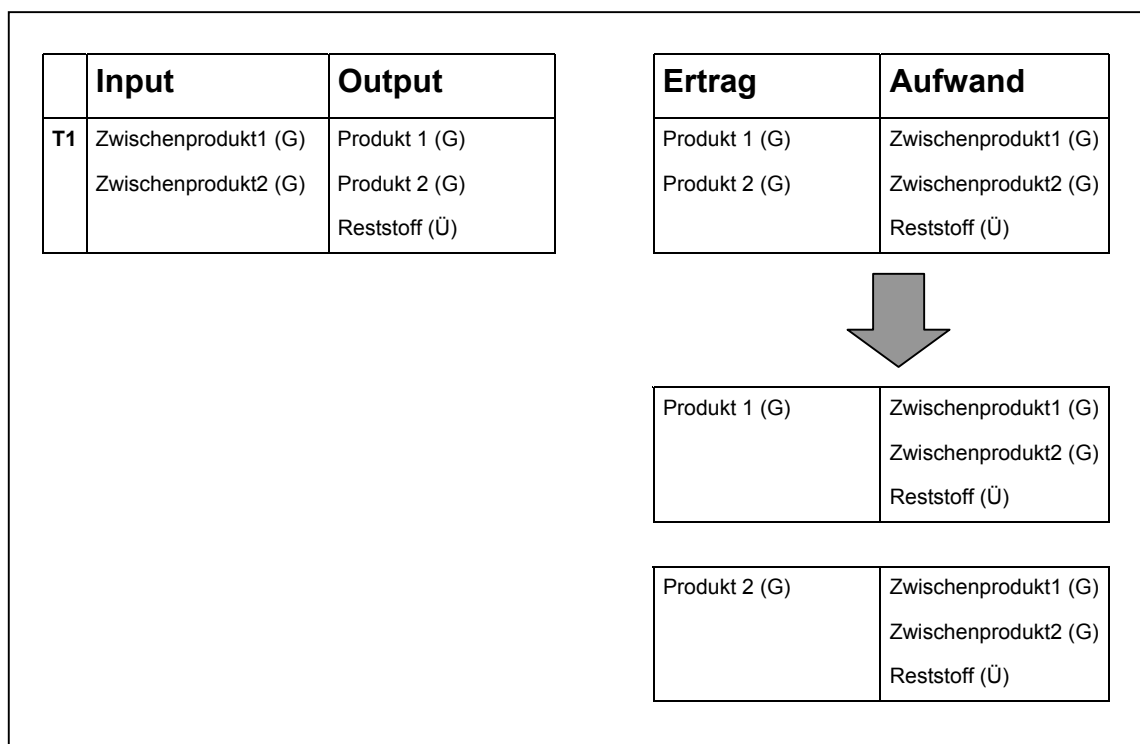
Wie verrechnet man aber den Rohstoffeinsatz eines Prozesses, wenn er mehrere Produkte hervorbringt, es sich also um einen Kuppelprozess handelt? Für Software-Lösungen ist es bereits eine Herausforderung zu erkennen, ob ein Kuppelprozess überhaupt vorliegt und durch den Prozess ein mehrfacher Nut-

zen erzeugt wird. Mit der vorgestellten Gut/Übel-Unterscheidung ist das kein Problem mehr – sogar für den allgemeinen Fall einer Kuppelproduktion (s.u.).

In Abb. 11 ist ein typischer Fall einer Kuppelproduktion dargestellt. Es treten auf der Outputseite 2 Produkte und damit auch 2 Erträge auf. Der Aufwand des Prozesses muss so gesplittet werden, dass er auf die beiden Produkte verteilt werden kann und eine Leistungsverrechnung im System pro Produkt möglich wird.

Abbildung 11

**Beispiel für eine Kuppelproduktion und die Verteilung auf
zwei Einproduktprozesse**

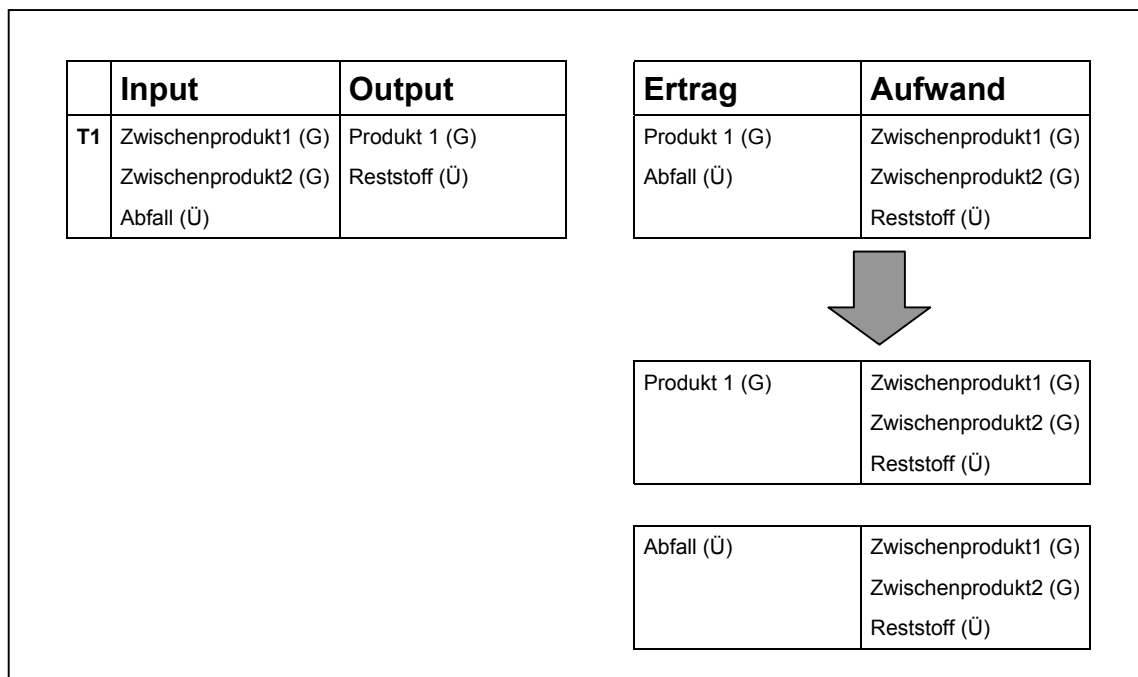


Die Zurechnung des Aufwandes – in der LCA-Sprache: die Allokation – lässt sich auch in Stoffstromnetzen nicht ultimativ lösen, sondern ist kontextabhängig. Die Vorschläge reichen von technisch-naturwissenschaftlichen Zurechnungen (siehe z.B. ISO-Norm 14.041 zu Life Cycle Assessment) bis hin zu klassischen Kuppelprozess-Zurechnungen. In der Regel wird man einen mengenstrom- oder marktpreisbezogenen Verteilungsschlüssel auswählen.

Aus Sicht der Leistungsverrechnung kann hier noch der allgemeinere Fall auftreten, dass ein Ertrag sowohl auf der Outputseite (als Produkt) als auch auf der Inputseite (als Übel) gegeben ist (Abb. 12). Solche Kuppelprozesse, bei denen gleichermaßen Übel beseitigt und Produkte produziert werden, treten in der Reduktionswirtschaft durchaus auf. Ein Beispiel dafür ist ein Müllheizwerk, das Müll vernichtet und Wärme produziert. Wie werden die Kosten des Werkes auf die Müllgebühren und die abgegebene Wärme verteilt?

Abbildung 12

Allgemeinerer Fall einer Kuppelproduktion mit Übelvernichtung



Im Prinzip wird hier nach dem gleichen Schema vorgegangen: Der Kuppelprozess wird anhand der mehrfachen Erträge als solcher identifiziert und in 2 Prozesse mit einfachen Ertrag gesplittet. Die schwierige Frage bleibt in jedem Einzelfall natürlich, nach welchen Schlüsseln der Aufwand verteilt wird.

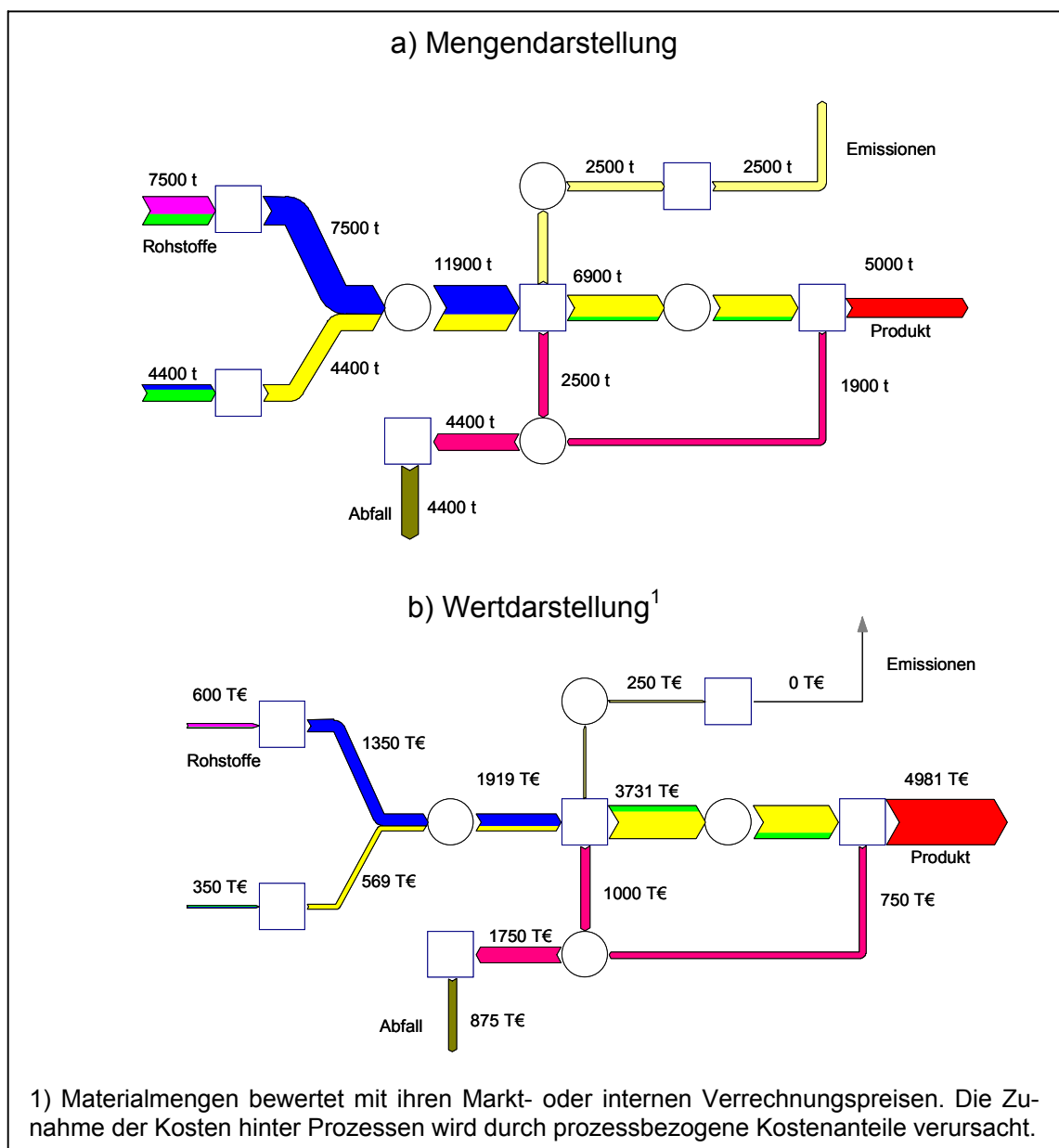
6 Berücksichtigung prozessbezogener Kostenanteile

Bisher wurde bei der kostenmäßigen Bewertung davon ausgegangen, dass nur materialgetragene Kostenanteile relevant sind – durch die ausschließliche Berechnung der Stoff- und Energieströme und deren Bewertung mittels Markt- und

Verrechnungspreisen. Natürlich tragen auch die Prozesse zu den Kosten bei: durch Lohnkosten, Abschreibungen, Lizenzgebühren usw. Diese Kostenanteile können bei der Berechnung des Kostengerüsts zusätzlich berücksichtigt werden. Ein teurer Bearbeitungsprozess führt dann beispielsweise dazu, dass der Wert der Produkte deutlich höher ist als die Summe der inputseitigen Rohstoffkosten. Dies ist in Abb. 13b dargestellt.

Abbildung 13

Beispiel für ein Stoffstromnetz



Auf diese Weise kann der Wertschöpfungsprozess als Sankey-Diagramm dargestellt werden: die kumulierten Kosten der Zwischenprodukte für ihre Herstellung wachsen bis hin zum Endprodukt, das i.d.R. dann auch der Kostenträger ist. Die Gesamtkosten sind eine Grundlage für die Preiskalkulation. Dabei sind zwei Möglichkeiten denkbar, mit fixen Prozesskostenanteilen umzugehen: Sie entweder zu linearisieren und im Sinne einer Vollkostenrechnung dem Produkt-output voll anzurechnen. Oder nur die variablen Kostenanteile zu berücksichtigen und die fixen Kosten über eine Deckungsbeitragsrechnung einzubringen – in der Software Umberto[®] sind beide Varianten möglich.

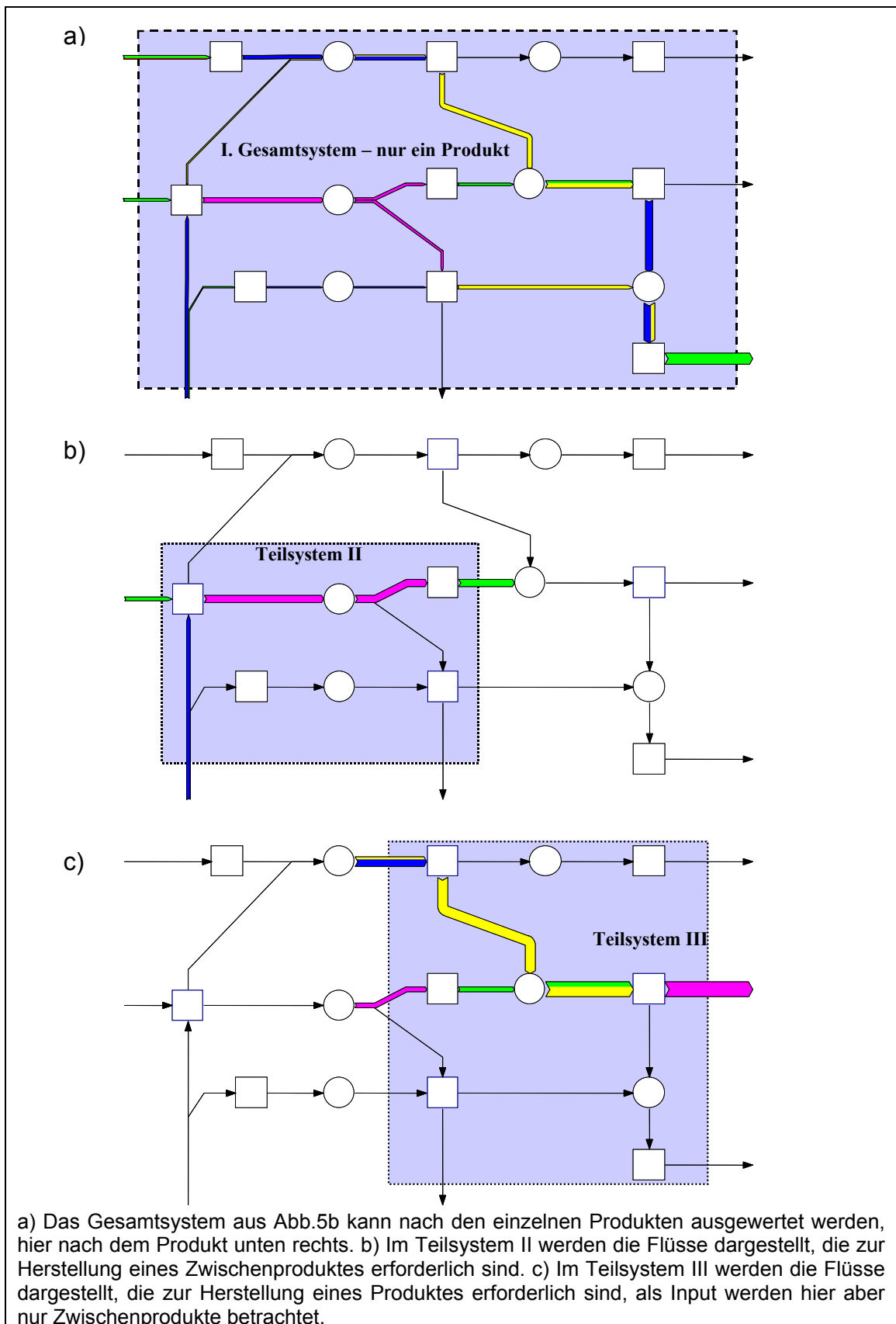
Selbst die Entsorgungskosten von Abfällen können hier berücksichtigt werden. In Abb. 13 stellen die 875 T€ die Kosten der externen Entsorgung für die 4400 t Abfall dar. Der Abfall wurde in einer Transition konditioniert, dort fallen Lohnkosten an. Diese Kosten werden in Richtung des Endproduktes weitergegeben – dorthin vergrößert sich auch der Sankey-Pfeil mit den Kosten. Damit wird den Betrieben eine sehr weitgehende Kostenanalyse geboten. Typischerweise werden nämlich Entsorgungskosten im Abfall- oder Abwasserbereich als Gemeinkosten geführt. Die Verbindung zu den Leistungen des Systems und damit zu den Kostenträgern geht meistens verloren. Liegen jedoch Stoffstrominformationen auf der materiellen Ebene vor, so kann dieser Zusammenhang wieder hergestellt werden. Gemeinkosten werden den Kostenträgern zugeordnet – aber nicht über willkürliche Verteilungsschlüssel, sondern aufgrund der technischen Strukturen und Materialflüsse.

7 Bilanzieren in Stoffstromnetzen

Die Modellierung eines Stoffstromsystems als Netz legt es intuitiv nahe, dass Bilanzgrenzen, in denen ein System als Input-Output-Bilanz quantifiziert werden soll, flexibel gesetzt werden können. Im einfachsten Fall – so wird es auch software-seitig unterstützt – zieht man in dem Stoffstromnetz einen Bilanzrahmen um das gewünschte Gebiet. Alles was in diesen oder aus diesem Rahmen fließt, bestimmt die Input-Output-Bilanz. Damit ist es möglich, von beliebigen

Abbildung 14

Auswertung des Stoffstrombildes aus Abbildung 5b



Teilsystemen Bilanzen zu erstellen. Das reicht von einem Einzelprozess bis hin zum Gesamtsystem. Es können Prozesse nach bestimmten Merkmalen (Technologien etc.) ausgesucht und aggregiert werden.

Seine Entfaltung erfährt dieses Konzept dann, wenn man es zusammen mit der Leistungsverrechnung anwendet. Bei der Leistungsverrechnung ist die Frage relevant: Welche Stoffströme des betrachteten (Teil-)Systems sind der Ertrag, also die Produkte, denen die Rohstoffe etc. zuzurechnen sind? Wir bezeichnen dies als Referenzflüsse, das ist quasi der Nutzen-Output eines Stoffstromsystems. Die Antwort auf diese Frage hängt von den Bilanzgrenzen ab. Das Gesamtsystem aus Abb. 5b hat beispielsweise 3 Referenzflüsse (Produkte), die einzeln bezüglich der zugerechneten Ressourcen betrachtet werden können (in Abb. 14a). Betrachtet man in Abb. 14b das Teilsystem II, so entsteht hier ein anderer Nutzen (Zwischenprodukt), der als Referenzfluss dient. Im Teilsystem III (Abb. 14c) wird hingegen nicht der Aufwand an Rohstoffen, sondern an Zwischenprodukten erfasst.

Gerade für Verbundsysteme eignet sich diese Auswertemöglichkeit. Sie kann helfen, die Frage nach internen Verrechnungspreisen von Zwischenprodukten zu lösen. Auf ökologischer Ebene können damit die „ökologischen Rucksäcke“ nicht nur der Endprodukte, sondern auch aller Zwischenprodukte dargestellt werden. Damit wird maximale Transparenz in ökologischer und ökonomischer Hinsicht hergestellt.

8 Anwendung auf die sogenannte Reststoffkostenrechnung

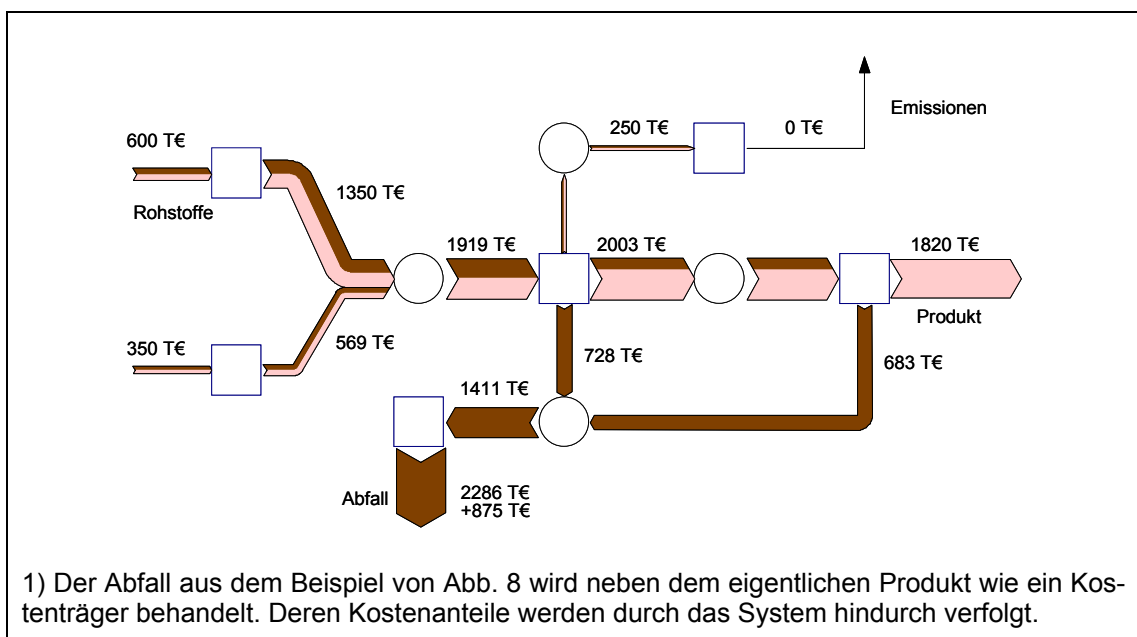
Mit der Gut/Übel-Unterscheidung der Stoffe und Energien lassen sich interessante Analysen eines Systems durchführen. So ist damit auch eine sogenannte Reststoffkostenrechnung möglich, wie sie seit ein paar Jahren im betrieblichen Umweltmanagement sehr populär ist (Fischer et al. 1997). Bei der Reststoffkostenrechnung werden die Kosten an Rohstoffen sowie an Materialbearbeitungskosten, Transportkosten etc. nicht nur auf die Produkte, sondern auch auf die angefallenen Reststoffe (Abfälle) verteilt. Damit soll verdeutlicht werden, welche

Kosten im Gesamtsystem eingespart werden können, wenn der Reststoff-Anfall verringert wird. Die Einsparungspotentiale liegen nicht nur bei den direkten Entsorgungskosten der Abfälle, sondern im gesamten System, da z.B. durch geringere Abfallmengen auch an Rohstoffen und deren Bearbeitung eingespart werden kann.

In der hier vorgestellten Systematik handelt es sich um nichts anderes, als dass man die Reststoffe nicht als Übel auf der Outputseite betrachtet, sondern als ein Produkt, d.h. einen Kostenträger, der im Gesamtsystem Kosten mitverursacht. In Abb. 15 ist eine solche Darstellung gewählt. Bei den Kosten der Rohstoffe, Zwischenprodukte usw. kann durch die Farbgebung der Sankey-Pfeile im gesamten System zurückverfolgt werden, welche Anteile dem Produkt und welche dem Reststoff zuzurechnen wären – vorausgesetzt, der Reststoff wäre ein Kostenträger. In der Regel zeigt sich bei solchen Betrachtungen, dass die eigentlichen Entsorgungskosten (hier 875 T€) nur einen untergeordneten Anteil des Kosteneinsparpotentials darstellt, wenn man Reststoffmengen verringern will.

Abbildung 15

Abfall als Kostenträger¹



Die Schwierigkeit der Reststoffkostenrechnung liegt in einer geeigneten Allokation oder Kuppelprozesszurechnung in den einzelnen Prozessen, wo der Aufwand eines Prozesses nicht mehr nur dem Produkt, sondern auch dem Reststoff angerechnet werden soll. Was wird als Nutzen des Reststoffes angesetzt, der eine Verrechnung mit dem eigentlichen Produkt zulässt? Es besteht die Gefahr, hier einfach nach physischen oder stofflichen Eigenschaften (Masse, Volumen, Heizwert etc.) die Zurechnung durchzuführen, was in einigen Fällen naheliegend ist (z.B. Transport, Lagerung), in vielen Fällen aber zu erheblichen Problemen und Artefakten in den Ergebnissen führt. Solche Analysen sollten deshalb nur mit sehr viel Bedacht eingesetzt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass erst die stringente Darstellung und Rückführung der Reststoffkostenrechnung auf die Stoffstromnetze und die Leistungsverrechnung diese methodischen Besonderheiten verdeutlichen.

9 Umsetzung als Software

Die vorgenannten methodischen Ansätze sind – wie bereits mehrfach erwähnt – in der Software Umberto[®] umgesetzt. Das Programm wurde vom ifu-Institut für Umweltinformatik in Hamburg zusammen mit dem ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg entwickelt (Schmidt u. Häuslein 1997). Das IAF an der Hochschule Pforzheim ist an der Weiterentwicklung und besonders an dem praxisnahen Einsatz der Software beteiligt. Sie liegt inzwischen in der Version 4.1 vor und läuft unter MS-Windows[™].

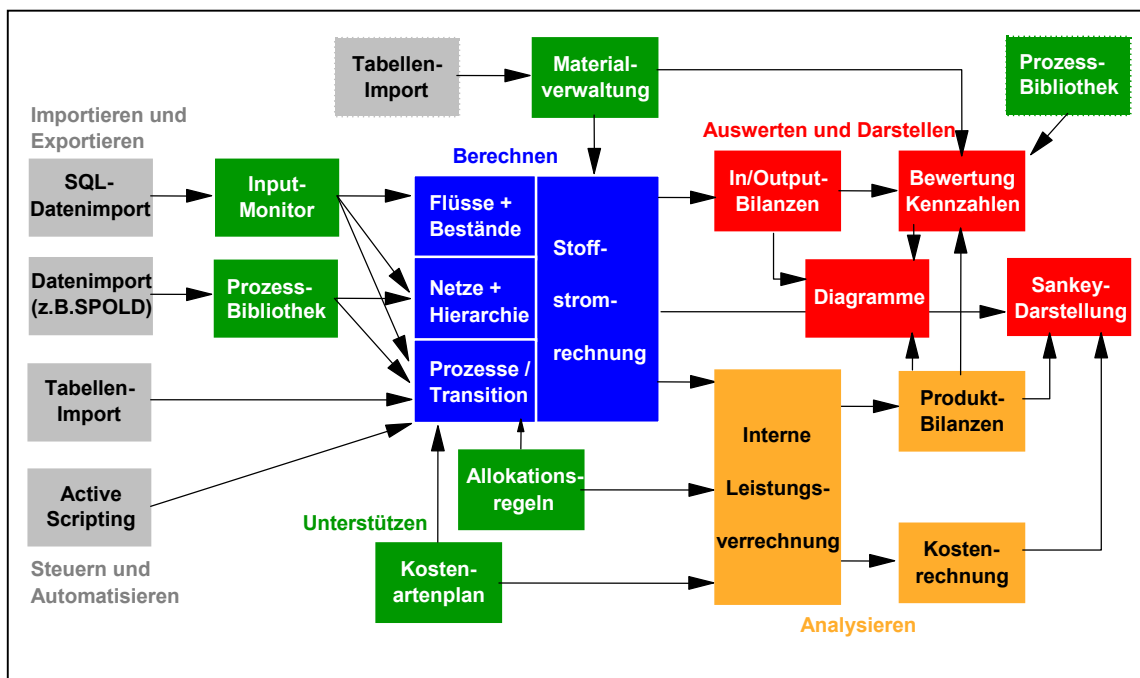
Umberto[®] ist in den Sprachen Delphi und C++ programmiert und nutzt eine SQL-Datenbank, z.B. Interbase[™] oder (ab Version 4.2) Oracle[™], zur Verwaltung aller Daten – etwa der Netzstruktur oder der Ströme und Bestände. Damit lässt sich das Programm auch als Client-Server-System nutzen, was in betrieblichen Zusammenhängen besonders wichtig ist. Für wissenschaftliche Anwendungen kann es aber genauso als Stand-alone-System betrieben werden.

Für die Entwicklung der Software wird moderne Komponentenbauweise eingesetzt und das Component Object Model (COM) verwendet. Diese Technologie

hat den Vorteil, dass zwischen verschiedenen Programmkomponenten Schnittstellen definiert sind, die auch von anderer Software genutzt werden können. Dadurch ist eine Verknüpfung mit anderen Computeranwendungen, z.B. zwecks Verbindung unterschiedlicher Modelle oder Austausch von Daten, möglich.

Abbildung 16

Die Struktur der Software Umberto®.



Der Kern des Programms Umberto® besteht in der Stoffstromrechnung, die wesentlich auf der Struktur und Definition der Netzelemente – den Prozessen, Flüssen und Beständen – aufbaut. Um diesen Berechnungskern gruppieren sich verschiedene Komponenten (siehe Abb. 16). Von besonderer Bedeutung ist die Leistungsverrechnung, die auf der Stoffstromrechnung aufsetzt und dazu ggf. Angaben über Kostenarten oder Allokationsregeln in den Prozessen benötigt. Die Ergebnisse können schließlich ausgewertet und dargestellt werden – sowohl numerisch als auch graphisch, z.B. als Sankey-Diagramm. Insbesondere können aus den Ergebnissen auch beliebige, selbstdefinierte Kennzahlen generiert werden. Das System wird abgerundet durch Hilfskomponenten des Datenexports und -imports, sowie durch eine Prozessbibliothek, in der ca. 400

generische Produktions- und Umwandlungsprozesse abgespeichert sind und jederzeit in ein neues Netz eingefügt werden können.

Vor Beginn der Modellierung sollte festgelegt werden, welche Materialien, Stoffe, Energien etc. in dem Stoffstromnetz betrachtet werden. Diese Materialtaxonomie ist die Basis für das zu erstellende und zu berechnende Mengengerüst. De facto wird man den Katalog an zu betrachtenden Materialien mit der Modellierung und auch späteren Analyse kontinuierlich erweitern und verändern wollen. Das System muss also flexibel und trotzdem korrekt auf solche Ergänzungen reagieren.

Die eigentliche *Modellierung* von Stoffstromnetzen erfolgt in einem *ersten Schritt* mittels eines graphischen Editors (Abb. 17). In ihm werden die Netze quasi „gezeichnet“. Diese Oberfläche trägt sehr stark zu einer intuitiven Erfassung und Beschreibung des Stoffstromproblems bei. Hinter den Netzelementen verbergen sich allerdings Objekte, die aus Definitionen, Rechenvorschriften etc. bestehen. Deshalb müssen in einem *zweiten Schritt* Netzobjekte definiert (oder spezifiziert) werden. Dazu gehört z.B. die Festlegung von Produktionsfunktionen in den Transitionen/Prozessen. Welche Netzobjekte mit welcher Detaillierung und in welcher Kombination spezifiziert werden, hängt von der Problemstellung ab.

In einem betrieblichen Kontext, wo bereits umfangreiche Daten über Prozesse, Stoffströme etc. vorliegen, können solche Stoffstromnetze auch automatisch aufgebaut werden. Dies erfolgt dann über sogenannte Scripte, die die Schnittstelle zu den externen Datenbeständen darstellen und eine problemadäquate Übertragung der Informationen gewährleisten. Man kann sich das wie ein selbstdefiniertes Makro (etwa unter Excel) vorstellen, das auf externe Datenbanken usw. zugreifen kann. In der Praxis lassen sich damit beispielsweise Netze von mehreren Tausend Prozessen automatisch generieren.

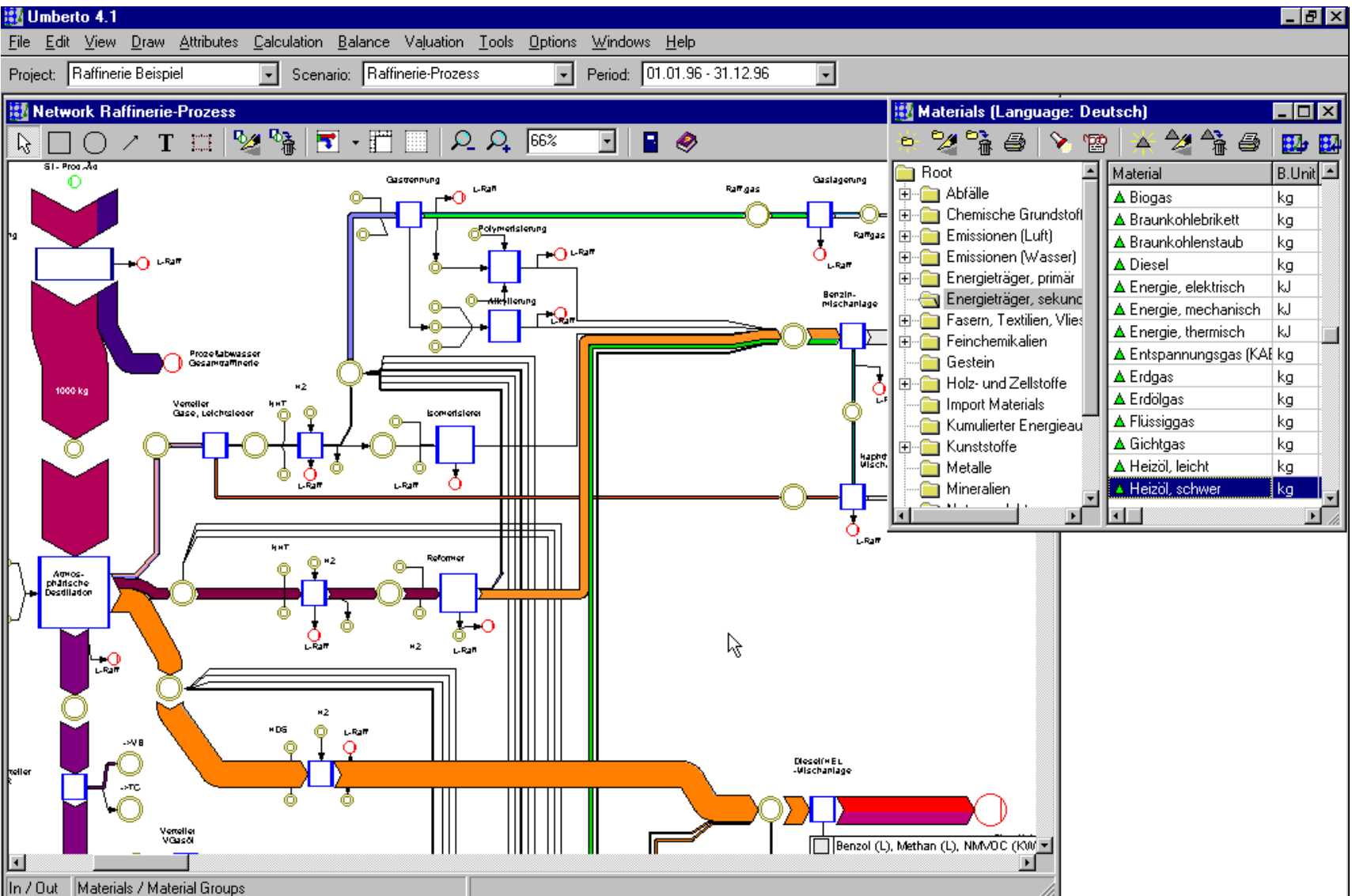


Abbildung 17
 Die Benutzeroberfläche von Umberto mit dem Netz-Editor und der Stammdatenverwaltung für Materialien und Energien (rechts)

Nach der Modellierung erfolgt die *Berechnung* des Netzes. Darunter wird verstanden, alle unbekanntes Ströme oder Bestände im System aus den bekannten Informationen zu erschließen und zu berechnen. In einem vollständig berechneten Netz sollten alle Materialströme und -bestände zu den betrachteten Zeitperioden bekannt sein. Das Netz ist damit bereits im Sinne von stofflichen Input-Output-Bilanzen auswertbar.

Darauf setzt nun die *Leistungsverrechnung*, die für die Referenzflüsse des gewählten Systems (mit der Maus können auch Netzausschnitte als kleinere Bilanzräume ausgewählt werden) die Materialaufwendungen berechnet. Zusammen mit den material-spezifischen Marktpreisen und den prozessbezogenen Kostenarten und Kostentreibern lassen sich auch die Kosten ermitteln – unterschieden nach Kostenträger, Prozessen usw.

Diesen Berechnungen folgen die *Auswertungen* und Analysen. Alle Ergebnisse können innerhalb des Netzes bei jedem Netzobjekt abgefragt werden. Sie können tabellarisch zusammengestellt (als „I/O-Bilanzen“) oder als Sankey-Diagramme dargestellt werden. Besonders die Sankey-Diagramme haben sich als mächtiges Mittel für die Darstellung und Analyse herausgestellt – einerseits aufgrund ihrer Anschaulichkeit, andererseits aufgrund ihrer in den Betriebswirtschaften ungewöhnlichen Darstellungsform.

Allerdings sollte man die Sankey-Diagramme mit Vorsicht interpretieren. Sofern damit Stoffströme abgebildet werden, ist ihre Interpretation unzweifelhaft: Die Pfeilspitze zeigt die Flussrichtung der Stoffströme, die Pfeilbreite die relative Menge an. Die Farbgebung weist auf die verschiedenen Stoffe hin oder kann ein sonstiges Gliederungsschema ausdrücken (z.B. Gefährlichkeit etc.). Mit einem Blick erfasst man die mengenmäßig herausragenden Stoffströme eines Systems.

Was bedeutet hingegen ein Sankey-Pfeil, der mit einem Euro-Betrag beziffert ist? Er bedeutet *nicht*, dass hier Geld fließt. Es handelt sich nach wie vor um einen Stoffstrom, der allerdings mit seinem internen Verrechnungspreis bewertet ist. Der Sankey-Pfeil ist damit ein Hinweis auf die Kosten, die mit dem Auftreten dieses Stoff-

stroms verbunden sind. Typischerweise werden diese Kosten sich zum Kostenträger des Systems hin vergrößern. Die Pfeilspitze weist aber trotzdem in die Richtung des physischen Stoffstroms.

10 Ausblick

Die vorgestellte Modellierung von Stoffströmen und ihre Auswertung eröffnet dem interessierten Anwender neue Möglichkeiten im Erkenntnis- und Entscheidungsprozess. Das Modellieren wird von der Software Umberto[®] so unterstützt, dass Modellbildung, Datenrecherche, Berechnung und Analyse keinen linearen Prozess darstellen, der nacheinander abgearbeitet werden muss. Vielmehr besteht die Möglichkeit zu einem Modellierzyklus, bei dem diese Phasen mehrmals durchlaufen werden können, in unterschiedlicher Detaillierung und mit der Möglichkeit, je nach Erkenntnisgewinn und -interesse das Modell entsprechend abzuändern oder zu erweitern

Es versteht sich von selbst, dass die Bildung von Szenarien, also von „Was-wäre-wenn“-Situationen, zu den wichtigsten Hilfsmitteln gehört, um komplexe Systeme in ihrem Verhalten und in ihren Auswirkungen zu verstehen. So ist das auch bei Stoffstromnetzen. Die Veränderung von Prozessannahmen (z.B. Produktionsfunktionen, Throughput-Faktoren), Materialeigenschaften, Preisen usw. nimmt Einfluss auf das Gesamtsystem und zeigt den Handlungsrahmen, den z.B. ein Unternehmen bei der Planung und Verbesserung von Produkt- oder Produktionssystemen hat.

Wenn die Analyse von Stoffströmen dabei gezielt und bewusst auf die bewährten Methoden verschiedener Fachdisziplinen zurückgreift, kann damit eine hohe Transparenz für innerbetriebliche, aber auch produktbezogene Prozessabläufe hergestellt werden. Voraussetzung ist der kluge und inhaltlich konsistente Einsatz der verschiedenen Methoden bei der Modellbildung. Der Vorteil der vorgestellten Stoffstromnetze ist, dass damit sowohl ökologische als auch ökonomische Bewertungsfragen gleichermaßen bearbeitet werden können, auf der instrumentell-methodischen Ebene also eine gemeinsame Basis existiert. Dabei lassen sich neue Analysemöglichkeiten, wie z.B. die der Reststoffkostenrechnung, sehr gut handhaben und mit anderen An-

sätzen erweitern und vergleichen. Insgesamt können damit ökologische und ökonomische Einsparpotentiale in Produktionssystemen auf sehr elegante Weise identifiziert werden. Dies stellt letztendlich eine wichtige Unterstützung betrieblicher Entscheidungen zur Erreichung eines effizienten und ökologischeren Wirtschaftens dar.

Literaturverzeichnis

- Brockhaus (1998): Die Enzyklopädie. 21. Aufl., Bd. 21. Leipzig u. Mannheim.
- DECHEMA (2002): Material- und Energieflussanalyse als Instrument zur ökonomischen und ökologischen Optimierung von Produktionsprozessen in der chemischen Industrie. Tagung am 23./24. Jan. 2002 in Frankfurt/M.
- Dyckhoff, H. (1994): Betriebliche Produktion. Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft. Berlin u. Heidelberg.
- Fischer, H. et al. (1997): Umweltkostenmanagement. München.
- Haehre, S. (2000): Stoffstrommanagement in der Metallindustrie: zur Gestaltung und techno-ökonomischen Bewertung industrieller Recyclingkonzepte. Düsseldorf.
- Heijungs, R. (1994): A generic method for the identification of options for cleaner products. In: Ecological Economics 10, S. 69-81.
- IAO (2002): Stoffstrommanagement – Effizient produzieren nach Umwelt- und Kostenzielen. Tagungsband zum 4. Management-Symposium des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation am 20. Febr. 2002 in Stuttgart.
- LfU (2000): Betriebliches Energie- und Stoffstrom-Management. Ressourcenschonung und Kostensenkung beim Mittelstand. Symposium der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg am 16. Nov. 2000 in Karlsruhe.
- Möller, A. (1993): Datenerfassung für das Öko-Controlling: Der Petri-Netz-Ansatz. In: Arndt, H.-K. (Hrsg.): Umweltinformationssysteme für Unternehmen. Schriftenreihe des IÖW Nr. 69/93. Berlin.
- Möller, A. (1997): Berechnungsverfahren unter Umberto. In: Schmidt, M. u. Häuslein, A. (Hrsg.): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung. Berlin u. Heidelberg S.115-130.
- Möller, A. (2000): Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Bochum.
- Möller, A., Rolf, A. (1995): Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen unter besonderer Berücksichtigung von Petri-Netzen. In: Schmidt, M. u. Schorb, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin u. Heidelberg. S. 33-58.
- Reisig, W. (1986): Petri-Netze. Eine Einführung. Berlin u. Heidelberg.
- Rentz, O. et al. (2000): Stoffstrommanagement für kleinere und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Autoreparaturlackierung. Berlin.
- Rüdiger, C. (2000): Betriebliches Stoffstrommanagement. Wiesbaden.
- Schmidt, M. (1998): Ökobilanzen mit Stoffstromnetzen. In: Schmidt, M. u. Höpfner, U. (Hrsg.): 20 Jahre ifeu-Institut. Wiesbaden. S. 295-306.
- Schmidt, M. (2002): Verknüpfung gekapselter Produktionsmodelle durch Stoffstromnetze und Einbindung von Tools des Operations Research. In: Geldermann, J.

(Hrsg.): Einsatz von OR-Verfahren zur techno-ökonomischen Analyse von Produktionssystemen. Bern (im Druck.)

Schmidt, M. et al. (1994): Experiences with ecobalances and the development of an interactive software tool. In: Hilty, L.M. et al. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz. Bd. II. Marburg. S. 101-108.

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

Umweltbundesamt (1999): Bewertung in Ökobilanzen. Texte 99/92. Berlin.