

---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5829

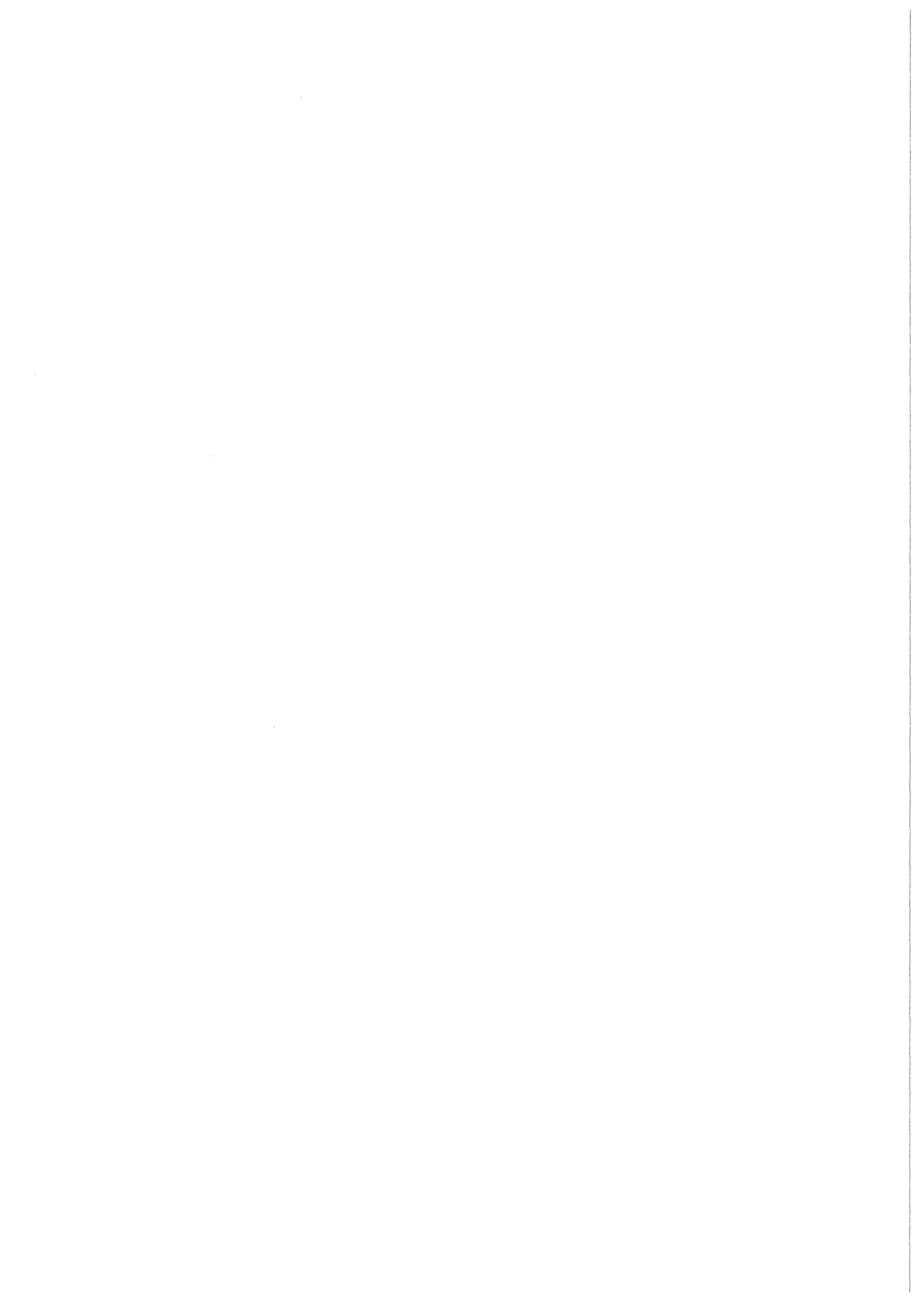
**6. Treffen des AK  
Werkzeuge für Simulation  
und Modellbildung in  
Umweltanwendungen  
13.3. – 15.3.1996, Magdeburg**

**H. B. Keller, R. Grützner, R. Hohmann (Hrsg.)**

**Institut für Angewandte Informatik  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren**

**Oktober 1996**

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
**Technik und Umwelt**

**Wissenschaftliche Berichte**  
**FZKA 5829**

**6. Treffen des AK**  
**Werkzeuge für Simulation und Modellbildung**  
**in Umweltsanwendungen**  
13.3.-15.3.1996, Magdeburg

Hubert B. Keller, Rolf Grützner<sup>1)</sup>, R. Hohmann<sup>2)</sup> (Hrsg.)

Institut für Angewandte Informatik  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

<sup>1)</sup>Universität Rostock  
<sup>2)</sup>Universität Magdeburg

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
1996

**Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**ISSN 0947-8620**

**6 Einsatz unscharfer Petri-Netze zur Bilanzierung,  
Planung und Steuerung von Stoffströmen.**

Siestrup, G.; Tuma, A.; H.-D. Haasis

## **Einsatz unscharfer Petri-Netze zur Bilanzierung, Planung und Steuerung von Stoffströmen**

G. Siestrup, A. Tuma, H.-D. Haasis<sup>1</sup>

### **1 Motivation**

In modernen Systemen der industriellen Produktion ist ein Trend zur Bildung von Netzwerken festzustellen. Zur Herstellung von End- bzw. Zwischenprodukten werden Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Energiearten in verteilten Produktionssystemen bereitgestellt, transformiert, gelagert und transportiert. Bei diesen Prozessen der Leistungsbereitstellung, -erstellung und -verwertung werden Kuppelprodukte in flüssigen, gasförmigen und festen Aggregatzuständen emittiert. Dadurch ergeben sich umweltbelastende Auswirkungen im gesamten vernetzten Stoff- und Energieflußsystem. Demgegenüber steht eine politische und gesetzliche Rahmensetzung, deren Prinzip darin besteht, auf den Grundlagen ordnungsrechtlicher Instrumente (Gesetze, Auflagen mit entsprechenden Ge- und Verboten) einzelfallbezogen Maßnahmen durchzusetzen, die auf eine Vermeidung bzw. Verminderung spezieller Emissionen abzielen.

Das Ziel einer Vermeidung der Umweltbelastung (effiziente Ausnutzung von Ressourcen, Reduzierung der Emissionen) kann durch den Einsatz moderner Regelungssysteme erreicht werden [1]. Dies betrifft sowohl die Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieströmen innerhalb einer Produktionsstufe als auch zwischen verteilten Produktionsstufen. Für ein solches Vorgehen werden auch die Begriffe produktions- und prozeßintegrierter Umweltschutz verwandt. Die Ausschöpfung des Minderungspotentials durch derartige Maßnahmen kann mit deutlich geringeren Kosten verbunden sein als „end of pipe“-Technologien.

Produktions- und prozeßintegrierte Ansätze entsprechen dem Rat der Sachverständigen für Umweltfragen im Sondergutachten „Abfallwirtschaft“ und der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, die darauf hinweisen, daß eine umweltorientierte Marktwirtschaft ein globales Umdenken weg von der Durchlaufwirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft erfordert.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Kfm. G. Siestrup, Dr. A. Tuma, Prof. Dr. H.-D. Haasis, Universität Bremen, FB 7, Fachgebiet Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft, Postfach 33 04 40, D-28334 Bremen.

Ziele hierbei sind u.a. [2]:

- Minimierung der Entnahme von Ressourcen bzw. Einsatzstoffen aus der Umwelt,
- Minimierung des Eintrages von Emissionen als nicht verwertbare Anteile der Reststoffe in die Umwelt,
- Erhöhung der Effektivität der Ressourcen- und Einsatzstoffnutzung,
- Verbesserung der Verwertbarkeit von Reststoffen.

Zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft ist in einem ersten Schritt eine Bilanzierung, das heißt eine strukturelle und mengenmäßige Erfassung und Abbildung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse (dies entspricht der Sachbilanz einer Ökobilanz) des zu untersuchenden Produktionssystems, vorzunehmen. Darauf aufbauend sind in einem zweiten Schritt Steuer- und Regelungsmechanismen als Bestandteile eines Stoffstrommanagementsystems zu entwickeln, die es erlauben, Stoff- und Energieströme sowohl kurz- als auch langfristig so zu planen und zu steuern, daß unter Berücksichtigung von Rahmenparametern vor- und nachgeschalteter Produktionsstufen zur Verfügung stehende Ressourcen möglichst effizient genutzt und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen und Reststoffe, soweit dies technisch möglich ist, vermindert werden.

## **2 Anforderungen an ein Stoffstrombilanzierungs- und -managementsystem für vernetzte Produktionssysteme**

Bei der Konzeption eines Planungs- und Steuerungsinstruments für Stoff- und Energieströme in vernetzten Produktionssystemen sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- adäquate Abbildung der Produktionsstruktur:
  - ◆ Kapazitäten und Produktionsraten der einzelnen verteilten Produktionssysteme,
  - ◆ Abbildung von Lager- bzw. Puffersystemen unter Beachtung ihrer Kapazitätsrestriktionen,
  - ◆ Möglichkeit zur Modellierung von analytischen und synthetischen Produktionsstrukturen,
- adäquate Abbildung aller Stoff- und Energieflüsse (diskrete und kontinuierliche Flüsse),
- Möglichkeit zur Aggregation und Disaggregation spezifischer Komponenten des Produktionssystems,

- problemadäquate Bilanzierungsmöglichkeit relevanter Stoff- und Energieflüsse.

Insbesondere Simulationsmodelle auf der Basis von Petri-Netzen erscheinen geeignet dieses Anforderungsprofil zu erfüllen. Petri-Netze sind vielfältig einsetzbar und eignen sich unter anderem für die Modellierung von Geschäftsvorgängen, betrieblichen Organisationsstrukturen, Computer-Kommunikations- sowie Betriebssystemen [3]. Im produktionswirtschaftlichen Kontext werden Petri-Netze insbesondere zur Materialflußanalyse eingesetzt [4]. Ein neueres Einsatzfeld stellt die Anwendung der Konzeption auf umweltschutzorientierte Problemstellungen dar [5]. Petri-Netze bestehen aus stationären Objekten, den Stellen  $p \in P$  (die über eine Kapazität  $C$  verfügen), und den Transitionen  $t \in T$ , die über gerichtete Kanten miteinander verbunden sind. Transaktionen, z.B. Stoff- und Energieflüsse, werden mit Marken ( $M$ ) abgebildet, die in der Simulation das System durchlaufen. Formal kann ein Stellen/Transitionen-System (im weiteren als P/T-System bezeichnet) in Anlehnung an [3] etwa wie folgt definiert werden:

$N = (P, T, F)$  mit

$$P \cap T = \emptyset \text{ und} \\ F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P) \quad (\text{Flußrelation})$$

ist ein Netz. Durch Einführung der Kapazitäten  $C$  in den Stellen  $P$ , den bewerteten Flußrelationen  $W$  (Kantenbewertungen) sowie einer Anfangsmarkierung  $M_0$  kann die Netzdefinition zu einem Stellen-Transitions-Netz  $Y$  erweitert werden:

$Y = (P, T, F, C, W, M_0)$  mit:

$$\begin{aligned} N &= (P, T, F) && (N \text{ ist ein Netz}), \\ C : P &\rightarrow \mathbb{IN} \cup \{\infty\} && (\text{Kapazitäten der Stellen}), \\ W : F &\rightarrow \mathbb{IN} && (\text{Gewichte der Kanten}), \\ M_0 : P &\rightarrow \mathbb{IN}_0 && (\text{Anfangsmarkierung wobei } \forall p \in P : M_0^p \leq C^p) \end{aligned}$$

Neben der statischen Netzdefinition ist das Schalten (d.h. der Übergang zum Zustand der Folgeperiode) im P/T-System zu präzisieren. Prinzipiell können Petri-Netze nur schalten, wenn die entsprechenden Transitionen aktiviert sind. Eine Transition  $t \in T$  heißt aktiviert, wenn für alle Stellen  $p$ , die Element des Vorbereichs bzw. des Nachbereichs einer betrachteten Transition sind ( $\bullet t$  bzw.  $t \bullet$ ), gilt:

$$\begin{aligned} \forall p \in \bullet t : M^p &\geq W^{p,t}, \\ \forall p \in t \bullet : M^p &\leq C^p - W^{t,p}. \end{aligned}$$

$M'$  heißt Folgemarkierung von  $M$ . Die bei dem Übergang (d.h. dem Schalten) der Transition zu beachtende Schaltregel kann dabei etwa wie folgt formalisiert werden:

$$M^{t,p} = \begin{cases} M^p - W^{p,t}, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus t \bullet, \\ M^p + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \setminus \bullet t, \\ M^p - W^{p,t} + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases}$$

Weitere Anforderungen, die aufgrund der Steuerungs- und Regelungsaufgaben an ein Stoffstrommanagementsystem zu stellen sind, betreffen etwa die

- Implementierung unscharfen und lokalen Expertenwissens für das gesamte Stoff- und Energieflußsystem,
- Modellierbarkeit alternativer Steuerungspolitiken und deren Bewertung,
- Modellierung dezentraler Steuerungs- und Regelungsstrategien,
- Berücksichtigung unscharfer Kosteninformationen.

Dem formulierten Anforderungskatalog entsprechend, wird im folgenden das Konzept eines Stoffstrommanagement- und -bilanzierungssystems auf der Basis eines Fuzzy-Petri-Netzes zur Lösung der beschriebenen Problemstellung herangezogen.

### 3 Modellierung eines exemplarischen Produktionssystems als Petri-Netz

Für eine Beurteilung der Eignung von Ansätzen zur Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieflüssen ist eine Analyse und Validierung an einem realen Produktionssystem notwendig. Hierzu wird ein Beispiel aus der Textilindustrie herangezogen [6,7]. Ein weiteres Beispiel aus der Prozeßindustrie ist in [8] zu finden. Die Gründe für die Auswahl dieses Produktionssystems sind u.a.:

- die vernetzte Struktur des Produktionssystems,
- die Verfügbarkeit von Produktionsdaten,
- und die Emissionsbelastung durch derartige bzw. vergleichbare Produktionssysteme.

Das Produktionssystem besteht aus:

- einer Färberei,
- einem Wasserkraftwerk,
- einem Kesselhaus,
- einer Spinnerei,
- einer Weberei und

- einer Neutralisationsanlage.

Im Mittelpunkt des Produktionsverbundsystems (Abbildung 1) steht eine Färberei. Die Färberei besteht aus zwei Produktionsstufen, dem Färbeprozess und dem Trocknungsvorgang für gefärbte Garne. In der Färberei werden zur Produktion u. a. Dampf und Strom eingesetzt. Diese Ressourcen werden von zwei vorgelagerten Kraftwerken (Kesselhaus und Wasserkraftwerk) zur Verfügung gestellt. Das im Kesselhaus entstehende Rauchgas enthält in erster Linie  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$ . In einer nachgeschalteten Abwasseraufbereitungsanlage werden die im Rauchgas enthaltenen Bestandteile  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$  zur Neutralisation der alkalischen Ab-

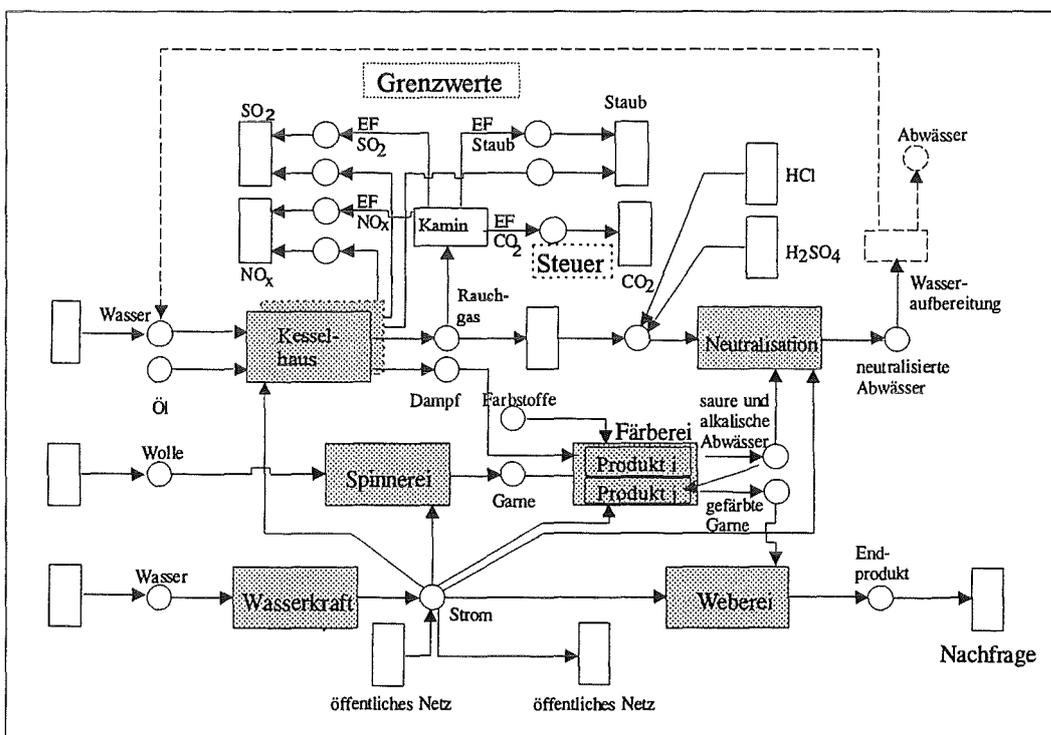


Abbildung 1: Beispiel eines vernetzten Produktionssystems aus der Textilindustrie dargestellt als Petri-Netz

wässer, die aus der Färberei stammen, verwendet. Besteht in der Neutralisation kein Bedarf nach Rauchgas, so wird dieses über den Kamin abgelassen, wobei die entsprechenden Grenzwerte für  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und Staub einzuhalten sind. Die Speichermöglichkeiten von Dampf sowie das Fassungsvermögen des Abwasserbeckens sind begrenzt. Die verfügbaren Kapazitäten der Ver-/Entsorgungseinrichtungen verhalten sich dynamisch und sind u. a. eine Funktion exogener Einflußfaktoren (z. B. der Smoglage oder des Wasserpegels im Zufluß). Die zu färbenden Garne werden von einer der Färberei vorgelagerten Spinnerei geliefert und teilweise in der Weberei weiterverarbeitet. Die Spinnerei

wird wiederum mit Rohstoffen (z.B. Wolle, Viskose) und elektrischer Energie versorgt.

Die einzelnen Komponenten des vernetzten Produktionssystems (Produktionsverbundsystem) sind in Abbildung 1 in einem Petri-Netz dargestellt und können wie folgt interpretiert werden:

- Transitionen (symbolisiert durch Rechtecke) repräsentieren etwa
  - ◆ Produktionssysteme (z.B. Kesselhaus, Wasserkraftwerk, Spinnerei, Färberei, Weberei, Neutralisation),
  - ◆ Quellen von Einsatzströmen (z.B. von Rohstoffen, Wasser und elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz) und
  - ◆ Senken von Emissionsströmen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Staub und  $\text{CO}_2$ ):  
Über die spezifischen Verhältnisse der Emissionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und Staub zum Rauchgasvolumenstrom lassen sich Grenzwerte implementieren. Darüber hinaus kann der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß als Steuerungsgröße verwandt werden. Dies ist etwa im Zusammenhang mit der Diskussion bezüglich der Einführung einer  $\text{CO}_2$ -Steuer interessant.
  - ◆ Senken, die auf Nachfrageaktivitäten zurückzuführen sind (Nachfrage nach Endprodukten sowie elektrische Energie, die vom öffentlichen Netz nachgefragt wird).
- Stellen bzw. Plätze (symbolisiert durch Kreise) stehen für Lager- bzw. Puffersysteme (z.B. für ver-/bearbeitungsbereite Güter, wie etwa Garne; vermarktbar Güter, wie etwa Endprodukte etc.).
- Marken charakterisieren den Zustand des Produktionssystems (z.B. Füllzustand des Abwasserbeckens).
- Kanten (in Abbildung 1 dargestellt durch gerichtete Kanten) verbinden Transitionen und Plätze in einem Petri-Netz und legen so die Flußrichtung fest. Dabei sind zwei Typen zu unterscheiden: gerichtete Input- und Outputkanten.

Petri-Netze können aus produktionstheoretischer Sicht als Netzwerke von Produktionsfunktionen gesehen werden. Eine Transition mit ihren zu- und wegführenden Kanten kann aufgrund konstanter Produktionskoeffizienten als limitationale Produktionsfunktion interpretiert werden. Demgegenüber stehen Input- und Outputfaktoren für eine Stelle nicht zwingend in einem festen Verhältnis, so daß Stellen substitutionale Einsatzverhältnisse nachbilden können.

Auf der Basis dieses Konzeptes ist eine Bilanzierung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse möglich. Durch die Variation der einzelnen Parameter können unterschiedliche Alternativen im Rahmen der Bilanzierung verglichen werden.

Damit können die Konsequenzen, die etwa durch folgende Parametervariationen ausgelöst werden, bewertet werden:

- Variation der Anzahl und Anordnung von Prozessen, Teilprozessen und Aktivitäten;
- Veränderung der Produktionskoeffizienten;
- Variation der Produktionsstruktur (Verkettung von Prozessen und Puffersystemen);
- Veränderung der Anordnung und Größe von Puffersystemen.

Dezidierte Steuerungs- und Regelungspolitiken können jedoch nicht modelliert werden. Soll das beschriebene Produktionsverbundsystem auf dynamische Anpassungsprozesse (z.B. durch Drosselung der Produktion in der Färberei aufgrund ausgelasteter Kapazitäten in der Neutralisation) innerhalb der Ablaufstruktur hin untersucht werden, so bietet sich die Anwendung der Simulation auf der Basis eines fuzzyfizierten Petri-Netzes an.

#### 4 Stoffstrommanagement mittels unscharfer Petri-Netze \*

Zur Integration des unscharfen Steuer- und Regelungswissens, kann das oben dargestellte Petri-Netz um Membershipfunktionen bzw. Zugehörigkeitsfunktionen ergänzt werden. Ein derartig fuzzyfiziertes Petri-Netz kann aus einem Stellen/Transitionen-Netz abgeleitet werden, indem etwa die Kapazitäten der Stellen bzw. die Bewertung der Kanten als unscharfe Mengen modelliert werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen werden hierbei auf der Basis von Erfahrungswissen gebildet [9,10]. Entsprechend kann ein Fuzzy-Petri-Netz als Menge spezieller Stellen/Transitionen- bzw. Petri-Netze interpretiert werden. Aus modellierungstechnischen Gründen werden die Kanten nicht direkt fuzzyfiziert. Im Gegensatz zu Stellen/Transitionen-Netzen wird für die Transitionen eine Stellgröße  $v$  definiert, die etwa als Kapazitätsgröße einer Transition aufgefaßt werden kann. Die Stellgröße  $v$ , die im folgenden als unscharfe Menge  $\tilde{V}^t$  definiert wird, geht als Multiplikator in die Kantenbewertung ein. Klassischen Petri-Netzen entsprechend, wird auch in der hier vorgestellten modifizierten Netzvariante eine diskrete Markenanzahl geschaltet. Demgemäß kann ein Fuzzy-Petri-Netz  $\tilde{Y}$  etwa definiert werden als:

---

\* Im Fachgebiet Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft der Universität Bremen wird derzeit in Kooperation mit der MIT GmbH (Aachen) die Anwendung des Fuzzy-Petri-Netz-Tools PENSUM auf produktionswirtschaftliche Problemstellungen untersucht.

$\tilde{Y} = (P, T, F, \tilde{C}^P, \tilde{V}^t, W, M_0)$  mit:

$(P, T, F)$  ist ein Netz,

$\tilde{C}^P : P \rightarrow [0, 1]$

(Membershipwert der Stelle  $p$ ),

$\tilde{C}^P = \left\{ \left( m, \mu_{\tilde{C}^P}(m) \right) \mid m \in M \right\}$

(Membershipfunktion der Stelle  $p$ ),

$\tilde{V}^t : T \rightarrow [0, 1]$

(Membershipwert der Transition  $t$ ),

$\tilde{V}^t = \left\{ \left( v, \mu_{\tilde{V}^t}(v) \right) \mid v \in V \right\}$

(Membershipfunktion der Transition  $t$ ),

$W : F \rightarrow \mathbb{IN}$

(Gewichte der Kanten),

$M_0 : P \rightarrow \mathbb{IN}_0$

(Anfangsmarkierung).

Im Vergleich zu Stellen/Transitionen-Netzen, bei denen die Aktivierungszustände der Transitionen binäre Werte annehmen können, werden diese bei unscharfen Petri-Netzen mit (kontinuierlichen) Zufriedenheitswerten (Zugehörigkeitswerten) bewertet. Ausgangspunkt dieser Bewertung ist die Markierung  $M'$ , die sich durch einmaliges Schalten aus  $M$  ergibt. Die bei dem Übergang zu beachtende Schaltregel kann dabei formalisiert werden über:

$$M'^p = \begin{cases} M^p - W^{p,t} \cdot v^*, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus t\bullet, \\ M^p + W^{t,p} \cdot v^*, & \text{falls } p \in t\bullet \setminus \bullet t, \\ M^p - W^{p,t} \cdot v_t^* + W^{t,p} \cdot v_t^*, & \text{falls } p \in t\bullet \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases}$$

$v^*$  wird hierbei so bestimmt, daß die Zufriedenheitswerte der Aktivierungszustände der betroffenen Stellen und der Zugehörigkeitswert für die Stellgröße der betrachteten Transition möglichst hoch sind.

Die einzelnen Elemente des Produktionsverbundes werden dabei zunächst wie folgt bewertet:

- *Bewertung des Durchflusses von Transitionen mit Zufriedenheitswerten:* den potentiellen Kapazitätsquerschnitten der einzelnen betrieblichen Einheiten werden Zufriedenheitswerte zugeordnet (Abbildung 2a). Der Durchfluß der Transitionen kann dabei, ähnlich wie bei einem Ventil, variabel gestaltet werden. Analog gilt dies auch für alle Senken und Quellen, die durch Transitionen modelliert werden.
- *Bewertung der Veränderung des Durchflusses von Transitionen:* der Gradient des Kapazitätsquerschnitts wird mit einem Zufriedenheitswert bewertet. Durch die Begrenzung der Dynamik (Abbildung 2b) wird der Tatsache Rechnung getragen, daß reale Prozesse (z.B. in der Färberei) vielfach nicht in der Lage sind, unendlich schnell auf Bedarfsänderungen reagieren zu können.

- *Bewertung des Füllzustandes von Stellen mit Zufriedenheitswerten:* die Kapazitäten der einzelnen Lager- bzw. Puffersysteme werden mit Zufriedenheitswerten bewertet (Abbildung 2c).

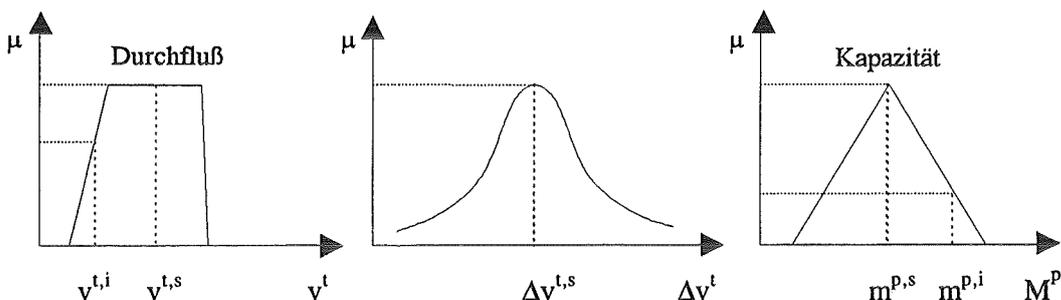


Abb. 2a: Bewertung einer Transition (statische)

Abb. 2b: Dynamikbewertung einer Transition

Abb. 2c: Bewertung einer Stelle (statisch)

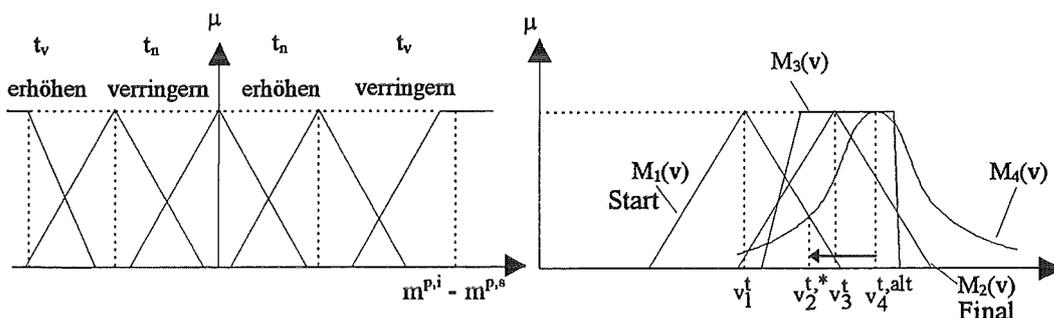


Abb. 2d: Auswahl der Transition und deren Reaktionsweise

Abb. 2e: Ermittlung von  $M_{agg}$  und  $v^*$

Die Stelle mit dem geringsten Zugehörigkeitswert löst im Netz eine Triebkraft aus, die einen Markenfluß bewirken soll. Die angeschlossenen Elemente können auf die angestrebte Veränderung treibend oder hemmend wirken. Im einzelnen besteht der dynamische Anpassungsprozeß aus vier Phasen:

- Zunächst wird diejenige Stelle mit dem niedrigsten Zufriedenheitswert im Netz bestimmt.
- In einem zweiten Schritt wird die Transition ermittelt, die nach der Erfahrung der Experten am ehesten geeignet erscheint, den Zufriedenheitswert der ausgewählten Stelle unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf andere Systemelemente zu erhöhen. Hierzu wird in Abhängigkeit vom momentanen Zufriedenheitswert diejenige Transition ausgewählt, deren Membershipfunktionswert in bezug auf die angestrebte Veränderung des Systemverhaltens am höchsten ist. Hierbei werden die von einer Durchflußerhöhung bzw. -ver-

ringerung vor- bzw. nachgelagerter Transitionen ( $t_v$  und  $t_n$ ) ausgehenden Konsequenzen ermittelt (Abbildung 2d).

- Zur Ermittlung des neuen Stellwertes der Transition (neuer Kapazitätsquerschnitt) werden folgende Membershipfunktionen in Abhängigkeit von der Stellgröße herangezogen bzw. konstruiert:
  - ◆ Funktion  $M_1(v)$ , die die Zufriedenheit bezüglich des veränderten Zustands in der auslösenden Stelle darstellt.
  - ◆ Funktion  $M_2(v)$ , die die Zufriedenheit bezüglich der restlichen Stellen repräsentiert.
  - ◆ Membershipfunktion der Transition  $M_3(v)$  und die Dynamikbewertung  $M_4(v)$ .

Aus diesen Funktionen wird eine aggregierte Funktion gebildet (Abbildung 2e). Der neue Stellwert ergibt sich aus der Maximierung der Funktion  $M_{agg}$ :

$$\max M_{agg} = \max \min\{M_1(v), M_2(v), M_3(v), M_4(v)\}.$$

Die Triebkraft im treibenden Element wird durch die gefundene Kompromißlösung abgebaut. Damit wird ein Kräftegleichgewicht angestrebt.

## 5 Zusammenfassung

Petri-Netze können für die Stoffstrombilanzierung, Fuzzy-Petri-Netze darüber hinaus auch als Werkzeuge für ein operatives Stoffstrommanagement in komplexen Produktionsverbundsystemen, eingesetzt werden. Der Einsatz von Simulationsmodellen auf der Basis von Fuzzy-Petri-Netzen erlaubt es, Stoff- und Energieströme so zu steuern, daß unter Berücksichtigung von Rahmenparametern vor- und nachgeschalteter Produktionseinheiten zur Verfügung stehende Ressourcen effizienter genutzt und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen und Reststoffe vermindert werden. Durch die Berücksichtigung von Erfahrungswissen unterstützt das Fuzzy-Petri-Netz-Konzept damit den operativen Entscheidungsprozeß.

Interessante Einsatzgebiete verspricht neben der Steuerung und Kontrolle komplexer Produktionssysteme auch der Einsatz des Fuzzy-Petri-Netz-Konzepts im Rahmen der strategischen Planung von Produktions- und Redistributionsnetzwerken.

Literatur:

- [1] Haasis, H.-D.: Betriebliche Umweltökonomie, Springer, Berlin u.a. 1996, S.170 ff.
- [2] Wicke, L.; Haasis, H.-D.; Schafhausen, F.; Schulz, W.: Betriebliche Umweltökonomie, Vahlen, München 1992, S.175 ff.
- [3] Baumgarten, B.: Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen, BI-Wiss.-Verl., Mannheim 1990, S.15 und S.79 ff.
- [4] Krauth, K.: Modellierung und Simulation flexibler Montagesysteme mit Petri-Netzen, in: OR-Spektrum Nr.12, 1990, S.239-248.
- [5] Schmidt, M.; Giegrich, J.; Hilty, L. M.: Experiences with ecobalances and the development of an interactive software tool, in: Hilty, L. M. u.a. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz, Metropolis, Marburg 1994, Band 2, S.101-108.
- [6] Tuma, A.: Entwicklung emissionsorientierter Methoden zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen auf der Basis von fuzzyfizierten Expertensystemen, Neuronalen Netzen und Neuro-Fuzzy-Ansätzen, Diss., Lang, Frankfurt a.M., 1994, S.69.
- [7] Tuma, A.; Haasis, H.-D.; Rentz, O.: Maschinelles Lernen und wissensbasierte Ansätze - Konzepte für umweltschutzintegrierte Produktionsleitstände, in: IM Information Management, Nr.2, 1995, S.28-36.
- [8] Minas, H.-J.; Meier, W.: Ein kombiniertes Regelungs- und Simulationssystem für komplexe Produktionsanlagen, Zeitschrift für Chemie-Technik, Oktober 1994.
- [9] Lipp, H.-P.: Ein Konzept eines unscharfen Petri-Netzes als Grundlage für operative Entscheidungsprozesse in komplexen Produktionssystemen, Diss., Chemnitz 1989, S.19 ff.
- [10] Lipp, H.-P.: An application of a Fuzzy Petri Net in complex industrial systems, in: Mathematische Forschung: Fuzzy sets applications, methodological approaches and results, Band 30, Berlin 1986, S.188-196.