

Umweltschutzorientierte Produktionssteuerung auf der Basis von Fuzzy-Petri-Netzen

Axel Tuma, Stephan Franke, Hans-Dietrich Haasis
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,
Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre

Universität Bremen

Wilhelm-Herbst-Str. 5

D-28359 Bremen

Tel.: +49 (0)421 218-7387

Fax: +49 (0)421 218-7422

e-mail: atuma@uni-bremen.de

Abstract: Die zunehmende Vernetzung von Produktionsaktivitäten bei gleichzeitig steigenden Umweltschutzauflagen erfordert die Bereitstellung von Produktionsabstimmungsmechanismen, die sowohl betriebswirtschaftlichen als auch ökologischen Zielen Rechnung tragen. Bezugnehmend auf diese Entwicklungstendenzen und Anforderungen ist es Ziel dieses Beitrags, einen entsprechenden methodischen Ansatz zu entwickeln, der Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Bilanzierung, Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen leistet. Dieser basiert auf der Petri-Netz-Systematik und wird durch eine Fuzzyfizierung der Netzelemente erweitert.

Im ersten Abschnitt werden dazu die Grundlagen von Produktionsnetzwerken unter Berücksichtigung von Umweltaspekten dargestellt. Daran anknüpfend werden die Anforderungen, die an ein Stoffstrombilanzierungs- und -managementsystem gestellt werden, formuliert. Mit Hilfe der Petri-Netz-Systematik wird im darauffolgenden dritten Teil ein exemplarisches Produktionssystem aus der Textilindustrie modelliert. Dabei wird gezeigt, daß Petri-Netze zur Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen eingesetzt werden können. Im anschließenden vierten Teil wird dieses zu einem Stoffstrommanagementsystem auf der Basis eines Fuzzy-Petri-Netz-Ansatzes ausgebaut. Abschließend werden einige Schlußfolgerungen abgeleitet.

Stichworte: Umweltschutzorientierte Produktionssteuerung, Petri-Netz, Fuzzy Sets

1 Umweltorientierte Produktionsnetzwerke

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 auf überstaatlicher, staatlicher und kommunaler Ebene Maßnahmen durchzusetzen, die zunächst auf eine Vermeidung und dann auf eine Verminderung von Umweltbelastungen abzielen.

Zur Erreichung dieses Ziels kann der Einsatz moderner Regelungssysteme beitragen [T94]. Dies betrifft sowohl die Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieströmen innerhalb einer Produktionsstufe als auch zwischen verteilten Produktionsstufen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Umsetzung des Gedankens eines integrierten Umweltschutzes. Integrierter Umweltschutz verfolgt das Ziel, Maßnahmen zur Emissions- und Abfallvermeidung, Abfallverminderung, Reststoffentsorgung und Teileaufarbeitung nicht (im Rahmen einer Teilbetrachtung) isoliert, sondern gemeinsam auch im Hinblick auf medienübergreifende Problemverlagerungen und Auswirkungen auf den eigentlichen Produktionsprozeß sowie auf die mit dem Prozeß verbundenen betrieblichen und außerbetrieblichen Produktionsprozesse zu betrachten.

Integrierte Ansätze entsprechen sowohl den Vorschlägen des Rates der Sachverständigen für Umweltfragen im Sondergutachten „Abfallwirtschaft“ als auch der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Beide weisen darauf hin, daß eine umweltorientierte Marktwirtschaft ein globales Umdenken - weg von der Durchlaufwirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft - erfordert [H96, WHSS92].

Zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft ist in einem ersten Schritt eine Bilanzierung, das heißt eine strukturelle und mengenmäßige Erfassung und Abbildung aller relevanten Stoff- und Energieströme (dies entspricht der Sachbilanz einer Ökobilanz) des zu untersuchenden Produktionssystems, vorzunehmen. Darauf aufbauend ist in einem zweiten Schritt ein Stoffstrommanagementsystem zu entwickeln, das es erlaubt, 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. Zur Umsetzung eines effizienten Stoffstrommanagements ist die Bereitstellung entsprechender Steuer- und Regelungsmechanismen erforderlich.

2 Ansatz für ein Stoffstrombilanzierungs- und -managementsystem für vernetzte Produktionssysteme

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

- Adäquate Abbildung der Produktionsstruktur: Dies betrifft sowohl die Modellierung von produktiven Einheiten (einschließlich Kapazitäten bzw. Produktionsraten) als auch die geeignete Abbildung von Lager- und Puffersystemen (unter Beachtung ihrer Kapazitätsrestriktionen). Von besonderer Bedeutung ist ferner die Modellierbarkeit von analytischen und synthetischen Produktionsbeziehungen.
- Adäquate Abbildung aller Stoff- und Energieströme (diskrete und kontinuierliche Flüsse).
- Möglichkeit zur Aggregation und Disaggregation spezifischer Komponenten des Produktionssystems.
- Problemadäquate Bilanzierungsmöglichkeit relevanter Stoff- und Energieströme.

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 [B90]. Im produktionswirtschaftlichen Kontext werden Petri-Netze insbesondere zur Materialflußanalyse eingesetzt¹ [K90]. Ein neueres Einsatzfeld stellt die Anwendung dieses Ansatzes auf umweltschutzorientierte Problemstellungen dar [SGH94].

Ein Petri-Netz Y besteht aus zwei Typen von Knoten, den Stellen P , die über eine Kapazität C verfügen, und den Transitionen T . Stellen und Transitionen sind über gerichtete Kanten F miteinander verbunden. Die Kanten sind mit Gewichtungsfaktoren W bewertet. Über diese können Input bzw. Outputrelationen ausgedrückt werden. Stoff- und Energieströme werden mit Marken M abgebildet, die in der Simulation das System durchlaufen. Die Anfangsmarkierung M_0 bezeichnet den Ausgangszustand in den einzelnen Lagern bzw. Puffern des Produktionssystems. Formal kann ein Stellen-Transitionen-System (im weiteren als P/T -System bezeichnet) in Anlehnung an [B90] wie folgt definiert werden:

$$\begin{aligned}
 Y &= (P, T, F, C, W, M_0) \text{ mit} & (2-1) \\
 P \cap T &= \emptyset \\
 F &\subseteq (P \times T) \cup (T \times P) & \text{Flußrelation} \\
 C : P &\rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\} & \text{Kapazitäten der Stellen} \\
 W : F &\rightarrow \mathbb{N} & \text{Gewichte der Kanten} \\
 M_0 : P &\rightarrow \mathbb{N}_0 & \text{Anfangsmarkierung, wobei } \forall p \in P : M_0^p \leq C^p
 \end{aligned}$$

Neben der statischen Netzdefinition ist das Schalten (d.h. der Übergang zum Folgezustand) im P/T -System zu präzisieren. Prinzipiell können Petri-Netze nur schalten, wenn die entsprechenden Tran-

¹Aus produktionstheoretischer Sicht können Petri-Netze als vernetzte Produktionsfunktionen angesehen 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.

sitionen aktiviert sind. Eine Transition $t \in T$ heißt aktiviert, wenn für alle Stellen p , die Elemente des Vorbereichs ($\bullet t$) bzw. des Nachbereichs bzw. ($t \bullet$) einer betrachteten Transition sind, gilt:

$$\forall p \in \bullet t : M^p \geq W^{p,t}, \quad (2-2)$$

$$\forall p \in t \bullet : M^p \leq C^p - W^{t,p}. \quad (2-3)$$

Das Schalten bewirkt eine Zustandsänderung des Netzwerks. D.h. das Netz geht von der Markierung M in die Folgemarkierung M' über:

$$M'^p = \begin{cases} M^p - W^{p,t}, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus t \bullet, \\ M^p + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \setminus \bullet t, \\ M^p - W^{p,t} + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2-4)$$

Auf der Basis derartiger Netzwerke können Stoff- und Energieströme simuliert sowie Sachbilanzen erstellt werden. Weitere Anforderungen, die insbesondere aufgrund von Steuerungs- und Regelungsaufgaben an ein Stoff- und Energiestrommanagementsystem zu stellen sind, wie z.B. die

- Darstellbarkeit von lokalen Zielfunktionen,
- Implementierung unscharfen und lokalen Expertenwissens für das gesamte Stoff- und Energieflußsystem sowie die
- Modellierbarkeit alternativer Steuerungspolitiken und deren Bewertung

können jedoch nicht adäquat abgebildet werden. Einen Ansatzpunkt hierzu bilden fuzzyfizierte Petri-Netze.

3 Modellierung eines exemplarischen Produktionssystems als Petri-Netz

Für eine Beurteilung der Eignung von Ansätzen zur Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieströmen ist eine Analyse und Validierung an einem realen Produktionssystem notwendig. Hierzu wird ein Beispiel aus der Textilindustrie herangezogen [T94]. Ein weiteres Beispiel aus der Prozeßindustrie ist in [MM94] zu finden. Die Gründe für die Auswahl dieses Produktionssystems sind u.a.:

- die vernetzte Struktur des Produktionssystems,
- die Verfügbarkeit von Produktionsdaten und
- die vom ausgewählten Produktionssystem verursachte Emissionsbelastung.

Das Produktionssystem besteht aus einer Färberei, einem Wasserkraftwerk, einem Kesselhaus, einer Spinnerei, einer Weberei, einer Neutralisationsanlage und einer Aufbereitungsanlage (vgl. Abb. 1). 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 CO_2 und SO_2 . Diese Bestandteile des Rauchgases werden in einer nachgeschalteten Neutralisationsanlage zur Neutralisierung der hauptsächlich alkalischen Abwässer, die aus der Färberei stammen, verwendet. Besteht in der Neutralisation kein Bedarf an Rauchgas, so wird dieses über den Kamin emittiert. Hierbei sind entsprechende Grenzwerte für NO_x , SO_2 und Staub einzuhalten. Die neutralisierten Abwässer werden nach einer Zwischenspeicherung in einem Sammelbecken in einer Abwasseraufbereitungsanlage weiterbehandelt. Die Speichermöglichkeiten von Dampf sowie das Fassungsvermögen des Abwasserbeckens und des Sammelbeckens 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.

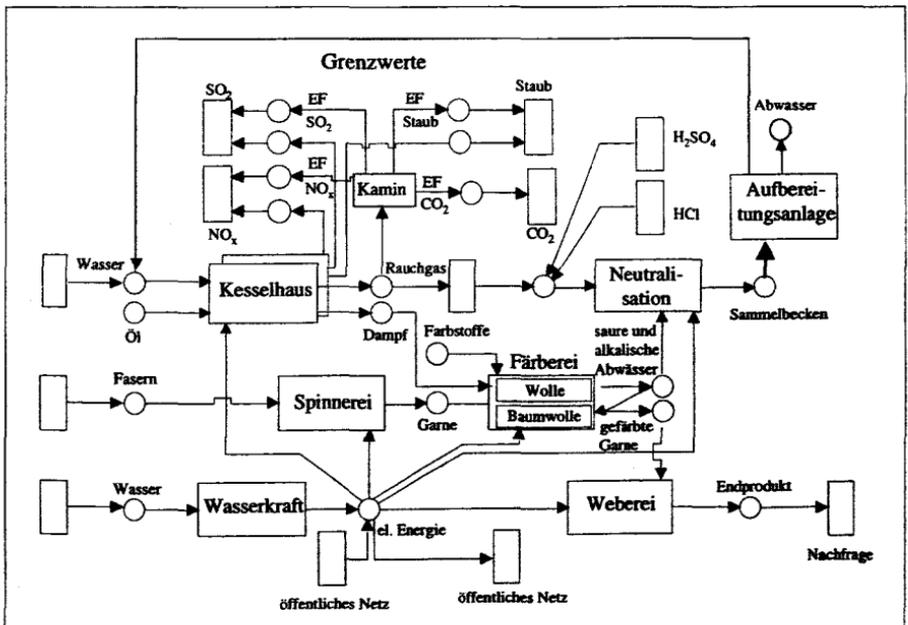


Abbildung 1: Petri-Netz Modell eines exemplarischen Produktionssystems

Die einzelnen Modellkomponenten des vernetzten Produktionssystems können wie folgt interpretiert werden:

Transitionen (symbolisiert durch Rechtecke) repräsentieren

- produktive Einheiten (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 (SO_2 , NO_x , Staub und CO_2): Über die spezifischen Verhältnisse der Emissionen von SO_2 , NO_x und Staub zum Rauchgasvolumenstrom lassen sich Grenzwerte implementieren. Darüber hinaus kann der CO_2 -Ausstoß als Steuerungsgröße verwendet werden. Dies ist im Zusammenhang mit der Diskussion bezüglich der Einführung einer CO_2 -Steuer von besonderem Interesse.
- Senken, die auf Nachfrageaktivitäten zurückzuführen sind (Nachfrage nach Endprodukten sowie nach elektrischer Energie, die ins öffentliche Netz eingespeist wird).

Stellen bzw. Plätze (symbolisiert durch Kreise) stehen für Lager- bzw. Puffersysteme (z.B. für ver-/bearbeitungsbereite Güter wie Garne, vermarktbar Güter etc.).

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.

Marken charakterisieren den Zustand des Produktionssystems (z.B. Füllzustand des Abwasserbekkens).

Auf der Basis dieses Konzepts ist eine Bilanzierung aller relevanten Stoff- und Energieströme möglich [SGH94]. Durch die Variation der einzelnen Parameter können unterschiedliche Alternativen im Rahmen der Bilanzierung verglichen werden. Damit können die Konsequenzen, die u.a. 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, da u.a. keine Zielfunktionen implementiert werden können. Soll das beschriebene Produktionsverbundsystem auf dynamische Anpassungsprozesse (z.B. 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 fuzzyfizzierter Petri-Netze

Zur Integration des Steuer- und Regelungswissens ist das oben dargestellte Petri-Netz-Konzept zunächst um Zielfunktionen zu erweitern. Diese werden in Fuzzy-Petri-Netzen auf der Basis von Membershipfunktionen bzw. Zugehörigkeitsfunktionen modelliert. Ein derartig fuzzyfiziertes Petri-Netz kann aus einem Stellen-Transitionen-Netz abgeleitet werden, indem zunächst das Konzept der Transitionen um variable Schalt- bzw. Produktionsraten erweitert wird. Diese werden ebenso wie die Anzahl der Marken in den Stellen auf Basis unscharfer Mengen bewertet. Auf diese Weise können z.B. verschiedene Füllstände von Puffern bzw. verschiedene Produktionsraten mit entsprechenden Zufriedenheitswerten bewertet werden. Diese Zufriedenheitswerte bzw. die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen werden hierbei auf der Basis von Erfahrungswissen gebildet [L86, L89]. Diesen Erweiterungen folgend, kann ein Fuzzy-Petri-Netz als Menge spezieller Petri-Netze interpretiert werden.

Das Konzept variabler Produktionsraten wird mittels einer Stellgröße v realisiert. Diese geht als Multiplikator in die Kantenbewertung ein. Die Bewertung der Stellgrößen wird im Folgenden auf Basis der unscharfen Menge \tilde{v}^t vorgenommen. Klassischen Petri-Netzen entsprechend, wird auch in der hier vorgestellten modifizierten Netzvariante eine diskrete Markenanzahl geschaltet. Demgemäß kann ein Fuzzy-Petri-Netz Υ definiert werden als:

$$\Upsilon = (P, T, F, \tilde{M}^P, \tilde{v}^t, W, M_0) \text{ mit:} \quad (4-1)$$

$$P \cap T = \emptyset$$

$$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

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

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

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

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

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

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

Flußrelation

Membershipwert der Stelle p

Membershipfunktion der Stelle p

Membershipwert der Transition t

Membershipfunktion der Transition t

Gewichte der Kanten

Anfangsmarkierung

Die Bewertung der unscharf definierten Elemente eines Produktionsnetzwerks kann dabei wie folgt interpretiert werden:

- *Bewertung der Produktionsraten von Transitionen mit Zufriedenheitswerten:* Den potentiellen Produktionsraten der einzelnen betrieblichen Einheiten werden Zufriedenheitswerte zugeordnet (Abb. 2a). Der Durchfluß der Transitionen kann dabei, ähnlich einem Ventil, variabel gestaltet werden. Analog gilt dies auch für alle Senken und Quellen, die durch Transitionen modelliert werden.

- **Bewertung des Füllzustands von Stellen mit Zufriedenheitswerten:** Die realisierten Füllzustände der einzelnen Lager- bzw. Puffersysteme werden mit Zufriedenheitswerten versehen (Abb. 2c).

Darüber hinaus kann auch eine Bewertung der Gradienten der Produktionsraten der Transitionen eingeführt werden:

- **Bewertung der Veränderung der Produktionsraten von Transitionen:** Der Gradient der Produktionsraten wird mit einem Zufriedenheitswert versehen. Durch die Begrenzung der Dynamik (Abb. 2b) wird der Tatsache Rechnung getragen, daß reale Prozesse (z.B. in der Färberei) vielfach nicht in der Lage sind, unendlich schnell auf Bedarfsänderungen zu reagieren.

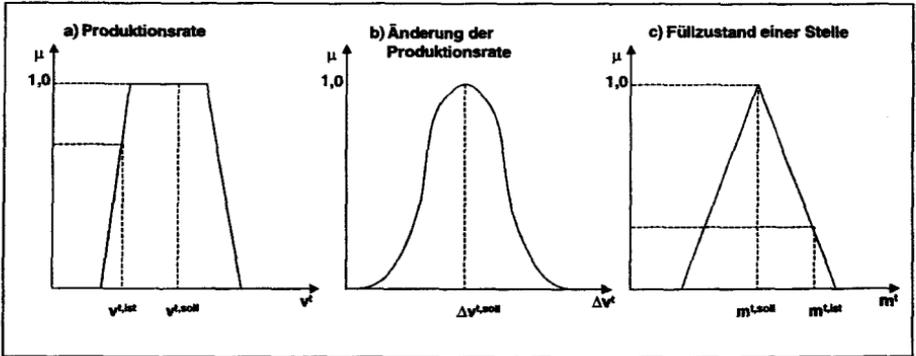


Abbildung 2: Bewertung einer Produktionsrate (a), einer Produktionsänderung (b) und eines Füllzustandes einer Stelle (c)

Die Schaltregel im Fuzzy-Petri-Netz umfaßt folgende Schritte:

- Zunächst wird das Netzwerkelement (Stelle oder Transition) mit dem geringsten Zufriedenheitswert ermittelt. Dieses löst im Netz eine Triebkraft aus, die einen Markenfluß induziert. Die angeschlossenen Elemente können auf die angestrebte Veränderung treibend oder hemmend wirken. Für die weitere Vorgehensweise ist es von Bedeutung, ob es sich bei dem ermittelten Element um eine Stelle oder um eine Transition handelt. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß eine Stelle als passives Element ihren Zufriedenheitswert nur durch Veränderung der Produktionsrate einer vor- oder nachgelagerten Transition ändern kann.
- Handelt es sich bei dem im vorigen Schritt ausgewählten Element um eine Stelle, so kann die Transitionsauswahl entsprechend der folgenden Auswahlregel² vorgenommen werden: Dabei werden für die linguistische Variable „Transitionsauswahl“ für alle vor- und nachgelagerten Transitionen Terme entsprechend der potentiellen Handlungsalternativen (vorgelagerte Transition erhöhen, nachgelagerte Transition erniedrigen, nachgelagerte Transition erhöhen, vorgela-

² Ziel hierbei ist es, diejenige Transition auszuwählen, bei der eine Veränderung der Produktionsrate in Bezug auf eine Erhöhung des Zufriedenheitswertes der betrachteten Stelle am erfolgversprechendsten ist.

gerte Transition erniedrigen) definiert. Zusätzlich wird ein Term für die Option „nicht reagieren“ eingeführt. Die zuletzt genannte Option soll, falls die Differenz zwischen Soll- und Istwert in der betrachteten Stelle unterhalb eines definierten Schwellwertes liegt, das System in einem stabilen Zustand halten. Alle Terme bzw. deren Membershipfunktionen werden in Abhängigkeit der Differenz zwischen Soll- und Ist-Zustand in der betrachteten Stelle gebildet (vgl. Abb. 3a). Der Term mit dem höchsten Zufriedenheitswert wird als Handlungsalternative ausgewählt.

- Handelt es sich bei dem Element mit dem niedrigsten Zufriedenheitswert um eine Transition, entfällt der zuletzt beschriebene Schritt „Transitionenauswahl“.
- Zur Ermittlung des neuen Stellwertes der ausgewählten Transition werden in Abhängigkeit aller potentiellen Stellwerte folgende Zugehörigkeitsfunktionen gebildet und anschließend aggregiert:
 - Funktionen $M_1(v)$, die die Zufriedenheit in den vorgelagerten Stellen als Folge der Zustandsveränderung in der ausgewählten Transition, darstellen.
 - Funktionen $M_2(v)$, die die Zufriedenheit in den nachgelagerten Stellen als Folge der Zustandsveränderung in der ausgewählten Transition, darstellen.
 - Membershipfunktion der betrachteten Transition $M_3(v)$ und gegebenenfalls deren Dynamikbewertung $M_4(v)$.

Aus diesen Funktionen wird eine aggregierte Funktion (Minimumfunktion) gebildet (vgl. Abb. 3b). Der neue Stellwert v^* ergibt sich am Maximum dieser Minimumfunktion. Eine detaillierte Beschreibung des Lösungsansatzes findet sich etwa in [STH96, STH97, TM99].

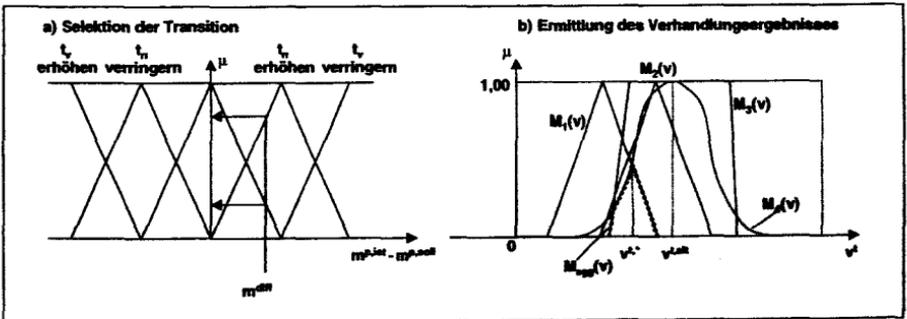


Abbildung 3: Auswahl der Transition und deren Reaktionsweise (a), Ermittlung von M_{agg} und v^* (b)

Verwendet man diese Schaltregel, so ergibt sich die neue Markierung nach unten stehender Vorschrift:

$$M^{p'} = \begin{cases} M^p - W^{p,t} \cdot v^*, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus \circ, \\ M^p + W^{t,p} \cdot v^*, & \text{falls } p \in t \circ \setminus \bullet, \\ M^p - W^{p,t} \cdot v_t^* + W^{t,p} \cdot v_t^*, & \text{falls } p \in t \circ \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4-2)$$

5 Evaluierung des Modellierungsansatzes

Die Evaluierung dieses Modellierungsansatzes anhand des skizzierten Produktionssystems hat gezeigt, daß die skizzierten Produktionssteuerungsaufgaben prinzipiell auf Basis eines Petri-Netz-Ansatzes mit unscharfen Bewertungskalkülen der lokalen Zielfunktionen angegangen werden können. Das Fuzzy-Petri-Netz kann hierbei als kybernetisches System aufgefaßt werden. Eines der entscheidenden Probleme ist hierbei die Lösung des Konflikts zwischen Stabilität und Konvergenzgeschwindigkeit. Vorbehaltlich einer detaillierteren Diskussion dieser Thematik [F92] lassen sich folgende Empfehlungen zur Konstruktion stabiler Fuzzy-Petri-Netze formulieren:

- *Inkrementeller Modellierungsansatz:* Es empfiehlt sich bei der Modellierung mit kleineren, relativ autonomen Teilsystemen zu beginnen. In einem iterativen Prozeß müssen die Membershipfunktionen der einzelnen Knoten im Hinblick auf stabiles Systemverhalten justiert werden. Erst dann sollten die Teilsysteme verbunden werden.
- *Implementierung einfacher Lösungsstrategien:* Während der Konstruktionsphase sollten parallele Verhandlungsprozesse vermieden werden, um so die Transparenz des Systemverhaltens zu erhöhen. Um das Systemverhalten zu analysieren ist es nützlich, den Problemlösungsprozeß von einem definierten Punkt (Stelle bzw. Transition mit dem niedrigsten Zufriedenheitsniveau) beginnen zu lassen und von diesem den Verhandlungsprozeß durch das Netzwerk zu propagieren.
- *Beschränkung der Systemdynamik:* Im Hinblick auf die Erzielung eines stabilen Systemverhaltens ist eine Beschränkung der Systemdynamik empfehlenswert. Hierzu stehen verschiedene Modellierungsansätze zur Verfügung. Einerseits kann der Gradient der Produktionsraten begrenzt werden. In diesem Zusammenhang können Membershipfunktionen (Zufriedenheitswerte) zur Bewertung potentieller Veränderungen der Produktionsraten eingeführt werden. Andererseits empfiehlt sich die Definition von Indifferenzbereichen. Dies kann umgesetzt werden durch die Einführung von α -Niveaus bzw. die Definition von Schwellwerten für die Initiierung von Verhandlungsprozessen.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte wurde ein vergleichsweise stabiles Modell für einen Ausschnitt des beschriebenen Produktionssystems erstellt. Dieses besteht aus den Transitionen Kesselhaus, Neutralisationsanlage, Kamin sowie der Stelle, die die Verteilung des Rauchgases realisiert (vgl. Abb. 4).

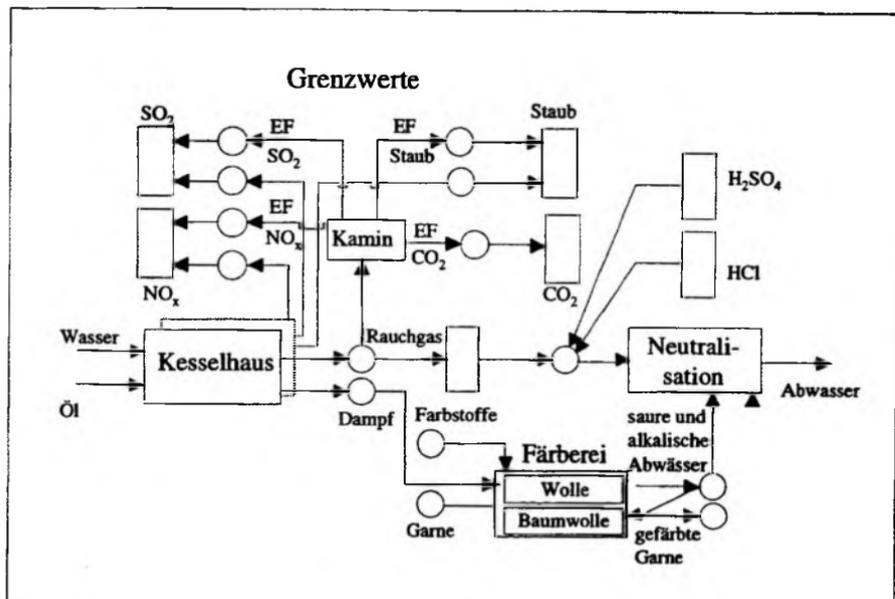


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem betrachteten Produktionssystem

Das in Abbildung 4 dargestellte Szenario zeigt den Einfluß der Einführung eines Emissionsgrenzwertes bezüglich der Schadstoffe CO_2 und SO_2 auf das System. In der Ausgangssituation können diese prinzipiell nicht lagerbaren (modelliert durch eine entsprechende Membershipfunktion der Stelle) Schadstoffe ungehindert durch den Kamin entweichen. Nach Einführung der Grenzwerte ergeben sich für die nicht mehr emittierbare Schadstoffmenge zwei Optionen. Eine Möglichkeit besteht darin, den Rauchgasstrom zu begrenzen. Dies impliziert jedoch eine Reduktion der Produktionsrate des Kesselhauses und führt damit im allgemeinen zu einer Reduktion der Produktionsrate der Färberei, da diese das Produkt des Kesselhauses (Heißwasser/Dampf) als Input für die eigene Produktion benötigt. Eine zweite Option ist eine Erhöhung der Produktionsrate der Neutralisationsanlage, um die überschüssige Rauchgasmenge dort zu binden. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis des Verhandlungsprozesses. Die Einführung verschärfter Umweltstandards führt zu einer Erhöhung der Produktionsrate der Neutralisationsanlage (ca. 12%). Die Produktionsrate der Färberei bleibt unverändert, allerdings muß das eingelastete Produktspektrum entsprechend angepaßt werden. Im untersuchten Fall bedeutet das eine vermehrte Verarbeitung von Baumwollgarnen, die mit einem höheren Anfall alkalischer Abwässer verbunden ist. Zusammenfassend heißt das, daß die umweltschutzorientierten und betriebswirtschaftlichen Ziele im betrachteten Anwendungsfall harmonisiert werden können. Abbildung 5 zeigt, daß für das modellierte Teilsystem ein stabiles Systemverhalten erreichbar ist. Für das gesamte Produktionssystem konnten solche Ergebnisse allerdings bis jetzt noch nicht erzielt werden. Ein Grund hierfür ist die hohe Anzahl von Freiheitsgraden (Membershipfunk-

tionen). Um komplexere Probleme handhaben zu können, ist weiterer Forschungsbedarf notwendig. Ein erfolgversprechender Ansatz liegt in der Integration von Meta-Wissen (bezüglich der Sinnhaftigkeit der Initiierung von Verhandlungsprozessen in speziellen Produktionssituationen) in einzelne Knoten sowie einer Lernfähigkeit zur Adaption der Membershipfunktionen auf Basis von Erfahrungswissen.

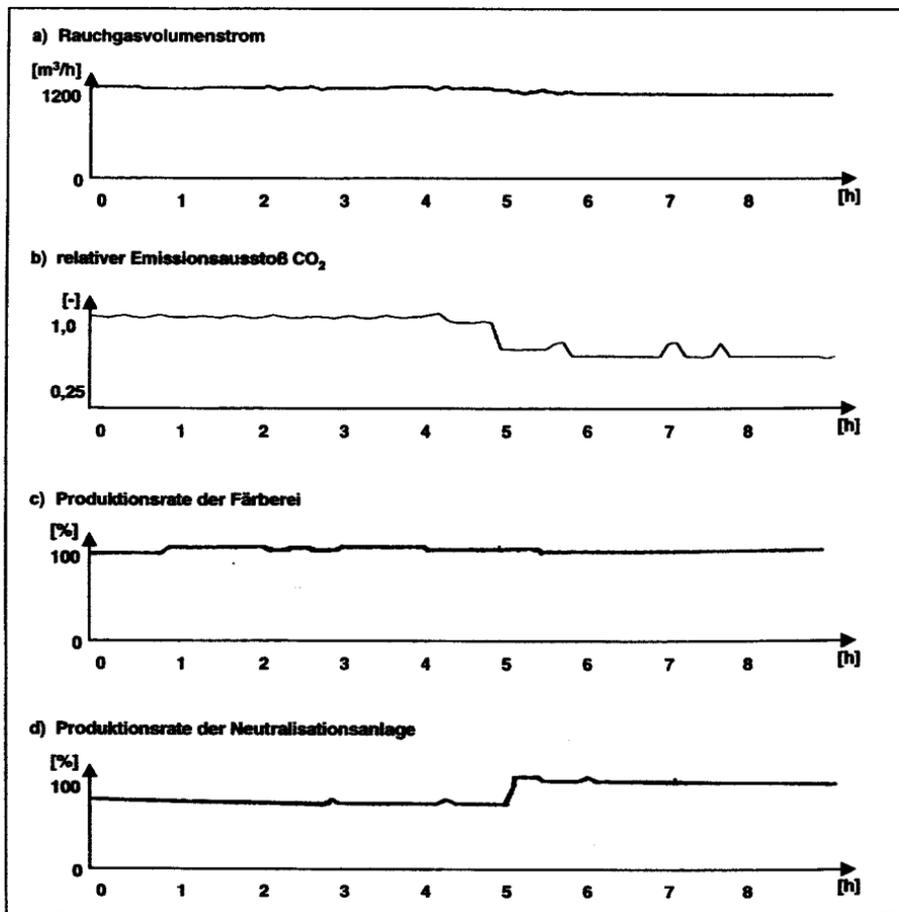


Abbildung 5: Ergebnisse für den betrachteten Systemausschnitt

Literatur

- [B90] Baumgarten, B.: Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen. BI-Wiss.-Verl.: Mannheim, S.15 u. S.79 ff, 1990.
- [F92] Föllinger, O.: Regelungstechnik, Heidelberg, Hüthig Buch Verlag, 1992.
- [H96] Haasis, H.-D.: Betriebliche Umweltökonomie. Springer: Berlin u.a., S.170 ff., 1996.
- [K90] Krauth, K.: Modellierung und Simulation flexibler Montagesysteme mit Petri-Netzen. In: OR-Spektrum, Nr.12 (1990), S.239-248.
- [L86] 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 (1986), S.188-196.
- [L89] Lipp, H.-P.: Ein Konzept eines unscharfen Petri-Netzes als Grundlage für operative Entscheidungsprozesse in komplexen Produktionssystemen. Chemnitz, Diss. S.19 ff., 1989.
- [MM94] Minas, H.-J.; Meier, W.: Ein kombiniertes Regelungs- und Simulationssystem für komplexe Produktionsanlagen. In: Zeitschrift für Chemie-Technik, Oktober 1994.
- [SGH94] 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, Band 2. S.101-108, 1994.
- [STH96] Siestrup, G.; Tuma, A.; Haasis, H.-D.: Stoffstrombilanzierung und -management durch Anwendung der Fuzzy-Petri-Netz-Simulation. In: Scheer, A.-W. u.a. (Hrsg.): Computergestützte Stoffstrommanagement-Systeme. Metropolis: Marburg, S.39-48, 1996.
- [STH97] Siestrup, G.; Tuma, A.; Haasis, H.-D.: Application of Fuzzy Petri Net Simulation for Integrated Environmental Control of Production Networks, in: Denzer, R.; Swayne, D. A.; Schimak, G. (eds.): Environmental Software Systems, Volume 2, London, Chapman & Hall, p. 226-233, 1997.
- [T94] Tuma, A.: Entwicklung emissionsorientierter Methoden zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen auf der Basis von fuzzyfizierten Expertensystemen, Neuronalen Netzen und Neuro-Fuzzy-Ansätzen. Lang: Frankfurt a.M., S.69, 1994.
- [TM99] Tuma, A.; Müller, H. J.: Using Fuzzy-Directed Agents for Ecological Production Control, in: Intelligent Automation and Soft Computing, special issue on Distributed Intelligent Systems, to appear in 1999.
- [WHSS92] Wicke, L.; Haasis, H.-D.; Schafhausen, F.; Schulz, W.: Betriebliche Umweltökonomie. Vahlen: München, S.175 ff., 1992.