

September 2001

# Stoffstrommanagement auf der Basis eines fuzzyfizierten Multi-Agenten-Ansatzes

Axel Tuma

*Universität Augsburg*, axel.tuma@wiso.uni-augsburg.de

Stephan Franke

*Universität Augsburg*, stephan.franke@wiso.uni-augsburg.de

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi2001>

---

## Recommended Citation

Tuma, Axel and Franke, Stephan, "Stoffstrommanagement auf der Basis eines fuzzyfizierten Multi-Agenten-Ansatzes" (2001).

*Wirtschaftsinformatik Proceedings 2001*. 59.

<http://aisel.aisnet.org/wi2001/59>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISeL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 2001 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISeL). For more information, please contact [elibrary@aisnet.org](mailto:elibrary@aisnet.org).

In: Buhl, Hans Ulrich, u.a. (Hg.) 2001. *Information Age Economy*; 5. Internationale Tagung  
Wirtschaftsinformatik 2001. Heidelberg: Physica-Verlag

ISBN: 3-7908-1427-X

© Physica-Verlag Heidelberg 2001

# Stoffstrommanagement auf der Basis eines fuzzyfizierten Multi-Agenten-Ansatzes

**Axel Tuma, Stephan Franke**

Universität Augsburg

*Zusammenfassung: Die zunehmende Vernetzung von Produktionsaktivitäten bei gleichzeitig steigenden Umweltschutzaufgaben erfordert die zielgerichtete Lenkung von Stoff- und Energieströmen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere auch Produktionsabstimmungsmechanismen bereitzustellen, 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 Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen leistet. Vor diesem Hintergrund wird ein umweltschutzorientierter Produktionssteuerungsansatz auf Basis eines Multi-Agenten-Systems mit unscharfen Bewertungskalkülen der lokalen Zielfunktionen vorgestellt.*

*Schlüsselworte: Stoffstrommanagement, umweltschutzorientierte Produktionslenkung, Multi-Agenten-Ansatz, Fuzzy-Sets*

## 1 Umweltschutzorientierte 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 Rahmensezung, deren Prinzip darin besteht, auf den Grundlagen ordnungsrechtlicher Instrumente auf zwischenstaatlicher, 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 [Tu94]. 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 Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. Beide weisen darauf hin, daß eine umweltschutzorientierte Marktwirtschaft ein globales Umdenken - weg von der Durchlaufwirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft - erfordert [Ha96].

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.

Einen vielversprechenden Ansatz in diesem Zusammenhang stellt das Konzept des verteilten Problemlösens dar ([Ki96], [Ze98]). Dieses Konzept wurde zunächst als ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz entwickelt ([Ko91], [MeHi89], [Mü94]). Bereits im Anfangsstadium spielten jedoch Anwendungen auf dem Gebiet der Koordinierung von Produktionsprozessen eine zentrale Rolle [CoGö98a].

Unter verteiltem Problemlösen versteht man das Zusammenwirken von teilautonomen Agenten, die bei der Erfüllung einer Aufgabe kooperieren [KiSc92]. Als Agenten werden hierbei autonome informationsverarbeitende Einheiten mit eigenständigen Zielsystemen bezeichnet (“deliberative school”). Eine besonders erfolgversprechende Variante von Multi-Agenten-Systemen im Rahmen einer dezentralen Produktionssteuerung stellen sogenannte Kontraktnetzwerke dar ([CoGö98b], [Sm80]). Wesentliches Merkmal von Kontraktnetzwerken ist die Strukturierung des verteilten Problemlösens in Form von Verhandlungsprozessen. Diese können direkt (ohne Koordinator) oder indirekt (mit Koordinator) implementiert werden. Der Koordinator erfüllt in diesem Zusammenhang gleichsam die Rolle eines Maklers, der versucht, potentielle Angebote (z.B. Ausschreibungen von Teilpro-

jekten) und Nachfragen (z.B. potentielle Kooperationspartner) einander zuzuordnen [Ze97].

## 2 Konzeption eines Stoffstrommanagementsystems auf Basis eines Multi-Agenten-Ansatzes

Eine detailliertere Analyse des Multi-Agenten-Ansatzes zum Stoffstrommanagement muß zunächst auf den Agenten selbst eingehen. In diesem Zusammenhang lassen sich zwei prinzipielle Gestaltungsansätze unterscheiden. Einer dieser Ansätze verfolgt das Ziel, Agenten zu entwickeln, die ein effizientes Echtzeitverhalten aufweisen ("reactive school"). Im Zentrum des zweiten Ansatzes steht die explizite Wissensrepräsentation sowie die Ableitung neuen Wissens ("representational or deliberative school"). Unabhängig davon, welcher dieser Ansätze bei der Modellierung eines Multi-Agenten-Systems verfolgt wird, muß der Agent auf Basis eines entsprechenden Weltmodells in der Lage sein zu kommunizieren und zu agieren. Um dieses zu gewährleisten, werden bei der Modellierung drei Ebenen betrachtet:

- Die erste Ebene umfaßt die Modellierung der individuellen Wissensbasis, der Kommunikationsstrukturen sowie der sensorischen und aktorischen Aktivitäten.
- Die zweite Ebene umfaßt die Modellierung dispositiver Fähigkeiten, eines lokalen Konfliktmanagements sowie einfacher Lernstrategien.
- Die dritte Ebene umfaßt die Modellierung der Fähigkeit zur kooperativen Problemlösung, ein globales Konfliktmanagement sowie weiterführende Lernstrategien.

Beim Übergang auf ein Agenten-System müssen die Interaktionsmechanismen festgelegt werden [vBe93]. Dies hat Einfluß auf die genannten Schritte zur Modellierung der einzelnen Agenten.

Die Modellierung eines Multi-Agenten-Systems erfolgt domänenspezifisch. Dies bedeutet, daß in einem ersten Schritt problemabhängig Entitäten identifiziert werden, für die entsprechende Agententypen zu modellieren sind. Bezogen auf Aufgabenstellungen im Bereich des Stoffstrommanagements sind dies etwa Arbeitssysteme (produktive Einheiten), Lager bzw. Puffer und Aufträge, wobei eine konkrete Ausgestaltung von Programmtyp und Organisationstyp der Produktion abhängen. Exemplarisch werden im folgenden entsprechende Agententypen für ein Produktionssystem des Programmtyps „Massenfertigung“ und des Organisationstyps „Fließfertigung“ in der CommonKADS-Terminologie [Mü97] beschrieben. In diesem Zusammenhang ist eine Modellierung von Produktions- und Lageragenten zu untersuchen [TuMü00].

**P-Agenten** (Produktionseinheiten)

- haben die Aufgabe, ihre Produktionsrate zu optimieren<sup>1</sup>,
- führen die Aktionen „produzieren“ und „konsumieren“ aus,
- kommunizieren mit ihren direkten Nachbarn durch a) Senden einer Nachfrage bezüglich benötigter Produktionsfaktoren, b) Empfangen einer Nachfrage nach Produkten bzw. Zwischenprodukten und c) Verhandeln über die zu produzierende Menge (und möglicher Zeitrestriktionen),
- haben Wissen über a) ihre Produktionsrate, b) ihren aktuellen Zufriedenheitswert und c) die zugrundeliegenden Produktionsbeziehungen (Produktionsfunktion),
- planen, um ihren lokalen Systemzustand zu prognostizieren und eine entsprechende Kommunikation aufzunehmen.

**L-Agenten** (Lager bzw. Puffer)

- haben die Aufgabe, ihre Bestände zu optimieren,
- führen die Aktionen „zubuchen“ bzw. „abbuchen“ von Lagerzu- bzw. -abgängen aus,
- kommunizieren mit ihren direkten Nachbarn durch a) Senden einer Nachfrage bzw. eines Angebots des jeweiligen Lagerguts, b) Empfangen einer Nachfrage nach Produkten bzw. Zwischenprodukten und c) Verhandeln über potentielle Veränderungen des Lagerbestands (und möglicher Zeitrestriktionen),
- haben Wissen über a) ihren aktuellen Lagerbestand und b) ihren Zufriedenheitswert,
- planen, um ihren lokalen Systemzustand zu prognostizieren und eine entsprechende Kommunikation aufzunehmen.

Prinzipiell handelt jeder Agent in Abhängigkeit seiner Zufriedenheit. Diese reflektiert den Zielerfüllungsgrad bezüglich der definierten Aufgaben. Unterhalb einer festgelegten Schranke bezüglich seiner Zufriedenheit initiiert ein Agent einen Verhandlungsprozeß mit dem Ziel, durch Variation des Stoff- bzw. Energieflusses seine Zufriedenheit zu erhöhen. Die Kompromißfähigkeit der einzelnen Agenten erlaubt ihnen, Anfragen partiell zu akzeptieren. Im weiteren werden die Einzelheiten des Verhandlungsprozesses detailliert dargestellt. Eine ausführliche Darstellung potentieller Verhandlungsprinzipien findet sich etwa in [Mü97].

---

<sup>1</sup> Optimalitätskriterien werden auf der Basis von Zufriedenheitswerten definiert und im folgenden diskutiert.

Zur Operationalisierung der Zufriedenheitswerte im angesprochenen Agentenkonzept empfiehlt sich eine Modellierung auf der Basis von Fuzzy-Sets. Dabei werden die Zufriedenheitswerte der Agenten bezüglich ihrer Produktionsrate (P-Agent [vgl. Abbildung 1a]) bzw. bezüglich ihres Lagerbestands (L-Agent [vgl. Abbildung 1c]) durch Verwendung sogenannter „Membershipfunktionen“ ermittelt [Zi91]. Darüber hinaus kann auch eine Bewertung der Änderung der Produktionsraten der P-Agenten eingeführt werden. Eine solche Bewertung führt zu einer Begrenzung potentieller Lastveränderungen und trägt damit der Tatsache Rechnung, daß reale Prozesse vielfach nicht in der Lage sind, unendlich schnell auf Bedarfsänderungen zu reagieren (vgl. Abbildung 1b).

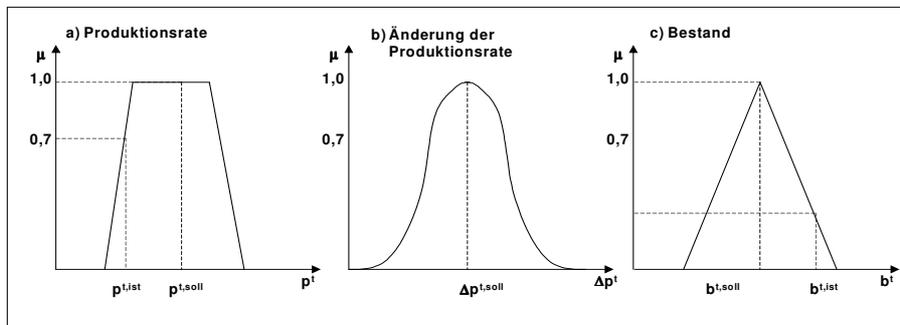


Abbildung 1: Bewertung einer Produktionsrate (a), einer Produktionsänderung (b) und eines Bestandes (c)

Auf Basis eines derartigen Zufriedenheitskonzeptes wird eine Verhandlungsstruktur (Verhandlungsprotokoll) definiert. Ziel des dargestellten Verhandlungsmusters ist die Realisierung eines bestmöglichen Kompromisses zwischen allen dezentralen (lokalen) Zielfunktionen. Dies umfaßt insbesondere auch die Ermittlung von exakten Produktionsraten sowie definierter Lagerbestände der einzelnen Agenten. Prinzipiell kann das Verhandlungsprotokoll wie folgt skizziert werden:

- Um den Zufriedenheitsgrad eines L-Agenten zu erhöhen, muß mindestens ein P-Agent seine Produktionsrate entsprechend ändern. Unterschreitet der Zufriedenheitswert eines L-Agenten ein auf lokaler Ebene definiertes Maß ( $\alpha$ -Niveau), wählt er unter allen durch die Produktionsstruktur verbundenen P-Agenten einen Verhandlungspartner aus. Zwischen diesen wird auf der Basis der Bewertung potentieller Produktionsraten bzw. der sich daraus ergebenden Bestände diejenige Produktionsrate als Verhandlungsergebnis ermittelt, für die die aggregierte Zufriedenheitsfunktion (vgl. Abbildungen 4b, 5b) ihr Maximum erreicht.

- Prinzipiell verläuft die Prozedur zur Erhöhung der Zufriedenheit eines P-Agenten analog. Unterschiede ergeben sich darin, daß der P-Agent ein Verhandlungsergebnis mit allen mit ihm verbundenen L-Agenten aushandeln muß.

Das skizzierte Agentenkonzept eignet sich insbesondere auch zur Abbildung einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung. Zur Operationalisierung umweltschutzorientierter Zielvorstellungen können entsprechend den skizzierten Agententypen prinzipiell zwei Ansätze unterschieden werden:

- *Modellierung umweltschutzorientierter P-Agenten:* P-Agenten können einerseits zur Modellierung von Anlagen zur umweltschutzorientierten Stoffbehandlung (z.B. Neutralisationsanlage, Kläranlage) eingesetzt werden, andererseits können sie zur Abbildung vorgegebener Emissionsraten verwendet werden. Dies ermöglicht etwa die Modellierung von Grenzwerten, wie sie in der TA-Luft vorgegeben sind.
- *Modellierung umweltschutzorientierter L-Agenten:* L-Agenten können mit dem Ziel einer Begrenzung des Emissionsanfalls, des Ressourcenverbrauchs sowie einer möglichst hohen Integration von Sekundärrohstoffen konstruiert werden.

Zur Verdeutlichung des beschriebenen Agenten-Ansatzes wird ein exemplarisches Produktionssystem aus dem Bereich der Textilindustrie, bestehend aus den Komponenten Färberei, Abwasserspeicherbecken, Neutralisationsanlage, Sammelbecken und Aufbereitungsanlage betrachtet. Bei dem Färbeprozess entstehen hauptsächlich alkalische Abwässer, die in einem Speicherbecken zwischengepuffert werden, um in einer nachgeschalteten Neutralisationsanlage weiter behandelt werden zu können. Die neutralisierten Abwässer werden nach einer erneuten Zwischenspeicherung in einer Kläranlage aufbereitet. Das in Abbildung 2 dargestellte Beispiel geht von einem Durchfluß von  $200 \text{ m}^3/\text{d}$  aus. Die Speicherbecken haben eine maximale Kapazität von  $600 \text{ m}^3$ .

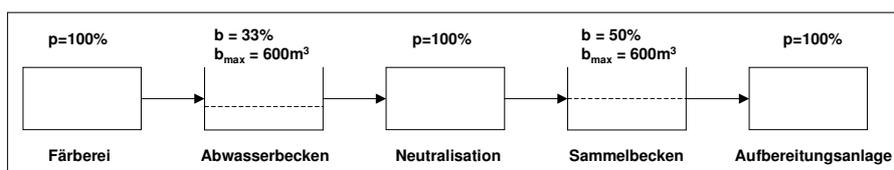


Abbildung 2: Ausschnitt aus dem betrachteten Produktionssystem

Vereinfachend wird angenommen, daß die produktiven Einheiten (Färberei, Neutralisationsanlage und Aufbereitungsanlage) zunächst zu 100% ausgelastet seien. Dies entspricht ihrer maximalen Produktionsrate und wird mit dem höchsten möglichen Zufriedenheitswert bewertet (vgl. Abbildung 3a, 3c, 3e). Das gleiche gilt für das Sammelbecken (vgl. Abbildung 3d), welches zunächst entsprechend dem Sollwert zu 50% gefüllt sei (maximale Kapazität  $600 \text{ m}^3$ ). Das Abwasserbecken

sei dagegen nur zu 33% gefüllt (maximale Kapazität 600 m<sup>3</sup>). Dies entspricht einem Zufriedenheitswert von  $\mu = 0,66$  (vgl. Abbildung 3b).

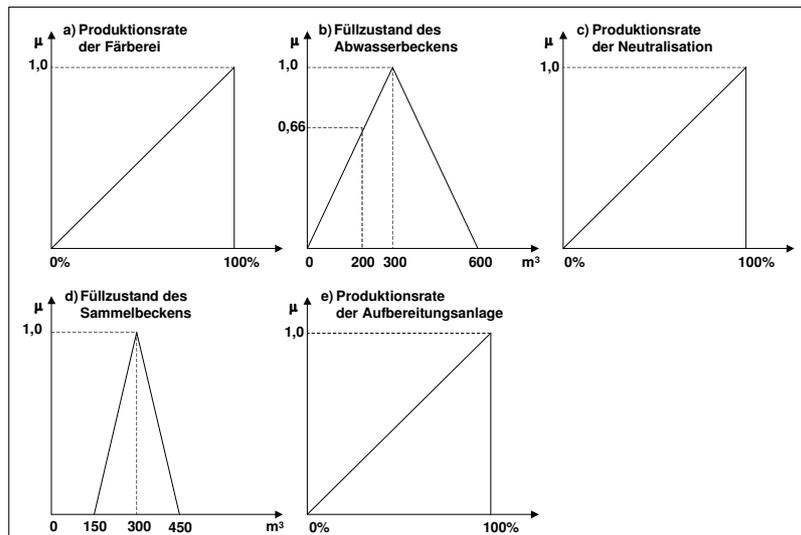


Abbildung 3: Produktionssituation (Ausgangslage)

Ziel des Verhandlungsprozesses ist es, entsprechend der definierten Zufriedenheitsfunktionen (Membershipfunktionen) die Zufriedenheitswerte aller Komponenten zu maximieren. Hierzu wird die folgende Vorgehensweise gewählt:

- Der Verhandlungsprozeß wird von denjenigen Agenten initiiert, deren Zufriedenheitswerte unter den jeweiligen  $\alpha$ -Niveaus liegen. Unter der Annahme, daß für alle Agenten ein  $\alpha$ -Niveau von 0,8 festgelegt sei, gilt dies nur für den L-Agenten, der das Abwasserbecken ( $\mu = 0,66$ ) repräsentiert.
- Da es sich hierbei um einen L-Agenten handelt, kann dessen Zufriedenheitswert nur über eine Veränderung der Produktionsrate der vor- oder nachgelagerten P-Agenten (Färberei oder Neutralisationsanlage) verbessert werden. Die Auswahl eines entsprechenden P-Agenten erfolgt gemäß Abbildung 4a. Ausgangslage für den Auswahlprozeß ist die tatsächliche Abweichung des Füllstands im Abwasserbecken von dem gewünschten Wert. In Abhängigkeit dieser Differenz werden die Terme ( $t_v^{\text{erhöhen}}$ ,  $t_n^{\text{erniedrigen}}$ ,  $t$ ,  $t_n^{\text{erhöhen}}$ ,  $t_v^{\text{erniedrigen}}$ ) der linguistischen Variable „Agentenauswahl“ bewertet. Diese beschreiben die potentiellen Handlungsalternativen. Die Terme  $t_v^{\text{erhöhen}}$  bzw.  $t_v^{\text{erniedrigen}}$  stehen für eine Erhöhung bzw. Erniedrigung der Produktionsrate des vorgelagerten P-Agenten (Färberei). Die Terme  $t_n^{\text{erhöhen}}$  bzw.  $t_n^{\text{erniedrigen}}$  stehen für eine Erhöhung bzw. Erniedrigung der Produktionsrate des nachgelagerten P-Agenten (Neutralisationsanlage). Der Term  $t$  steht für die Alternative „nicht reagieren“. Die zuletzt genannte Option soll, falls die Differenz zwischen Ist- und Sollwert

unterhalb eines definierten Schwellwertes liegt, das System in einem stabilen Zustand halten. Bezogen auf das skizzierte Anwendungsbeispiel läßt sich ein Membershipwert von  $\mu = 0,66$  für die Option „Erniedrigung der Produktionsrate der Färberei“ bzw. ein Membershipwert von  $\mu = 0,33$  für die Option „nicht reagieren“ berechnen (vgl. Abbildung 4a). Dies bedeutet, daß im weiteren nur Verhandlungen, die auf eine Veränderung der Produktionsrate der Neutralisationsanlage ausgerichtet sind, betrachtet werden. Die Definition der Terme der linguistischen Variable „Agentenauswahl“ bzw. deren Membershipfunktionen obliegt der Erfahrung entsprechender Experten.

- Nach der Auswahl der Handlungsalternative (Erniedrigung der Produktionsrate der Neutralisationsanlage) ist die neue Produktionsrate des entsprechenden Agenten zu berechnen. Hierbei sind die Membershipfunktion der Neutralisationsanlage (vgl. Abbildung 3c) sowie die Membershipfunktionen aller vor- bzw. nachgelagerten L-Agenten (vgl. Abbildungen 3b und 3d) in Abhängigkeit aller potentiellen Produktionsraten des betrachteten P-Agenten zu berechnen (vgl. Abbildung 4b). Entscheidungskriterium ist das Maximum der Minima aller zu berücksichtigenden Membershipfunktionen. Im betrachteten Fall ergibt sich hierbei eine Produktionsrate von 83,3% (Auslastung) für die Neutralisationsanlage (vgl. Tabelle 1). Dies berücksichtigt insbesondere die gegenläufigen Ziele der Komponenten „Abwasserbecken“ und „Sammelbecken“. Bezogen auf das Abwasserbecken wird der Zufriedenheitswert durch ein moderates Drosseln der Produktionsrate der Neutralisationsanlage erhöht. Dies impliziert beim „Sammelbecken“ - bei sonst gleichen Voraussetzungen - ein leichtes Absinken des Zufriedenheitswertes.

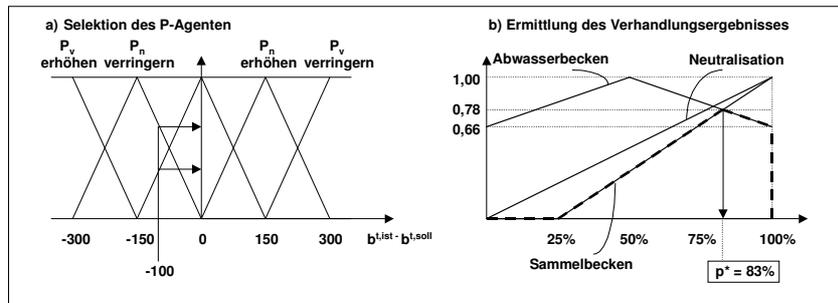


Abbildung 4: Selektion des Verhandlungspartners und Ermittlung des Verhandlungsergebnisses (Schritt 1)

Wird entsprechend der beschriebenen Verfahrensweise die Produktionsrate der Neutralisationsrate im nächsten Schritt auf 83,3% reduziert, so ergeben sich folgende Produktionsdaten:

Tabelle 1: Zustand des Produktionssystems zum Zeitpunkt t+1

Zustand t+1	Produktionsrate	Füllmenge	Membershipwert ( $\mu$ )
Färberei	100%		1,0
Abwasserbecken		233,3 m <sup>3</sup>	0,78
Neutralisation	83,3%		0,83
Sammelbecken		266,7 m <sup>3</sup>	0,78
Aufbereitungsanlage	100%		1,0

Im weiteren Verlauf unterschreiten zwei Komponenten ihre spezifischen  $\alpha$ -Niveaus. Analysiert man die Komponente „Abwasserbecken“, so ergibt sich gemäß Abbildung 4a eine Präferenz für die Option „nicht reagieren“. Demgegenüber ergibt sich, bezogen auf die Komponente „Sammelbecken“ (vgl. Abbildung 5a), eine Präferenz für eine Erniedrigung der Produktionsrate der nachgelagerten Komponente (Aufbereitungsanlage). Eine Analyse der Membershipfunktionen der Komponenten „Sammelbecken“ und „Aufbereitungsanlage“ in Abhängigkeit potentieller Produktionsraten des betrachteten P-Agenten ergibt eine einzustellende Produktionsrate von 81 % für die Aufbereitungsanlage“ in t+2 (vgl. Tabelle 2).

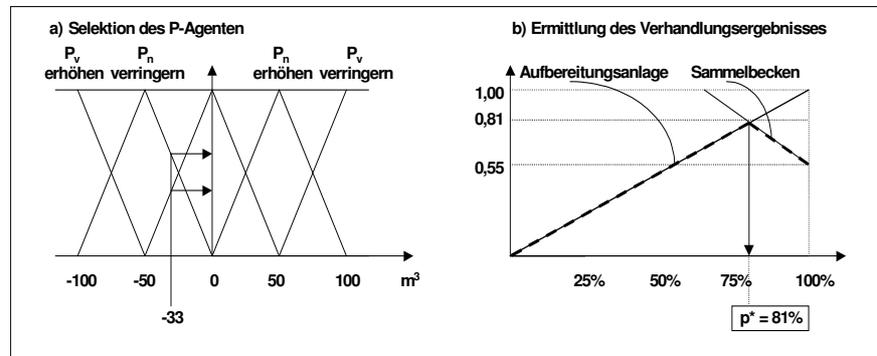


Abbildung 5: Selektion des Verhandlungspartners und Ermittlung des Verhandlungsergebnisses (Schritt 2)

Auf dieser Grundlage ergeben sich folgende Produktionsdaten:

Tabelle 2: Zustand des Produktionssystems zum Zeitpunkt t+2

Zustand t+2	Produktionsrate	Füllmenge	Membershipwert ( $\mu$ )
Färberei	100%		1,0
Abwasserbecken		266,7 m <sup>3</sup>	0,89
Neutralisation	83,3%		0,83
Sammelbecken		271,8 m <sup>3</sup>	0,81
Aufbereitungsanlage	80,8%		0,81

Unter der Annahme, daß alle  $\alpha$ -Niveaus den Wert von 0,8 annehmen, befindet sich das System ceteris paribus in einem eingeschwungenen Zustand.

Auf diese Weise können Produktionssteuerungsmechanismen entworfen werden, die sich insbesondere zur Abstimmung teilweise autonomer Einheiten mit eigenständigen Zielvorstellungen eignen.

### 3 Evaluierung des Multi-Agenten-Ansatzes

Eine Evaluierung des beschriebenen Modellierungsansatzes anhand realer Produktionssysteme hat gezeigt, daß die genannten Ziele eines Stoffstrommanagements prinzipiell auf Basis eines Multi-Agenten-Ansatzes mit unscharfen Bewertungskalkülen umgesetzt werden können [TuMü00]. Das Multi-Agenten-System kann hierbei als kybernetisches System aufgefaßt werden. Ein wesentliches Problem ist die Lösung des Konflikts zwischen Stabilität und Konvergenzgeschwindigkeit. Vorbehaltlich einer detaillierteren Diskussion dieser Thematik [Fö92], lassen sich folgende Empfehlungen zur Konstruktion stabiler Multi-Agenten-Ansätze mit unscharfen Bewertungskalkülen 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 Agenten im Hinblick auf ein 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 (Agent mit dem niedrigsten Zufriedenheitsniveau) beginnen zu lassen und von dort 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  $\alpha$ -Niveaus bzw. die Definition von Schwellwerten für die Initiierung von Verhandlungsprozessen.

Auf Basis der genannten Modellierungsrichtlinien wurde ein vergleichsweise stabiles Modell für ein Produktionssystem aus der Textilindustrie erstellt. Dieses besteht aus den P-Agenten Kesselhaus, Neutralisationsanlage und Kamin (vgl. Abb. 6).

Das in Abbildung 6 dargestellte Szenario zeigt den Einfluß der Einführung eines Emissionsgrenzwertes bezüglich der Schadstoffe CO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> auf das System. In der Ausgangssituation können diese prinzipiell nicht lagerbaren (modelliert durch eine entsprechende Membershipfunktion des L-Agenten) 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.

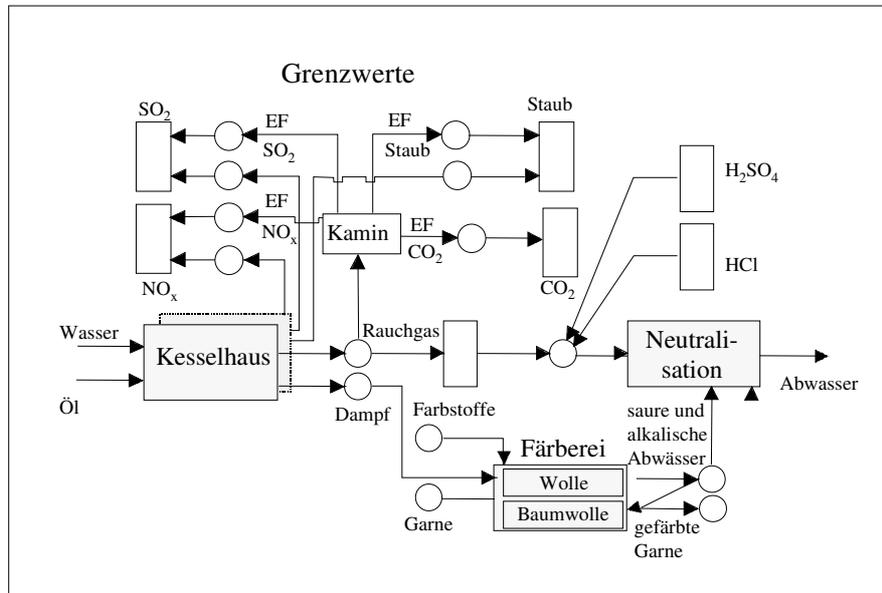


Abbildung 6: Ausschnitt aus dem betrachteten Produktionssystem

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis des Abstimmungsprozesses. 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 7 zeigt, daß für das modellierte Teilsystem ein stabiles Systemverhalten erreichbar ist.

Problematisch erscheint jedoch die Modellierung komplexerer Systeme [TuMü00]. Ein Grund hierfür ist die hohe Anzahl von Freiheitsgraden (Membershipfunktionen). 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 Agenten sowie einer Lernfähigkeit zur Adaption der Membershipfunktionen auf Basis von Erfahrungswissen.

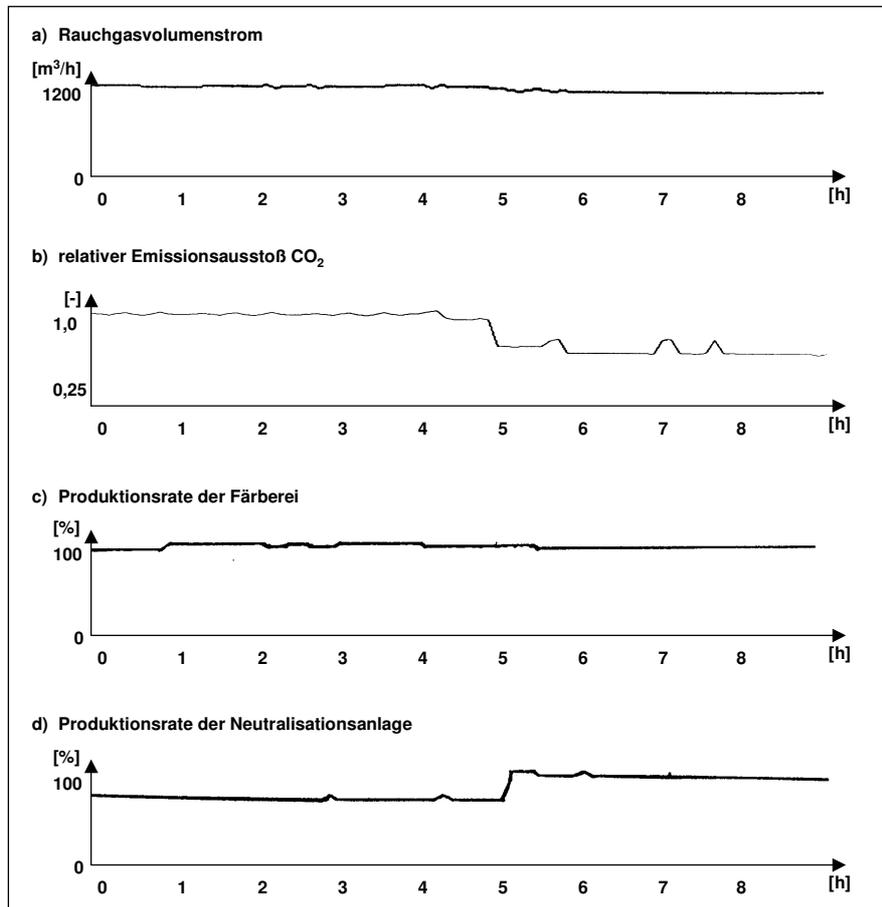


Abbildung 7: Ergebnisse für den betrachteten Systemausschnitt

## Literatur

- [CoGö98a] Corsten, H./Gössinger, R: Produktionsplanung und -steuerung auf der Grundlage von Multiagentensystemen, in: Corsten, H./Gössinger, R. (Hrsg.): Dezentrale Produktionsplanungs- und -steuerungs-Systeme - Eine Einführung in zehn Lektionen, Stuttgart et al., S. 173-207, 1998.
- [CoGö98b] Corsten, H./Gössinger, R: Allokationsmechanismen für kontraktbasierte unternehmensinterne Märkte - Eine Analyse am Beispiel der dezentralen Produktionsplanung und -steuerung als unternehmensinterne Dienstleistung, in: Corsten, H. (Hrsg.): Schriften zum Produktionsmanagement, Nr. 17, Kaiserslautern, 1998.

- [Fö92] Föllinger, O.: Regelungstechnik, Heidelberg, Hüthig Buch Verlag, 1992.
- [Ha96] Haasis, H.-D.: Betriebliche Umweltökonomie. Springer: Berlin u.a., S.170 ff., 1996.
- [Ko91] Kotschenreuther, W: Unterstützung der Störungsbewältigung in der Produktion durch verteilte wissensbasierte Systeme, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1991.
- [Ki96] Kirn, S.: Kooperativ-Intelligente Softwareagenten, in: Information Management, 11. Jg., Nr. 1, S. 18-28, 1996.
- [KiSc92] Kirn, S./Scherer, A./Schlageter, G./Fresco A: Förderative Kooperation in Verteilten Wissensbasierten Systemen, in: KI - Künstliche Intelligenz, 6. Jg., Nr. 1, S. 68-71, 1992.
- [Mü94] Müller, H.J.: Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz, in: Kirn, S./Weinhardt, C. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz in der Finanzberatung - Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, Wiesbaden, S. 157-189, 1994.
- [Mü97] Müller, H.J.: Towards agent systems engineering, in: International Journal on Data and Knowledge Engineering, Special Issue on Distributed Expertise, S. 217-245, 1997.
- [MeHi89] Mertens, P./Hildebrand, R.J.N./Kotschenreuther, W.: Verteiltes wissensbasiertes Problemlösen im Fertigungsbereich, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 59. Jg., S. 839-854, 1989.
- [Sm80] Smith, R.: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, in: Transactions on Computers, 29. Jg., S. 1104-1113, 1980.
- [Tu94] 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.
- [TuMü00] 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, 2000.
- [vBe93] v. Bechtoltsheim, M.: Agentensysteme, Wiesbaden, 1993.
- [Zi91] Zimmermann, H.J.: Fuzzy Set Theory and its Applications, Boston et al., 1991.
- [Ze97] Zelewski, St.: Elektronische Märkte zur Prozeßkoordinierung in Produktionsnetzwerken, in: Wirtschaftsinformatik, 39. Jg., S. 231-243, 1997.
- [Ze98] Zelewski, St.: Multi-Agenten-Systeme - ein innovativer Ansatz zur Realisierung dezentraler PPS-Systeme, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Innovationen in der Produktionswirtschaft - Produkte, Prozesse, Planung und Steuerung, München, S. 133-166, 1998.