

Ein Multi-Agenten-Ansatz zur umweltschutzorientierten Produktionssteuerung

Axel Tuma, Stephan Franke und Hans-Dietrich Haasis¹

Abstract

Die zunehmende Vernetzung von Produktionsaktivitäten bei gleichzeitig steigenden Umweltschutzaufgaben erfordert die Bereitstellung von Produktionsabstimmungsmechanismen, die sowohl betriebswirtschaftlichen als auch umweltschutzorientierten Zielen in verteilten Produktionssystemen Rechnung tragen. Vor diesem Hintergrund wird in dem vorliegenden Beitrag ein umweltschutzorientierter Produktionssteuerungsansatz auf Basis eines Multi-Agenten-Systems mit unscharfen Bewertungskalkülen der lokalen Ziel-funktionen vorgestellt.

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 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 (Haasis 1996, Siestrup/Tuma/Haasis 1997). Dies betrifft sowohl die Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieströmen innerhalb einer Produktionsstufe als auch zwischen verteilten Produktionsstufen.

¹ Universität Bremen, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre, Postfach 330440, 28334 Bremen, email: atuma@uni-bremen.de

2 Methodischer Ansatz zur umweltschutzorientierten Abstimmung von verteilten Produktionssystemen

Einen vielversprechenden Ansatz zur Abstimmung von vernetzten Produktionssystemen stellt das Konzept des verteilten Problemlösens dar. Dieses Konzept wurde zunächst als ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz entwickelt. Bereits im Anfangsstadium spielten jedoch Anwendungen auf dem Gebiet der Koordinierung von Produktionsprozessen eine zentrale Rolle.

Unter verteiltem Problemlösen versteht man das Zusammenwirken von teilautonomen Agenten, die bei der Erfüllung einer Aufgabe kooperieren. Als Agenten werden hierbei i. Allg. autonome, informationsverarbeitende Einheiten mit eigenständigen Zielsystemen bezeichnet. Eine besonders erfolgversprechende Variante von Multi-Agenten-Systemen im Rahmen einer dezentralen Produktionssteuerung stellen sogenannte Kontraktnetzwerke dar. 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 Teilprojekten) und Nachfragen (z.B. potentielle Kooperationspartner) einander zuzuordnen (Corsten/Gössinger 1998a, Corsten/Gössinger 1998b, Zelewski 1995, Zelewski 1997).

Eine detailliertere Analyse des Multi-Agenten-Ansatzes 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, müssen bei der Modellierung drei Ebenen betrachtet werden:

- 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 (von Bechtholtsheim 1993). Dies hat Einfluß auf die genannten Schritte zur Modellierung der einzelnen Agenten.

Die Modellierung eines Multi-Agenten-Systems muß domänenspezifisch erfolgen. Dies bedeutet, daß in einem ersten Schritt problemabhängig Entitäten identifiziert werden müssen, für die entsprechende Agententypen zu modellieren sind. Bezogen auf Produktionssteuerungsprobleme 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, das dem Programmtyp „Massenfertigung“ und dem Organisationstyp „Fließfertigung“ zugeordnet werden kann, in der CommonKADS-Terminologie beschrieben (Müller 1997). In diesem Zusammenhang ist eine Modellierung von Produktions- und Lageragenten hinreichend.

P-Agenten: (Produktionseinheiten)

- haben die *Aufgabe*, ihre Produktionsrate zu optimieren²,
- 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.

² Optimalitätskriterien werden auf der Basis von Zufriedenheitswerten definiert und im Folgenden diskutiert.

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 (Müller 1996).

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) bzw. bezüglich ihres Lagerbestands (L-Agent) durch Verwendung sogenannter „Membershipfunktionen“ ermittelt (Zimmermann 1991):

- *Bewertung potentieller Produktionsraten von P-Agenten mit Zufriedenheitswerten:* den potentiellen Produktionsraten der P-Agenten werden Zufriedenheitswerte zugeordnet (vgl. Abbildung 1a).
- *Bewertung der Bestände von L-Agenten:* die realisierten Bestände der einzelnen Lager- bzw. Puffersysteme werden mit Zufriedenheitswerten bewertet (vgl. Abbildung 1c).

Darüber hinaus kann auch eine Bewertung der Änderung der Produktionsraten der P-Agenten eingeführt werden:

- *Bewertung der Veränderung der Produktionsraten von P-Agenten mit Zufriedenheitswerten:* 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 reagieren zu können (vgl. Abbildung 1b).

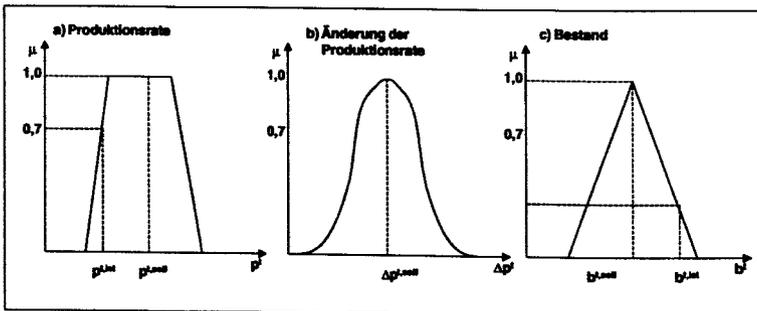


Abbildung 1

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

Auf Basis eines derartigen Zufriedenheitskonzeptes wird eine Verhandlungsstruktur (Verhandlungsprotokoll) definiert. Ziel des im Folgenden 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 (α -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 zur Abbildung einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung. So können zur Operationalisierung umweltschutzorientierter Zielvorstellungen 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:* Zur Begrenzung anfallender Mengen von Schadstoffen, zur Begrenzung des Ressourcenverbrauchs sowie zur Gewährleistung eines Mindestmaßes bezüglich des Einsatzes von Sekundärrohstoffen können entsprechende L-Agenten konstruiert werden.

Zur Verdeutlichung des beschriebenen Agenten-Ansatzes wird im Folgenden ein exemplarisches Produktionssystem, 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 Durch-

fluß von $200 \text{ m}^3/\text{ZE}$ aus. Die Speicherbecken haben eine maximale Kapazität von 600 m^3 .

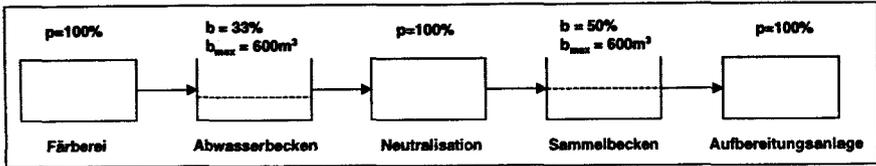


Abbildung 2
Ausschnitt aus dem betrachteten Produktionssystem

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 höchst 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 m^3). Das Abwasserbecken sei dagegen nur zu 33% gefüllt (maximale Kapazität 600 m^3). Dies entspricht einem Zufriedenheitswert von $\mu = 0,66$ (vgl. Abbildung 3b).

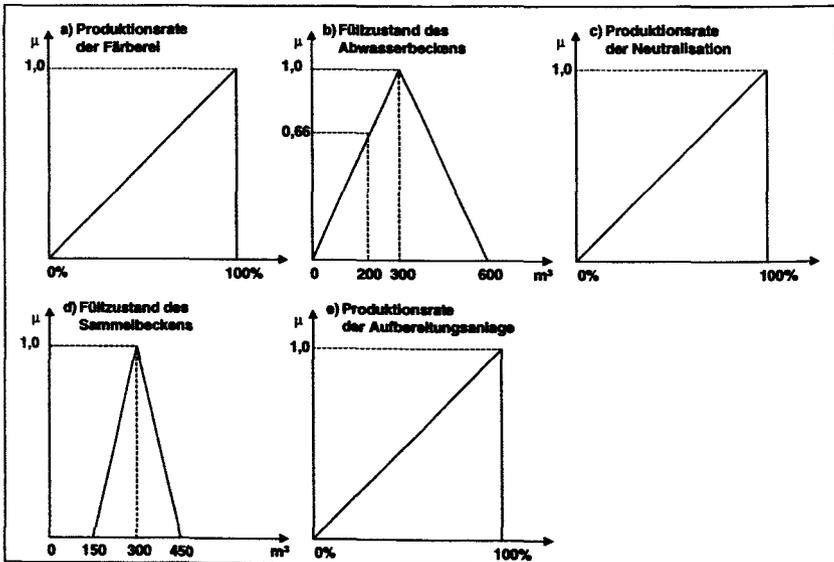


Abbildung 3
Produktionssituation (Ausgangslage)

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 α -Niveaus liegen. Unter der Annahme, daß für alle Agenten ein α -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 Terme ($t_v^{\text{erhöhen}}$, $t_n^{\text{erniedrigen}}$, $t_v^{\text{erhöhen}}$, $t_n^{\text{erniedrigen}}$) der linguistischen Variable „Agentenauswahl“ bewertet. Diese beschreiben die potentiellen Handlungsalternativen. Die Terme $t_v^{\text{erhöhen}}$ bzw. $t_n^{\text{erniedrigen}}$ 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. 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.

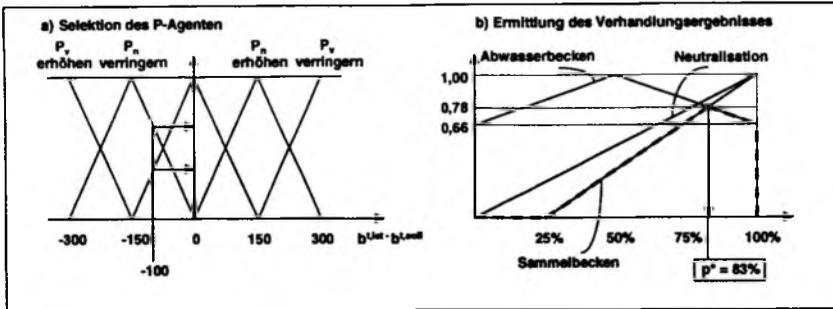


Abbildung 4
Selektion des Verhandlungspartners und Ermittlung des
Verhandlungsergebnisses (Schritt 1)

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

Zustand t +1	Produktionsrate	Füllmenge	Membershipwert (μ)
Färberei	100%		1,0
Abwasserbecken		233,3 m ³	0,78
Neutralisation	83,3%		0,83
Sammelbecken		266,7 m ³	0,78
Aufbereitungsanlage	100%		1,0

Tabelle 1
Zustand des Produktionssystems zum Zeitpunkt t+1

Im weiteren Verlauf unterschreiten zwei Komponenten ihre spezifischen α -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 „Sam-

melbecken“ und „Aufbereitungsanlage“ in Abhängigkeit potentieller Produktionsraten des betrachteten P-Agenten ergibt eine einzustellende Produktionsrate von 81 % für die Aufbereitungsanlage“ in t+2.

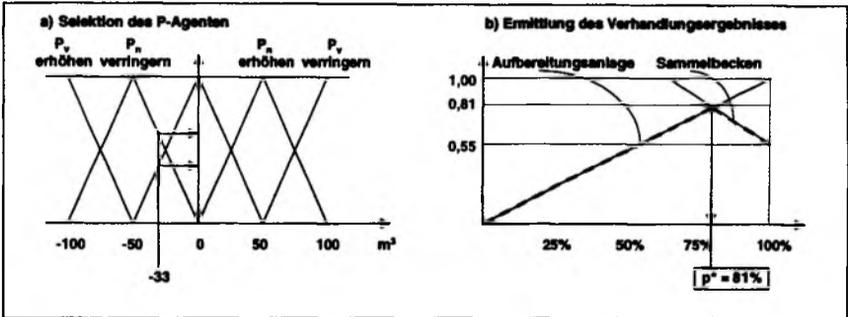


Abbildung 5
Selektion des Verhandlungspartners und Ermittlung des
Verhandlungsergebnisses (Schritt 2)

Auf dieser Grundlage ergeben sich folgende Produktionsdaten:

Zustand t +2	Produktionsrate	Füllmenge	Membershipwert (μ)
Färberei	100%		1,0
Abwasserbecken		266,7 m^3	0,89
Neutralisation	83,3%		0,83
Sammelbecken		271,8 m^3	0,81
Aufbereitungsanlage	80,8%		0,81

Tabelle 2
Zustand des Produktionssystems zum Zeitpunkt t+2

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

3 Diskussion

Eine weitergehende Evaluierung des beschriebenen Modellierungsansatzes anhand realer Produktionssysteme hat gezeigt, daß die genannten Ziele einer umweltschutzorientierten Produktionssteuerung prinzipiell auf Basis eines Multi-Agenten-

Ansatzes mit unscharfen Bewertungskalkülen angegangen werden können (Tuma/Müller 1999). 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 (Föllinger 1992) 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 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 α -Niveaus bzw. die Definition von Schwellwerten für die Initiierung von Verhandlungsprozessen.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte können für kleinere Produktionssysteme vergleichsweise stabile Modelle erstellt werden. Problematisch erscheint jedoch die Modellierung komplexerer Systeme (Tuma/Müller 1999). 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.

Literaturverzeichnis

- Corsten, H.; Gössinger, R. (1998a): 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/Berlin/Köln, S. 173-207
- Corsten, H.; Gössinger, R. (1998b): Allokationsmechanismen für kontraktbasierte unternehmensinterne Märkte - Eine Analyse am Beispiel der dezentralen Produktionsplanung und -steuerung als unternehmensinterne Dienstleistung, Schriften zum Produktionsmanagement, Kaiserslautern
- Föllinger, O. (1992): Regelungstechnik, Heidelberg, Hüthig Buch Verlag.
- Haasis, H.-D. (1996): Betriebliche Umweltökonomie, Bewerten - Optimieren - Entscheiden, Berlin et al., Springer-Verlag.
- Müller, H. J. (1996): "Negotiation Principles", in: O'Hare, G.M.P. and Jennings, N.R. (Eds.): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Wiley Interscience Pub., pp. 211-230.
- Müller, H. J. (1997): "Towards agent systems engineering", in: International Journal on Data and Knowledge Engineering, Special Issue on Distributed Expertise. 23 (1997), pp. 217 - 245.
- Siestrup, G.; Tuma, A.; Haasis, H.-D. (1997): 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.
- Tuma, A.; Müller, H. J. (1999): Using Fuzzy-Directed Agents for Ecological Production Control, in: Intelligent Automation and Soft Computing, special issue on Distributed Intelligent Systems, to appear in 1999.
- v. Bechtoltsheim, M. (1993): Agentensysteme, Wiesbaden, Vieweg Verlag.
- Zelewski, S. (1995): Petrinetzbasierte Modellierung komplexer Produktionssysteme, Arbeitsbericht Nr. 6 des Instituts für Produktionswirtschaft und Industrielle Informationswirtschaft der Universität Leipzig, Band 2: Bezugsrahmen, Leipzig.
- Zelewski, S. (1997): Elektronische Märkte zur Prozeßkoordination in Produktionsnetzwerken, in: Wirtschaftsinformatik 39(1997)3, S. 231-243.
- Zimmermann, H. J. (1991): Fuzzy Set Theory and its Applications, Kluwer Academic Publishers, Boston et al.