

*Integrationsaspekte der Simulation:  
Technik, Organisation und Personal*  
Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.)  
Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010

# **Simulation einer selbstorganisierenden Fertigungssteuerung auf Basis der Ant-Colony-Optimierung**

***Simulation of Self-organizing Manufacturing Control  
Based on Ant Colony Optimization***

Patricia Stock, Gert Zülch  
Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab),  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe (Germany)  
patricia.stock@kit.edu, gert.zuelch@kit.edu

**Abstract:** As a reaction to the growing demands of the market on enterprises, ever more complex procedures for production control are being developed. The *ifab*-Institute of the Karlsruhe Institute of Technology has developed the procedure *AntControl* for the short-term, operative manufacturing control based the Ant Colony Optimization. *AntControl* has been integrated into the organisation-oriented simulation procedure *OSim*, which results in the new simulation procedure *OSim-Ant*. An exemplary simulation study within a manufacturing enterprise has being carried out to evaluate the behaviour of *AntControl*.

## **1 Selbstorganisation in der Fertigungssteuerung**

Als Reaktion auf die wachsenden Anforderungen des Marktes müssen Unternehmen immer flexibler auf Kundennachfragen reagieren. Im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung wurden daher neuartige Konzepte entwickelt, um diesen Ansprüchen gerecht zu werden (zur Vertiefung siehe z.B. ONWUBOLU 2002; DEEN 2003; ONWUBOLU, BABU 2004). Insbesondere für die Fertigungssteuerung werden dabei verstärkt verteilte, reaktive Verfahren eingesetzt, die eine höhere Robustheit und Flexibilität gegenüber Störungen und Veränderungen aufweisen als traditionelle Verfahren wie z.B. Prioritätsregeln (nach BRÜCKNER 2000, S. II; SMITH 2003, S. 7; KRESKEN, BAUMANN 2006, S. 269). Bei steigender Komplexität verspricht die Selbststeuerung einen Grad der Zielerreichung, der mit zentralisierten, fremdgesteuerten Systemen nicht realisierbar wäre (SCHOLZ-REITER u.a. 2006, S. 11). Als Grundlage für die selbstorganisierte Fertigungssteuerung kann die *Ant-Colony-Optimierung* (ACO) dienen, deren Algorithmen sich durch Robust-

heit, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit auszeichnen (FISCHER, STOWASSER 2003, S. 65).

Die *Ant-Colony-Optimierung* basiert auf dem Verhalten von Ameisenkolonien während der Futtersuche (DORIGO, STÜTZLE 2004, S. 2): Zunächst erfolgt die Suche nach Futterquellen in ungeordneter Weise. Dabei markieren die Ameisen die von ihnen begangenen Wege mit chemischen Substanzen, den sog. Pheromonen. Die Ameisen bevorzugen in der Folge diejenigen Wege mit einer hohen Pheromonkonzentration. Da auf den kürzeren Wegen verhältnismäßig mehr Ameisen laufen als auf den längeren, weisen diese nach einiger Zeit eine intensivere Pheromonkonzentration auf, wodurch der kürzeste Weg zur besten Futterquelle identifiziert werden kann. Auch können neu auftauchende Barrieren identifiziert und nach einer Weile erfolgreich umgangen werden. DORIGO (1992) hat das Verhalten der biologischen Ameisen auf künstliche Ameisen übertragen und den ersten ACO-Algorithmus entwickelt, der als Prototyp für zahlreiche andere Ameisen-Algorithmen dient (einen Überblick geben z.B. DORIGO, STÜTZLE 2004, S. 65 ff.).

Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet (zur Vertiefung z.B. DORIGO, STÜTZLE 2004, S. 167 ff.) befassen sich in der Regel mit der deterministischen Reihenfolgeplanung von Aufträgen, wobei die Ankunftszeiten der Aufträge sowie deren Durchführungszeiten als bekannt und nicht veränderlich vorausgesetzt werden. Insbesondere werden auch keine Störungen in der Auftragsbearbeitung berücksichtigt, z.B. durch Maschinenausfälle. Darüber hinaus verfolgen die existierenden Ansätze meist nur ein einziges Zielkriterium, vielfach die Zeit oder diejenigen Kosten, die sich durch Abweichungen von den geplanten Lieferterminen ergeben. Weitere betriebliche Zielkriterien wie Prozesskosten oder Ressourcenauslastung werden nicht berücksichtigt. Schließlich werden die Lösungsansätze meist nur auf sehr kleine Problemfälle angewendet. In der Praxis muss die Fertigungssteuerung jedoch eine große Anzahl von Aufträgen und Ressourcen sowie Beziehungen zwischen diesen bewältigen können.

## 2 Das Steuerungsverfahren *AntControl*

Vor diesem Hintergrund wurde am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (*ifab*) des Karlsruher Instituts für Technologie (vormals Universität Karlsruhe) das Verfahren *AntControl* zur kurzfristigen operativen Fertigungssteuerung auf Basis der *Ant-Colony-Optimierung* entwickelt. Bei der Übertragung dieses Konzeptes auf ein Fertigungssystem nehmen die Aufträge die Stellung der Ameisen bei der Futtersuche ein. Das Verhalten der Ameisen, d.h. die Steuerung der Aufträge, wird durch die neu entwickelte Heuristik *ACS-CTRL* bestimmt (vgl. Abb. 1).

Hierzu wurde die existierende ACO-Heuristik *Ant Colony System (ACS)* (DORIGO, STÜTZLE 2004, 76 ff.) um spezifische Elemente der Fertigungssteuerung erweitert. Zu diesem Zweck wird angenommen, dass in jedem Fertigungssystem Entscheidungsaufgaben existieren, an denen für die weitere Auftragsbearbeitung unterschiedliche Alternativen zur Verfügung stehen: Einerseits kann die Auswahl der Ressourcen (Betriebsmittel bzw. Personal) oder auch eine alternative Zuordnung von Arbeitsvorgangfolgen erfolgen, andererseits können verschiedene Steuerungs-

strategien eingesetzt werden (z.B. Veränderung von Auftragsreihenfolge oder Losgröße).

Die Wahl der Steuerungsalternative erfolgt unter Berücksichtigung des Zielsystems der Auftragsabwicklung. In einem Fertigungssystem existieren auftragsbezogene Ziele (z.B. Minimierung der Durchlaufzeiten, Minimierung der Prozesskosten) und ressourcenbezogene Ziele (z.B. Maximierung der Kapazitätsauslastung). Ein Zielsystem setzt sich aus einem oder mehreren dieser Ziele sowie den ihnen zugeordneten Gewichtungsfaktoren zusammen. In einem Fertigungssystem können für bestimmte Klassen von Aufträgen unterschiedliche Zielsysteme vorliegen (im Folgenden als Auftragsart bezeichnet). So wird beispielsweise ein Normalauftrag tendenziell versuchen, den vorgegebenen Liefertermin einzuhalten und die Kosten zu minimieren, während ein Eilauftrag versuchen wird, seine Durchlaufzeit zu minimieren. Auch könnten Aufträge bestimmter Kunden priorisiert werden.

Gemäß der entwickelten Heuristik *ACS-CTRL* (vgl. Abb. 1) wählen die Aufträge autark die für sie beste Alternative aus. Bei einer anstehenden Entscheidungsaufgabe wird zunächst nach Formel (1) über eine Zufallsvariable probabilistisch ermittelt, ob automatisch die (gemäß dem jeweiligen Zielsystem) beste sich bietende Handlungsalternative ergriffen werden soll. Ist dies nicht der Fall, so wird für jede Handlungsalternative deren Auswahlwahrscheinlichkeit mittels Formel (2) bestimmt, die proportional zur Güte der Handlungsalternative ist. Anschließend wird die Handlungsalternative probabilistisch ausgewählt.

Die Güte einer Alternative wird dabei auf Basis von zwei Kennzahlen berechnet (vgl. ZÜLCH, STOCK 2006, S. 173):

- Der Heuristikwert  $\eta$  prognostiziert die voraussichtliche Zielerreichung der Alternative zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung. Hierbei werden in der Regel Informationen zum aktuellen Systemzustand herangezogen, wie z.B. Wartezeit, Durchführungszeit oder Prozesskosten. Es können aber auch Informationen aus externen Quellen einbezogen werden, z.B. Erfahrungswissen des Maschinenbedieners oder des Meisters.
- Der Pheromonwert  $\tau$  repräsentiert das gesammelte Wissen früherer Aufträge, welche die Alternative bereits durchlaufen haben. Somit dient er einerseits dazu, die beste Alternative bei früheren Auftragsdurchläufen zu identifizieren (sog. "exploitation"). Andererseits führt der Pheromonwert auch zur Bewertung der übrigen Alternativen (sog. "exploration"). Dies soll vermeiden, dass an einer potenziell suboptimalen Lösung festgehalten wird. Der Pheromonwert wird zu Beginn des Verfahrens mit einem konstanten Wert initialisiert und dann von den Aufträgen während der Auftragsbearbeitung aktualisiert.

Die Berechnung der Heuristikwerte sowie die Initialisierung und Aktualisierung der Pheromonwerte erfolgt spezifisch je nach Zielsystem des Auftrags (vgl. ZÜLCH, STOCK 2007, S. 68 f.). Daher existiert für jedes Zielsystem ein eigenes Pheromon-system.

$$c_{ka}^* = \begin{cases} \arg \max_{c \in C_{ka}} \{ \tau_{ca}^\alpha \cdot \eta_{ca}^\beta \} & \dots \text{falls } q < q_0 \\ \text{zufällig}_{c \in C_{ka}} \{ p_{ca} \} & \dots \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{ca} = \frac{\tau_{ca}^\alpha \cdot \eta_{ca}^\beta}{\sum_{c \in C_{ka}} \tau_{ca}^\alpha \cdot \eta_{ca}^\beta} \quad (2)$$

mit:

- $a$  Index für Auftragsarten
- $c$  Index für Handlungsalternativen
- $C_{ka}$  Indexmenge der Handlungsalternativen für Entscheidungsaufgabe  $k$
- $c_{ka}^*$  ausgewählte Handlungsalternative für Entscheidungsaufgabe  $k$
- $k$  Index für Entscheidungsaufgaben
- $p_{ca}$  Wahrscheinlichkeit für die Auswahl von Handlungsalternative  $c$  unter Berücksichtigung von Auftragsart  $a$
- $q$  gleichverteilte Zufallsvariable in  $[0, 1]$
- $q_0$  Anpassungsparameter für die Aggressivität der probabilistischen Entscheidung
- $\alpha$  Anpassungsparameter für den Einfluss des Pheromonwertes  $\tau_{ca}$
- $\beta$  Anpassungsparameter für den Einfluss des Heuristikwertes  $\eta_{ca}$
- $\eta_{ca}$  Heuristikwert der Handlungsalternative  $c$  unter Berücksichtigung der Auftragsart  $a$
- $\tau_{ca}$  Pheromonwert der Handlungsalternative  $c$  unter Berücksichtigung der Auftragsart  $a$

**Abbildung 1:** Parameter der Heuristik ACS-CTRL zur Auswahl einer Alternativen bei einer Entscheidungsaufgabe (ZÜLCH, STOCK 2007, S. 68)

### 3 Das Simulationsverfahren *OSim-Ant*

Das Steuerungsverfahren *AntControl* wurde in das am *ifab* entwickelte objektorientierte Simulationsverfahren *OSim* (*Objektsimulator*; JONSSON 2000) integriert, wodurch das Simulationsverfahren *OSim-Ant* entstand. Die Modellierung der verschiedenen Auftragsstypen erfolgt in *OSim* mit Hilfe von Durchlaufplänen, die netzgraphenartig die zeitlich-logischen Abhängigkeiten der Arbeitsvorgänge bei der Auftragsbearbeitung darstellen. Ein Durchlaufplan kann von internen oder externen Ereignissen ausgelöst werden, z.B. durch das Eintreffen eines Kundenauftrages oder der planmäßigen Instandhaltung eines Betriebsmittels. Den Durchlaufplänen werden sog. Auslöser zugewiesen, welche deterministisch oder stochastisch die Zwischenankunftszeiten der eintreffenden Aufträge definieren. Die Auslöser beinhalten auch die Informationen über das Zielsystem, das von dem assoziierten Auftrag verfolgt wird.

Ein Fertigungssystem wird somit durch die Gesamtheit aller Durchlaufpläne und die verfügbaren Ressourcen (Personal, Betriebsmittel, Arbeitsplätze, Material) sowie

deren Abhängigkeiten untereinander beschrieben. Die Entscheidungsaufgaben werden im Durchlaufplan als Knoten abgebildet. In diesem können die verschiedenen Handlungsalternativen modelliert werden, wobei in der derzeitigen Implementierung sowohl das Losgrößensplitting als auch eine Veränderung der Auftragsreihenfolge (bzw. eine Kombination aus beiden) abgebildet werden können (ZÜLCH, STOCK 2006, S. 175).

#### 4 Simulationsstudie zur Validierung von *AntControl*

Nach Implementierung des Konzepts wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, um die Wirksamkeit des Steuerungsverfahrens *AntControl* zu überprüfen. Hierzu wurden am Beispiel von Elektrogeräten die Fertigungssteuerung mittels verschiedener Prioritätsregeln mit der selbstorganisierenden Fertigungssteuerung durch *AntControl* verglichen.

Im Fertigungssystem werden insgesamt 80 verschiedene Erzeugnisse gefertigt, die sich hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Baugruppen, der auszuführenden Arbeitsvorgänge sowie deren Durchführungszeiten unterscheiden. Abbildung 2 zeigt ein Erzeugnis, das aus drei Baugruppen besteht, die parallel gefertigt und abschließend montiert werden. Es stehen insgesamt 21 Betriebsmittel zur Verfügung, die im Durchschnitt während 5 % ihrer Betriebszeit gestört sind. Für einige Arbeitsvorgänge stehen zudem unterschiedliche Betriebsmittel zur Verfügung, die sich bei gleicher Bearbeitungszeit hinsichtlich ihrer fixen und variablen Kosten unterscheiden. Die Fertigung läuft im Zweischichtbetrieb von 6 bis 22 Uhr, wobei die Fertigung an den Wochenenden ruht.

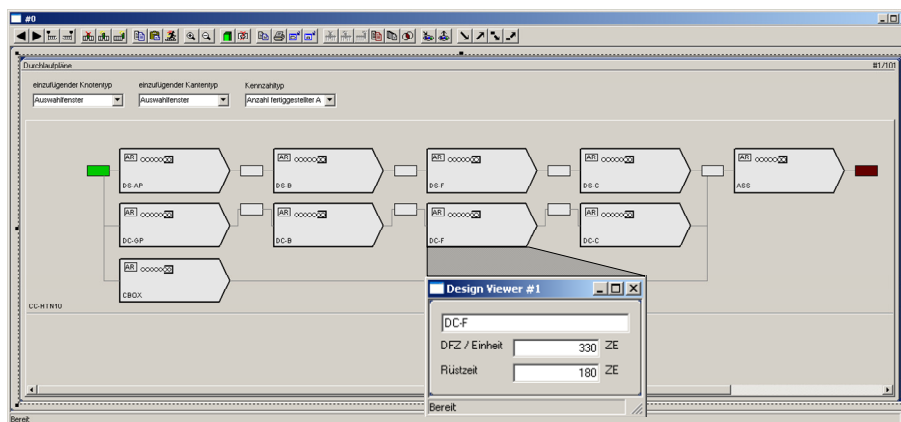
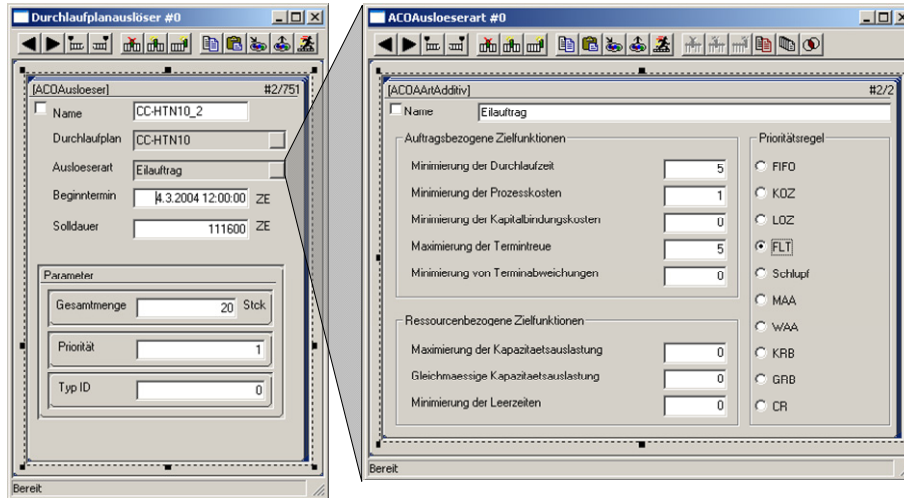


Abbildung 2: Durchlaufplan eines Erzeugnisses in der Ausgangssituation

Im Simulationszeitraum von vier Wochen werden insgesamt 331 Aufträge eingesteuert, deren Losgrößen zwischen 5 und 30 variierten und im Durchschnitt bei 13 Stück lagen. Es existieren Normalaufträge und Eilaufträge, die sich hinsichtlich der Gewichtung  $w$  der Zielerreichung von Durchlaufzeit, Prozesskosten und Termintreue unterscheiden (Tab. 1). Abbildung 3 zeigt einen Eilauftrag mit der Losgröße 20 sowie das zugehörige Zielsystem.



**Abbildung 3:** Auslöser eines Auftrags mit dessen spezifischen Zielsystem

In der Simulationsstudie wurde zunächst die Ausgangssituation mit fünf verschiedenen Prioritätsregeln simuliert (Tab. 1), wobei die Aufträge in einer zentralen Warteschlange vor dem folgenden Arbeitsvorgang warten. Dabei erfolgt keine feste Zuordnung zu einem Betriebsmittel, sondern es wird immer derjenige Auftrag mit der höchsten Priorität (gemäß der anzuwendenden Prioritätsregel) auf ein geeignetes, frei werdendes Betriebsmittel eingesteuert. Zur Bewertung von *ACS-CTRL* wurde drei Szenarien definiert:

- Das erste Szenario ( $\alpha=0, \beta=1$ ) entspricht einem Greedy-Algorithmus, bei dem nur der aktuelle Systemzustand berücksichtigt wird.
- Das zweite Szenario ( $\alpha=1, \beta=0$ ) entspricht einer stochastischen Auswahl, bei der nur die bisherige Zielerreichung, nicht aber der aktuelle Systemzustand berücksichtigt wird.
- Das dritte Szenario ( $\alpha=1, \beta=5$ ) ist eine exemplarische Konfiguration für die Anpassungsparameter von *ACS-CTRL*, die an typische Parameter aus der Literatur angelehnt ist (vgl. DORIGO, STÜTZLE 2004, S. 71).

Jedes dieser Szenarien wurde mit den fünf Prioritätsregeln simuliert. Um die stochastischen Einflüsse auszuschließen, wurden je 20 Simulationsläufe mit verschiedenen Zufallszahlenkeimen durchgeführt. Zur Bewertung der Simulationsläufe wurden diejenigen Kennzahlen herangezogen, auf deren Basis auch gesteuert wurde. Zum besseren Vergleich wurde zusätzlich ein Gesamtzielerreichungsgrad gemäß Formel (3) ermittelt, wobei es sich bei  $w$  um eine frei wählbare Gewichtung handelt.

$$GZG = \frac{w_{11} \cdot ZDZ_1 + w_{12} \cdot ZPZ_1 + w_{13} \cdot ZTT_1 + w_{21} \cdot ZDZ_2 + w_{22} \cdot ZPZ_2 + w_{23} \cdot ZTT_2}{w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{23}} \quad (3)$$

Erwartungsgemäß schneidet die stochastische Auswahl (Szenario 2) am schlechtesten ab, da diese den aktuellen Systemzustand vernachlässigt. Die Konzentration auf den aktuellen Systemzustand unter Vernachlässigung der Erfahrungswerte früherer

Aufträge (Szenario 1) liefert ähnliche Werte wie die Simulation der Ausgangssituation. Szenario 3 hingegen liefert für die Prioritätsregel "Frühester Liefertermin" (FLT) ein tendenziell besseres Ergebnis als die beste Lösung der Ausgangssituation. Dies zeigt, dass mit ACS-CTRL prinzipiell eine verbesserte Fertigungssteuerung möglich ist. In der aktuellen Lösung ist die tatsächliche Verbesserung mit 0,5 % zwar eher gering, allerdings kann dies an der zufälligen Auswahl der Anpassungsparameter liegen.

		Normalauftrag			Eilauftrag			GZG Formel 3
		ZDZ <sub>1</sub>	ZPZ <sub>1</sub>	ZTT <sub>1</sub>	ZDZ <sub>2</sub>	ZPZ <sub>2</sub>	ZTT <sub>2</sub>	
		w <sub>11</sub> =1	w <sub>12</sub> =4	w <sub>13</sub> =1	w <sub>21</sub> =5	w <sub>22</sub> =2	w <sub>23</sub> =5	
Ausgangssituation: zentrale Warte- Schlange	FIFO	32,4 %	48,7 %	78,9 %	34,5 %	48,7 %	40,5 %	43,3 %
	KOZ	48,2 %	48,6 %	98,8 %	46,1 %	49,0 %	61,9 %	54,4 %
	LOZ	34,8 %	48,3 %	65,6 %	37,1 %	49,4 %	41,7 %	43,7 %
	FLT	40,7 %	49,0 %	98,0 %	60,3 %	48,2 %	94,0 %	66,8 %
	Schlupf	41,0 %	48,8 %	97,2 %	62,1 %	48,5 %	92,9 %	67,0 %
Szenario 1: ACS- CTRL mit $\alpha=0$ , $\beta=1$	FIFO	28,2 %	51,5 %	74,9 %	43,9 %	46,6 %	56,9 %	50,3 %
	KOZ	38,6 %	51,7 %	95,4 %	51,5 %	47,2 %	72,8 %	58,7 %
	LOZ	27,1 %	51,5 %	59,5 %	41,3 %	46,9 %	48,0 %	46,2 %
	FLT	32,5 %	51,6 %	94,4 %	62,8 %	47,8 %	92,4 %	66,9 %
	Schlupf	29,8 %	51,7 %	91,6 %	61,0 %	47,9 %	89,1 %	65,2 %
Szenario 2: ACS- CTRL mit $\alpha=1$ , $\beta=0$	FIFO	5,5 %	45,5 %	7,5 %	6,4 %	44,9 %	4,9 %	18,9 %
	KOZ	34,0 %	49,1 %	79,4 %	33,6 %	44,5 %	49,1 %	45,1 %
	LOZ	25,0 %	44,6 %	62,3 %	26,1 %	44,9 %	35,7 %	36,9 %
	FLT	19,7 %	47,7 %	48,6 %	34,8 %	44,4 %	55,1 %	44,3 %
	Schlupf	19,7 %	47,6 %	50,3 %	35,6 %	44,3 %	53,9 %	44,2 %
Szenario 3: ACS- CTRL mit $\alpha=1$ , $\beta=5$	FIFO	27,8 %	51,7 %	74,8 %	46,1 %	46,4 %	61,4 %	52,2 %
	KOZ	37,4 %	51,9 %	95,3 %	53,5 %	46,9 %	74,0 %	59,5 %
	LOZ	27,0 %	51,6 %	60,5 %	43,2 %	46,7 %	50,8 %	47,6 %
	FLT	32,2 %	51,8 %	94,2 %	64,3 %	47,6 %	92,9 %	67,5 %
	Schlupf	29,7 %	51,8 %	91,7 %	62,0 %	47,5 %	91,3 %	66,1 %
Legende:	FIFO	Prioritätsregel "First-in-first-out"						
	FLT	Prioritätsregel "Frühester Liefertermin"						
	GZG	Gesamtzielerreichungsgrad						
	KOZ	Prioritätsregel "Kürzeste Operationszeit"						
	LOZ	Prioritätsregel "Längste Operationszeit"						
	Schlupf	Prioritätsregel "Kleinste Schlupfzeit"						
	ZDZ	Zielerreichungsgrad Durchlaufzeit						
	ZPZ	Zielerreichungsgrad Prozesskosten						
	ZTT	Zielerreichungsgrad Termintreue						

Tabelle 2: Durchschnittliche Zielerreichung bei jeweils 20 Simulationsläufen

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fertigungssteuerung ist eine hoch komplexe Aufgabe und stellt hohe Anforderungen an den Fertigungsbetrieb. Vor diesem Hintergrund wurde am ifab das Verfahren *AntControl* zur Fertigungssteuerung entwickelt und in das am ifab entwickelte Simulationsverfahren *OSim* integriert, wodurch das Simulationsverfahren *OSim-Ant* entstand. Eine erste Simulationsstudie mit einer exemplarischen Konfiguration der Anpassungsparameter zeigte, dass das Steuerungsverfahren prinzipiell bessere Ergebnisse als Prioritätsregeln erzielen kann.

Es ist davon auszugehen, dass eine gezielte Konfiguration der Anpassungsparameter die Ergebnisse noch weiter verbessern kann. Als nächster Schritt wird daher eine systematische Simulationsuntersuchung im Hinblick auf die Wirkungszusammenhänge der Anpassungsparameter von *AntControl* durchgeführt, um allgemeine Handlungsrichtlinien für den Einsatz von *AntControl* in der Praxis abzuleiten.

## Literatur

- BRÜCKNER, Sven: Return from the Ant - Synthetic Ecosystems for Manufacturing Control. Berlin, Humboldt-Universität Dissertation. 2000.
- DEEN, S. M. (Hrsg.): Agent-based manufacturing: advances in the holonic approach. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag, 2003.
- DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas: Ant colony optimization. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- FISCHER, Jörg; STOWASSER, Sascha: Fertigungssteuerung nach dem Prinzip der Ant Colony Optimization. In: PPS Management, Berlin, 8(2003)4, S. 65-67.
- JONSSON, Uwe: Ein integriertes Objektmodell zur durchlaufplanorientierten Simulation von Produktionssystemen. Aachen: Shaker Verlag, 2000.
- KRESKEN, T.; BAUMANN, M.: Selbst ist der Auftrag: Selbstorganisierende Verfahren zur Produktionssteuerung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, München, 101(2006)5, S. 269-272.
- ONWUBOLU, Godfrey C.: Emerging optimization techniques in production planning and control. London: Imperial College Press, 2002.
- ONWUBOLU, Godfrey C.; BABU, B. V.: New optimization techniques in engineering. Berlin, Heidelberg u.a.: Springer-Verlag, 2004.
- SCHOLZ-REITER, B.; PHILIPP, T.; DE BEER, C. u.a.: Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen. In: Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung. Hrsg.: PFOHL, H.-Ch.; WIMMER, Th. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2006, S. 11-25.
- SMITH, Stephen: Is Scheduling a Solved Problem? In: The Next Ten Years of Scheduling Research. Hrsg.: COWLING, Peter; KENDALL, Graham. San Francisco, CA, USA: 2003, S. 116-120.
- ZÜLCH, Gert; STOCK, Patricia: Holonische Fertigungssysteme - Selbstorganisierende Fertigungssteuerung mit Ameisen-Algorithmen. In: Prozessorientiertes Gestalten und Lenken von Flüssen. Hrsg.: BIEDERMANN, Hubert; ENGELHARDT-NOWITZKI, Corinna; BÄCK, Sabine. München: LogBuch, 2006, S. 167-180.
- ZÜLCH, Gert; STOCK, Patricia: Selbstorganisierende Fertigungssteuerung auf Basis der Ant-Colony-Systeme. In: Industrie Management, Berlin, 23(2007)5, S. 67-70.