

Produktionsplanung zwischen Autonomie und Regulation

René Schumann, Andreas D. Lattner, Ingo J. Timm

Johann Wolfgang Goethe-Universität
Institut für Informatik, FB 12
Wirtschaftsinformatik & Simulation (IS)
Postfach 11 19 32, D-60054 Frankfurt am Main, Deutschland

Abstract

Zentralen Steuerungsansätzen wird für die mittlere Zukunft prognostiziert, dass sie bald nicht mehr in der Lage sind, die an sie gestellten Aufgaben zu bewältigen, und in einer Zeit von Ambient Intelligence und RFID auch nicht mehr problemadäquat sind [KHL+06]. Dagegen sind rein dezentrale Steuerungsparadigmen, die nur lokalen Zielfunktionen optimieren, oft nicht in der Lage qualitativ akzeptable Lösungen zu liefern [TH06, SS07]. Es ist also in der Zukunft von Systemen auszugehen, die sowohl zentrale als auch dezentrale Aspekte beinhalten werden. Daraus resultiert eine Forschungsfrage für die Gestaltung zukünftiger Steuerungssysteme für Produktion und Logistik. Wie kann das Verhältnis zwischen lokaler Autonomie und zentraler Steuerung gestaltet werden, um die positiven Aspekte beider Paradigmen zu erreichen. In den hier vorgestellten Fallstudien wird diese Fragestellung für die Steuerung von Produktionsanlagen an einem einfachen Beispiel untersucht. Das Ziel der Studie liegt dabei auf der Gewährleistung weitgehender Autonomie dezentraler Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Akzeptanzkriterien globaler Zielfunktionen.

Keywords: Produktionssteuerung, Multiagentensimulation, Autonomieregulation

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist ein Trend hin zu dezentralen Ansätzen bei Systemen zur Entscheidungsunterstützung und –durchführung zu erkennen. Motiviert ist dies durch die Notwendigkeit von flexibleren und zuverlässigeren Systemen bei komplexen Problemstellungen. Die höhere Flexibilität bei dezentralen Ansätzen führt jedoch zu einer größeren Komplexität bzgl. der Koordination der verschiedenen Subsysteme. Zentralen Steuerungsansätzen wird für die mittlere Zukunft prognostiziert, dass sie bald nicht mehr in der Lage sind, die an sie gestellten Aufgaben zu bewältigen, und in einer Zeit von Ambient Intelligence und RFID auch nicht mehr problemadäquat

sind [KHL+06]. Neben der mangelnden Flexibilität und Ausfallsicherheit werden zentrale Ansätze heutzutage oft schon aus organisatorischen Gründen nicht gewünscht. Dagegen sind rein dezentrale Steuerungsparadigmen, die nur lokalen Zielfunktionen optimieren, oft nicht in der Lage qualitativ akzeptable Lösungen zu liefern [TH06, SS07]. Wenn jedes Subsystem nur in Hinblick auf die eigenen Ziele seine Entscheidungen optimiert, kann dies zu einer schlechten Performanz auf der globalen Ebene des Systems führen.

Es ist also in der Zukunft von Systemen auszugehen, die sowohl zentrale als auch dezentrale Aspekte beinhalten werden. Daraus resultiert eine Forschungsfrage für die Gestaltung zukünftiger Steuerungssysteme für Produktion und Logistik. Wie kann das Verhältnis zwischen lokaler Autonomie und zentraler Steuerung gestaltet werden, um die positiven Aspekte beider Paradigmen zu erreichen.

Die Extrema – eine rein zentrale oder dezentrale Kontrolle – stellen beide keine zufriedenstellende Lösung dar. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, eine Strategie zu realisieren, die für eine akzeptable Gesamtperformanz sorgt und gleichzeitig den lokalen Einheiten soviel Entscheidungsfreiheit wie möglich lässt. Je nach Situation soll durch diese Strategie eine Balance zwischen Autonomie und Regulation erfolgen, d.h. die Autonomie der lokalen Einheiten wird der aktuellen Situation angepasst.

In der von uns vorgestellten Fallstudie wird diese Fragestellung für die Steuerung von Produktionsanlagen an einem einfachen Beispiel untersucht. Das Ziel der Studie liegt dabei auf der Gewährleistung weitgehender Autonomie dezentraler Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Akzeptanzkriterien globaler Zielfunktionen. Hierzu wird ein Job-Shop-Scheduling-Problem aus der Literatur verwendet, da diese Problemklasse weitgehend verstanden ist, und somit die Untersuchung auf obig skizzierte Fragestellung fokussiert werden kann. Auf Basis einer Multi-Agenten Simulation wird eine Reihe von Fallstudien durchgeführt, die sowohl die Auswirkungen von zentral als auch dezentral gesteuerten Produktionssteuerungen untersuchen, sowie ein Verfahren für die Einhaltung globaler Zielkriterien unter weitgehender lokaler Autonomie vorgestellt und bewertet.

Die Grundidee des Verfahrens basiert auf der Etablierung eines Regelkreises zwischen Agenten, die die Bearbeitungsstationen repräsentieren und einem Agenten, der etwa in der Funktion eines „Hallenmeisters“ die Einhaltung globaler Ziele überwacht. Dieser stellt auf Basis von Rückmeldung der Produktion den aktuellen Status der globalen Zielerreichung fest. Besteht die Gefahr, dass die globalen Ziele nicht eingehalten werden können, kann dieser Agent die anderen Agenten dazu anweisen, eine Strategie zu benutzen, die aus globaler Sicht am ehesten eine Zielerreichung gewährleisten

kann, unabhängig von der lokalen Zielfunktion. Dieser zentral kontrollierte Zustand kann zurückgenommen werden, wenn die Erreichung der globalen Ziele wieder realistisch erscheint.

Im folgenden Abschnitt werden verwandte Arbeiten aus dem Bereich Autonomie in Multiagentensystemen vorgestellt. Die grundlegende Theorie des strategischen Managements wird in Abschnitt 3 präsentiert. Die Abschnitte 4 und 5 beschreiben das genutzte Evaluationsszenario und die Auswertung der Simulationsstudien. Abschnitt 6 schließt den Beitrag mit einem Fazit.

2 Autonomie in Multiagentensystemen

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Sozionik“ ist der Aspekt der Autonomie interdisziplinär behandelt worden [NRW02]. Nach Weiß et al. ist Autonomie als „enabler for emerging information processing paradigms“ identifiziert worden, was zu einem generelleren Interesse bzgl. Autonomie als Softwareeigenschaft geführt hat [WFN+05]. In den folgenden beiden Unterabschnitten werden die Eigenschaften und Ebenen der Autonomie diskutiert.

2.1 Autonomieeigenschaften

Es gibt verschiedene Ansätze, Autonomie in der Verteilten Künstlichen Intelligenz (VKI) zu definieren. Von außen betrachtet kann ein System autonom erscheinen, wenn es sich nicht-deterministisch verhält, d.h. in zwei identischen Situationen unterschiedlich agiert. Das Erscheinen eines Indeterminismus kann jedoch auch durch eine limitierte Sicht auf die Situation begründet sein. Unter Berücksichtigung des internen Zustands könnte ein autonomes System auch deterministisch sein. Eine geeignetere Autonomiedefinition mag durch die Betrachtung von bestimmten Eigenschaften gegeben sein. Autonomie lässt sich durch die folgenden drei Eigenschaften beschreiben [Timm06]:

- **Proaktivität:** Die Verhaltensentscheidung eines Akteurs basiert nicht nur auf festen Input-Output-Schemata, sondern der Akteur ist auch in der Lage, die Situation zu interpretieren und verschiedene Ziele und Aktionen pro-aktiv zu generieren. Voraussetzung hierfür ist die Fähigkeit über Ziele und die aktuelle Situation Schlussfolgerungen zu treffen, d.h., es wird eine explizite Repräsentation der Ziele und Umgebung benötigt.
- **Interaktion:** Das autonome System ist in der Lage, mit seiner Umwelt zu interagieren. Das beinhaltet die Wahrnehmung und Interaktion mit der Umwelt sowie die Kommunikation mit anderen autonomen Systemen. Jeder Akteur sollte durch sein Verhalten den individuellen Nutzen sowie den Nutzen des Gesamtsystems erhöhen. Die Infor-

mationen für den zweiten Fall lassen sich durch Interaktion mit den anderen Akteuren besorgen.

- **Emergenz:** Proaktivität und Interaktion müssen innerhalb eines autonomen Systems realisiert werden. Wenn unterschiedliche Subsysteme ein größeres gemeinsames System bilden, dann sollte das Gesamtsystem Eigenschaften besitzen, die durch die Interaktion der lokalen Subsysteme „emergieren“.

In der Literatur gibt es verschiedene Sichten auf Emergenz: Axelrod [Axel97] beschreibt emergente Eigenschaften als Konsequenz simpler Formen der Interaktion. Ferber fokussiert auf den Organisationsaspekt in Multiagentensystemen („emergent organization“, [Ferb99]) und Wooldridge diskutiert Emergenz zum Ermöglichen von intelligentem Verhalten [Wool99]. Eine genauere Betrachtung dieser drei Aspekte zeigt die Notwendigkeit der Interaktion, um globale Strukturen durch lokale Interaktion, dynamische Organisation durch einfache Kommunikationsregeln und intelligentes Verhalten zu erreichen.

2.2 Autonomieebenen

In der Literatur sind verschiedene Diskussionen bzgl. unterschiedlicher Autonomieebenen zu finden etwa bei [FC00, RW05]. Castelfranchi und Conte [CC92] behandeln eine sehr hohe Autonomieebene, wobei etwa der Einfluss von vordefinierten Normen, Verhaltensmustern oder Prozeduren irrelevant oder relativ gering im Rahmen der Verhaltensentscheidung eines Agenten ist. Trotzdem ist Autonomie eine Eigenschaft, die zu teilweise ungewünschten Systemzuständen führen kann, die sich aus Konflikten oder inkonsistenten Zielen ergeben. Die komplexen Abhängigkeiten und die Dynamik von autonomen Subsystemen können zu Systemen führen, deren Organisation zur Laufzeit emergiert. Für Softwareingenieure ist es daher oft schwierig wenn nicht unmöglich, alle möglichen Konstellationen der autonomen Subsysteme beim Entwurf zu berücksichtigen.

Autonomieebene	Beobachtung	Deterministisch	Episodisch	Statisch	Agenten
Starke Regulation	Total	Deterministisch	Episodisch	Statisch	Single
Operationale Autonomie	Partiell	Deterministisch	Episodisch	Statisch	Multi
Taktische Autonomie	Partiell	Stochastisch	Episodisch	Semi	Multi
Strategische Autonomie	Partiell	Stochastisch	Sequentiell	Dynamisch	Multi

Tabelle 1: Autonomieebenen und Umgebungseigenschaften

Stark regulierte Systeme sind komplett ohne Autonomiefähigkeiten und gehören somit der Klasse von Systemen an, die im „traditionellen“ Softwareengineering betrachtet werden. Jede Entscheidung (auf allen Ebenen) in diesen Systemen ist vordefiniert oder durch eine andere Entität fremdbestimmt. Ein Beispiel sind konventionelle, monolithische Systeme. Sie haben sich in Umgebungen bewährt, die von eingeschränkter Komplexität bei voller Beobachtbarkeit und deterministischen, episodischen Umgebungen ohne andere autonome Systeme charakterisiert sind.

Der erste Schritt zur erhöhten Autonomie erfolgt auf der operationalen Entscheidungsebene. Hier bekommt das autonome System die Kompetenz übertragen, auf operativer Ebene Entscheidungen selbst zu fällen, wobei immer noch der taktische und strategische Rahmen vorgegeben ist. Bei BDI-Ansätzen (Beliefs-Desires-Intentions) bedeutet operationale Autonomie, dass keine Flexibilität bzgl. der Selektion der „Desires“ und „Intentions“ gegeben ist. Der Akteur hat trotzdem die Möglichkeit, Pläne zu reflektieren oder zu verfeinern. Ein Ansatz bzgl. operativer Autonomie ist in [Timm04] beschrieben. Softwaresysteme, die operationale Autonomie besitzen, sind effektiv in Umgebungen, die partiell beobachtbar, deterministisch, episodisch und statisch sind. Der Vorteil durch die Autonomie auf dieser Ebene ist, dass schnell auf (episodische) Störungen reagiert werden kann. Dies gilt jedoch nur für einen kurzfristigen Zeithorizont; mittelfristige und langfristige Ziele werden nicht berücksichtigt.

Taktische Autonomie erweitert die operationale Autonomie, so dass eine Deliberation über verschiedene Alternativen operativen Verhaltens durchgeführt werden kann. Während bei operativer Autonomie Pläne betrachtet werden (z.B. die Linearisierung partieller Pläne) betrifft taktische Autonomie die Ebene der Ziele und Intentionen. Bei BDI-Agenten ist auf dieser Autonomieebene somit das Erzeugen von Zielen anhand der „Desires“ des Agenten möglich. Ein Ansatz zum Erreichen von taktischer Autonomie ist in [TW03] präsentiert. Softwaresysteme, die taktische Autonomie besitzen, sind auch für stochastische, semi-dynamische Umgebungen geeignet (zusätzlich zu denen bei operativer Autonomie).

Der höchste Grad der Autonomie ist die strategische Autonomie. Normalerweise ist diese Entscheidungsebene durch den Systemdesigner oder externe Einflüsse festgelegt. In konventionellen BDI-Ansätzen ist strategische Autonomie beim Agenten selbst nicht vorgesehen, da die „Desires“ statisch festgelegt sind. Die Auswahl der „Desires“ erfolgt durch eine Erreichbarkeitsrelation, d.h. die „Beliefs“ des Agenten werden dafür genutzt, um die vom aktuellen Zustand erreichbaren „Desires“ zu wählen. Timm [Timm06] führt einen Ansatz für strategische Autonomie als Erweiterung des konventionellen BDI-Ansatzes ein. Hierbei erhalten Akteure die Möglichkeit, dyna-

misch Abhängigkeiten zwischen „Desires“ und „Intentions“ auf Basis des aktuellen Zustands zu berechnen.

3 Strategisches Management von Multiagentensystemen

Multiagentensysteme bestehen aus autonomen Agenten, die auf einer lokalen (Mikro-) Ebene interagieren. Optimierungen auf der Mikroebene können zu optimalen lokalen Situationen führen, aber durch die Interaktion emergiert nicht zwingenderweise auch optimales Verhalten auf der Makroebene. Trotzdem ist ein wesentlicher Mehrwert von Multiagentensystemen die Entstehung positiven Verhaltens auf Systemebene (vgl. [Timm06]). In den Sozialwissenschaften wird das Phänomen der Interaktion zwischen Mikro- und Makroebene bereits intensiv erforscht (z.B. [Bohm93]). Normen und Regularien werden in Sozialsysteme eingeführt, um eine bessere Systemperformance zu erreichen.

Der hier präsentierte Beitrag basiert auf Forschungsarbeiten von Timm und Hillebrandt, die sich mit dem strategischen Management von Multiagentensystemen beschäftigen [TH06]. Die Grundannahme ist, dass Ziele des globalen Systems bekannt sind und das Situationen danach bewertet werden können, inwieweit die Zielsetzung erreicht ist. Auf diese Weise kann das System explizit über die eigene Performanz reflektieren. Es wird hierbei zwischen drei Farbcodes unterschieden: Zielsetzung komplett erreicht („grün“), Zielsetzung knapp verfehlt („gelb“) und Zielsetzung verfehlt („rot“). Eine weitere Grundannahme für die Reflexion ist, dass eine Lösung mittels eines Multiagentensystems bewusst gewählt wurde und die Autonomie der einzelnen Einheiten somit kein Seiteneffekt sondern eine gewünschte Eigenschaft darstellt.

Timm und Hillebrandt schlagen einen Prozess mit vier verschiedenen Phasen für das strategische Management vor. Die verschiedenen Phasen (Abbildung 1) – Beobachtung, Analyse, Empfehlung und Institutionalisierung – sind angelehnt an soziale Mechanismen der Reflexion wie sie in Luhmanns genereller Theorie sozialer Systeme beschrieben sind [Luhm84].

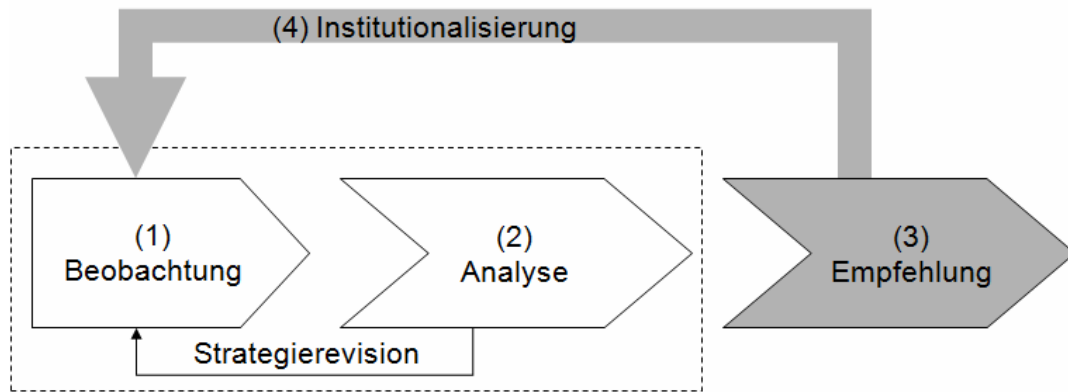


Abbildung 1: Phasen des strategischen Managements

Der Ansatz basiert auf einem Multiagentensystem mit operationaler, taktischer und strategischer Autonomie. Die Gruppe der Agenten kann entweder dynamisch zur Laufzeit oder bereits während des Systemdesigns festgelegt werden. Es wird angenommen, dass die Agenten eine gemeinsame Zielsetzung haben und dass jeder Agent die Erfüllung dieser Zielsetzung messen kann. Für die einzelnen Ziele lässt sich der Erfüllungsgrad auf einer Skala zwischen 0 und 1 festlegen, wobei 0 für „überhaupt nicht erfüllt“ und 1 für „komplett erfüllt“ steht. Eine weitere Annahme ist, dass das Betrachten der globalen Ziele in jedem Deliberationsschritt aufgrund von Zeit- oder Speicherbeschränkungen nicht möglich bzw. inadäquat wäre.

In der Beobachtungsphase berichtet jeder Agent seine Performanz an eine zentrale Einheit (Gruppenkoordinator). Auf dieser Basis wird die Gesamtleistung des Systems aufgrund der einzelnen Ergebnisse bestimmt und der gesamten Gruppe zur Verfügung gestellt. Wenn die Zielerfüllung als mangelhaft angesehen wird, sollten die Agenten ihre operationale Autonomie anpassen. Beim Generieren der nächsten Aktionssequenz sollten die globalen Ziele berücksichtigt werden. Wenn beispielsweise ein BDI-Agent eine Intention gewählt hat und ein zugehöriger partieller Plan vorliegt, so sollte die Linearisierung gewählt werden, die am besten für die Erfüllung der globalen Zielsetzung geeignet ist.

Wenn die Systemleistung bzgl. eines bestimmten Ziels kritisch ist (oder über längere Zeit nicht komplett erfüllt wird, Code „gelb“), wechselt der Systemzustand in die Analysephase. In dieser Phase müssen die Agenten ihre aktuell verfolgten Ziele kommunizieren. Die Analyse wird dann kooperativ durch die Agenten oder durch den Gruppenkoordinator durchgeführt. Es werden die Abhängigkeiten zwischen den selektierten Zielen der einzelnen Agenten und der verfehlten Systemleistung hergestellt und veröffentlicht. Die taktische Autonomie muss hierbei von den Agenten angepasst werden, z.B. bei der Zuordnung der Pläne zu Intentionen, so dass die Gruppenleistung berücksichtigt wird.

Es gibt Situationen, bei denen das unkoordinierte Behandeln einer Zielverfehlung durch individuelle Anpassungen nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt. Dies kann insbesondere dann passieren, wenn mehrere Agenten ihr Verhalten auf sehr ähnliche Weise anpassen, so dass einzelne Ziele „übererfüllt“ sind, während andere vernachlässigt werden. In solchen Fällen müssen die beteiligten Akteure gemeinsam eine Lösung erarbeiten. Dabei kann der Gruppenkoordinator als Mediator für die Verhandlungen zwischen den einzelnen Akteuren dienen. Ergebnis dieser Phase soll sein, dass die strategische Autonomie sich in dem Sinne verbessert, dass Akteure die Ziele instanzieren, die sich positiv auf die Systemperformanz auswirken.

In der Institutionalisierungsphase wird die ausgehandelte Lösung generalisiert und als Sozialregel für spätere Nutzung im System abgelegt. Somit werden die Ergebnisse der dritten Phase gesichert, um Berechnungskosten in ähnlichen Situationen zu vermeiden. Weitere Informationen zu dem Ansatz können [TH06] entnommen werden.

Die in diesem Artikel präsentierte Fallstudie beschränkt sich auf die ersten beiden Phasen. Die Grundidee ist, den einzelnen Einheiten so viel Autonomie wie möglich zu lassen. Im Normalfall kann jede Einheit selbst ihr Verhalten bestimmen. Wenn jedoch die Systemperformanz einen kritischen Zustand erreicht, werden die einzelnen Einheiten durch den Gruppenkoordinator aufgefordert, das Verhalten so anzupassen, dass die Systemperformanz verbessert wird.

4 Szenario

Basierend auf vorherigen Untersuchungen [SS07] nutzen wir ein Szenario aus der Produktion, einem Job Shop Scheduling Problem. Es ist ein sehr einfaches Szenario, so dass die beobachteten Effekte gut isoliert werden können.

4.1 Ablaufplanungsproblem

In der Literatur wurde eine Vielzahl von Ablaufplanungsproblemen vorgestellt und diskutiert. Wir nutzen im folgenden ein Szenario, das von Cavaliere et al. [CBM+99] präsentiert wurde und ebenfalls von Brennan und O [BO00] genutzt wurde. Das Layout der Produktion ist in Abbildung 2 dargestellt. Jede Bearbeitungsstation, in Abbildung 2 als Shop bezeichnet, bietet genau eine Operation an, die sie durchführen kann. Für jede Operation existieren also zwei alternative Bearbeitungsstationen. Jede Bearbeitungsstation hat einen Eingangs- und einen Ausgangspuffer. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass alle Buffer ausreichend groß sind, immer

Transportkapazität zur Verfügung steht und der Transport keine Zeit benötigt.

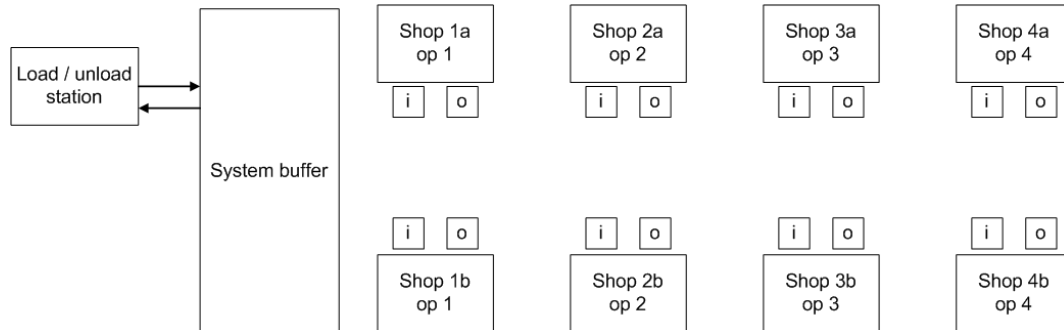


Abbildung 2: Produktionslayout nach [CBM+99]

Die Produktionsbeschreibungen wurden von Brennan und O [BO00] übernommen und sind in Tabelle 2 dargestellt.

Schritt/ Produkt	1	2	3	4
J1	6/1	8/2	13/3	5/4
J2	4/1	3/2	8/3	3/4
J3	3/4	6/2	15/1	4/3
J4	5/2	6/1	13/3	4/4
J5	5/1	3/2	8/4	4/3

Tabelle 2: Produktionsbeschreibung nach [BO00]

Ein Eintrag gibt dabei die Dauer des Produktionsschritts und die benötigte Operation an. So codiert etwa die Produktionsvorschrift J1, dass die Operationen in der Reihenfolge 1, 2, 4 und 3 durchlaufen werden müssen und dabei mindestens die Zeit von 20 Zeiteinheiten benötigt wird. Durch den Aufbau der Produktionsvorschriften wird deutlich, dass die Bearbeitungsstationen 3a und 3b Engpassressourcen darstellen.

4.2 Produktionssteuerungsstrategien

Für die Steuerung der Bearbeitungsstationen gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Steuerungsstrategien. In der hier vorgestellten Untersuchung werden nur einige klassische Strategien betrachtet. Die genutzten Strategien sind in Tabelle 3 aufgeführt und werden in [Pine95] detailliert vorgestellt.

Diese Strategien wurden ausgewählt, da sie alle relativ wenig Informationen der Aufträge benötigen, bzw. mit den Informationen, die auch in der Literatur zur Verfügung gestellt werden, auskommen. Die einzige Ausnahme

hiervon ist die WSPT Strategie, die die Priorität eines Auftrages kennen muss. Hierzu wird jedem Auftrag initial eine Priorität zugewiesen, die als Wert aus dem Intervall $[0,1]$ codiert ist. Dabei ist ein hoher Wert gleichbedeutend mit einer hohen Priorität. Die Prioritätswerte werden gleichverteilt den Aufträgen zugewiesen.

Strategie Code	Beschreibung
SIRO	Service in random order
FIFO	First in first out
SPT	Shortest processing time first
LPT	Longest processing time first
WSPT	Weighted shortest processing time first

Tabelle 3: Kontrollstrategien für Bearbeitungsstationen

Für die Wahl der nächsten Bearbeitungsstation aus Sicht der einzelnen Aufträge können ebenfalls Strategien definiert werden, etwa die nach der kürzesten Warteschlange (shortest queue, SQ) oder auch eine Zufallsstrategie (SIRO). In unseren bisherigen Untersuchungen [SS07] konnten wir allerdings zeigen, dass diese Auswahlmöglichkeit in dem hier vorgestellten Szenario nur von untergeordneter Bedeutung ist. Da im Folgenden die Auswirkungen einer regulierten Autonomie der Bearbeitungsstationen untersucht werden soll, wird für im Folgenden die Auswahlstrategie der einzelnen Aufträge für die nächste Bearbeitungsstation nach der Strategie „kürzeste Warteschlange“ (SQ) durchgeführt.

4.3 Produktionsläufe und Performanzmessung

Da in den bisherigen Untersuchungen noch nicht die Reaktionsfähigkeit auf potentiell störende Ereignisse untersucht werden soll, wird davon ausgegangen, dass alle Produktionsschritte in geplanter Zeit abgeschlossen werden.

Es wird angenommen, dass die Bearbeitungsstationen eine für ihre lokale Zielerreichung optimale Kontrollstrategie wählen. Für die globale Performanzmessung wird auf die mittlere Durchlaufzeit der Aufträge genutzt. Die mittlere Durchlaufzeit ist die Zeit vom Beginn der ersten Operation des Auftrages bis zum Abschluss der letzten Operation. Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass nicht alle in Abschnitt 4.2 vorgestellten Strategien dieses Kriterium optimieren. Somit ist es möglich, dass die Performanz bei dezentraler Steuerung hinter einer zentral gesteuerten Produktion bleiben

kann. Allerdings würden dann die lokalen Zielsetzungen nur in geringerem Umfang erfüllt. In der hier vorgestellten Untersuchung ist allerdings nicht das Finden von optimalen Ergebnissen von zentraler Bedeutung sondern die Auswirkungen von dezentraler Steuerung und die Möglichkeiten der Regulation der lokalen Autonomie.

4.4 Regulierungsstrategie

Die einzelnen Bearbeitungsstationen und auch jeder Auftrag werden durch einen Agenten repräsentiert. Weiterhin gibt es einen überwachenden Agenten, der etwa die Funktion eines „Hallenmeisters“ innehat und im Folgenden kurz Manager-Agent genannt wird. Wird ein Auftrag abgeschlossen, d.h. die letzte notwendige Operation wird beendet, informiert der jeweilige Auftragsagent den Manager-Agenten über seine Fertigstellung und seine Durchlaufzeit. Der Manager-Agent kann somit die Entwicklung der mittleren Durchlaufzeit überwachen. Fällt die bis dahin ermittelte mittlere Durchlaufzeit unter einen spezifizierten Wert ordnet der Manager-Agent den Bearbeitungsstationen die Verwendung einer für dieses Zielkriterium besonders geeigneten Kontrollstrategie an. Dabei handelt es sich um die SPT Strategie. Wenn die mittlere Durchlaufzeit wieder ein akzeptables Niveau erreicht, erlaubt der Manager-Agent den Bearbeitungsstationen ihre lokal optimalen Strategien wieder zu benutzen.

4.5 Implementierungsdetails

Für die Simulationsstudien wurde ein Multiagenten System auf Basis des Java Agenten Frameworks JADE¹ entwickelt. Das System ermöglicht die Durchführung von zeitgetriebenen Simulationen um die Effekte von dezentralen Kontrollstrategien zu evaluieren. Das System besteht aus drei unterschiedlichen Agententypen.

- Der Manager-Agent weist initial den Bearbeitungsstationen eine zufällig ausgewählte Strategie zu, überwacht die Ausführung und kann ggf. regulativ eingreifen, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben.
- Der Auftragsagent repräsentiert einen einzelnen Auftrag. Nachdem der Auftrag sich in der Produktion befindet, ist der Job-Agent für die Auswahl der nächsten Bearbeitungsstation verantwortlich.
- Der Agent, der eine Bearbeitungsstation repräsentiert, ist für die Auswahl des nächsten zu bearbeitenden Auftrags verantwortlich. Hierfür wird eine Kontrollstrategie (siehe Abschnitt 4.2) verwendet.

¹ <http://jade.tilab.com>

5 Evaluation

Alle Tests basieren auf einer identischen Startsituation. Es werden jeweils 100 Aufträge (20 von jedem Typ) gleichzeitig zum Zeitpunkt 0 gestartet. Die Produktionsanlage ist zu diesem Zeitpunkt ansonsten leer. Alle hier präsentierten Ergebnisse basieren auf zehn Testläufen, deren Ergebnisse gemittelt wurden.

Um eine Vergleichsdatenbasis zu besitzen, haben wir zuerst allen Shops die gleichen Strategie zugewiesen. Da dann alle Shops mit der gleichen Strategie arbeiten, werden Ergebnisse berechnet, die vergleichbar sind mit bisherigen Untersuchungen wo eine Strategie für die ganze Halle angewendet wurde. Dies wurde für alle oben vorgestellten Strategien durchgeführt. Die Entwicklung der mittleren Durchlaufzeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

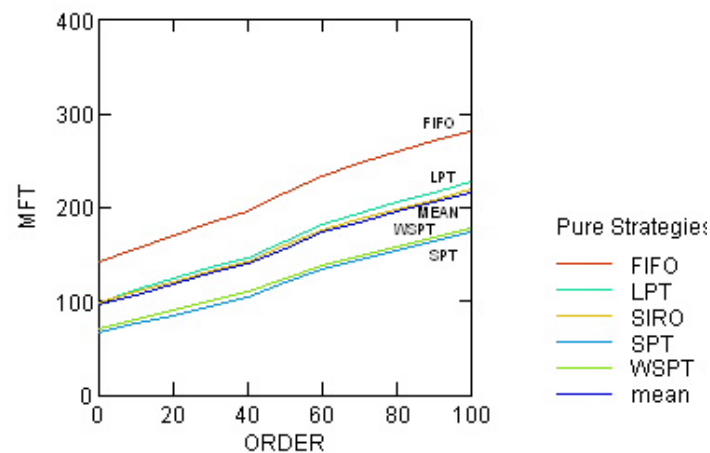


Abbildung 3: Mittlere Durchlaufzeit während der Ausführung

Wie zu erwarten, sind mit der Shortest Processing Time First Regel die besten Ergebnisse zu erreichen. Aus unserer Sicht überraschend war das so deutlich schlechte Abschneiden der first-in first-out Strategie, die eigentlich eine sehr häufig genutzte Strategie ist. Diese Beobachtungen bestätigen die Ergebnisse, die bereits in [SS07] beschrieben wurden.

Für das oben beschriebene Steuerungsverfahren wird ein Schwellwert für jede Anzahl fertiger Aufträge benötigt, bei dessen Überschreitung auf eine zentrale Steuerung umgeschaltet wird. Diese Schwellwerte wurden als Mittelwert der einzelnen „reinen“ Strategien bestimmt. Dieser Mittelwert, der ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt ist, dient somit als Grenzwert um eine akzeptable Gesamtsystemperformanz zu bestimmen. Steigt bei einem Testlauf mit heterogenen Strategien die Gesamtsystemperformanz über den Schwellwert, ordnet der Manager-Agent an, dass alle Shops die SPT Strategie anwenden sollen, unabhängig von ihrer vorherigen Strategie. Sinkt die mittlere

Durchlaufzeit wieder unter den Schwellwert, so teilt der Manager-Agent den anderen Agenten mit, dass sie wieder ihre eigentliche Strategie verfolgen können.

In den folgenden Experimenten wurde den Shops initial eine zufällige Strategie aus der Menge der oben beschriebenen Strategien zugewiesen. Dabei wurden Testläufe mit und ohne Autonomiekontrolle durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse dieser Experimente.

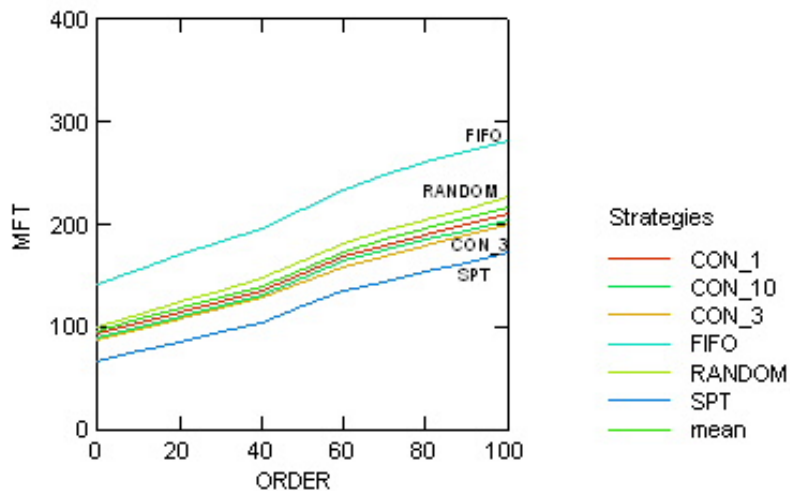


Abbildung 4: Mittlere Durchlaufzeit der kontrollierten Strategien

Zur Einordnung der Ergebnisse wurden in Abbildung 4 die Kurven der Strategien FIFO, SPT und mean (dem Schwellwert) mit eingezeichnet. Die Randomkurve stellt die Ergebnisse bei zufälliger Verteilung der Strategien ohne Autonomiekontrolle dar. Ebenfalls wurde untersucht, welche Auswirkungen die Länge der Regelstrecke für die lokale Autonomie hat. Dabei wird nach dem Abschluss von 10, 3 und 1. Auftrag jeweils überprüft, ob die Systemperformanz im akzeptablen Rahmen liegt. Die Ergebnisse sind in den Kurven CON1, CON3 und CON10 zu sehen. Diese Strategien beinhalten die Reflexion über den aktuellen Zielerreichungsgrad. Von Bedeutung für die Lösungsqualität ist neben der mittleren Durchlaufzeit auch die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Testläufe. Dies gibt einen Hinweis auf die Stabilität der Lösungen. Dies wurde bereits in [SS07] als besonders relevant für die Beurteilung von Koordinationsstrategien von dezentral entscheidenden Einheiten identifiziert. In

Abbildung 5 ist der Mittelwert und die statistische Streuung der Ergebnisse der „reinen“ Strategien und der Strategien mit Reflexionsmechanismus dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Strategien mit Reflexion durchaus in der Lage sind, die statistische Streuung zu begrenzen, und somit die Lösungsgüte auch eine Stabilität besitzt.

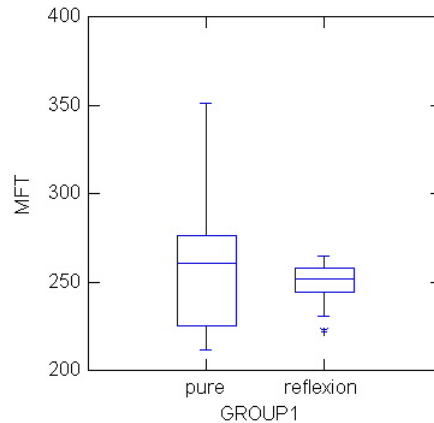


Abbildung 5: Box Whistler Diagramme für "reine " und kontrollierende Strategien

In folgenden werden die Eigenschaften der reflektierenden Strategien weiter untersucht und mit anderen Strategien verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

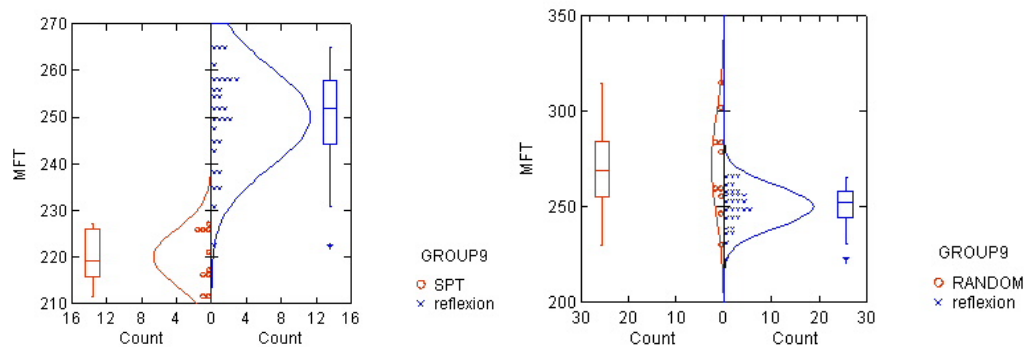


Abbildung 6: T-Tests für SPT/Reflexion und Reflexion/Random

Im Vergleich zur SPT Strategie zeigen sich die Ergebnisse als hochsignifikant ($p < 0.001$). Die SPT Strategie als beste bekannte Strategie für das Problem zeigt sich sowohl in Stabilität als auch Qualität überlegen. Die Reflexionsstrategien sind knapp 14% schlechter. Die Qualität der Reflexionsstrategien wird dagegen deutlich im Vergleich zu der rein zufälligen Zuordnung von Strategien zu Shops ohne Autonomiekontrolle. Es ist deutlich zu sehen, dass die statistische Streuung der Werte deutlich durch den Reflexionsmechanismus reduziert werden kann. Die Stabilität der Lösungen also deutlich verbessert werden kann. Ebenfalls kann die Güte der Lösungen in den hier betrachteten Experimenten verbessert werden.

Die letzten hier präsentierten Auswertungen sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Regelstrecken diskutieren. Bei der detaillierten Betrachtung der Strategien CON1, CON3 und CON10 konnten sowohl erwartete als auch unerwartete Beobachtungen gemacht werden. Als Ausgangshypothesen

wurde formuliert, dass bei kürzeren Regelstrecken eine bessere Gesamtperformanz erreicht werden kann und bei kürzeren Regelstrecken eine geringere Streuung der Ergebnisse zu erwarten ist.

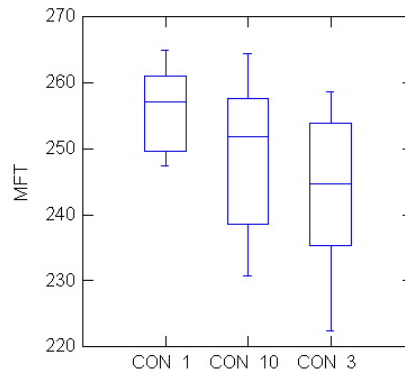


Abbildung 7: Box Whistler Diagramme für die reflektierten Strategien

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 zu sehen. Unsere Hypothesen können gestützt werden durch die Beobachtungen, dass die Streuung bei CON 1 deutlich kleiner ist als bei den beiden anderen Strategien. Die Reduzierung der mittleren Durchlaufzeit von CON10 zu CON3 ist ebenfalls konform mit unseren Hypothesen. Allerdings ist die mittlere Durchlaufzeit bei CON1 deutlich höher als bei CON3 und dass die Streuungen von CON3 und CON10 keinen signifikanten Unterschied aufweisen. Eine abschließende Aussage über die beiden obigen Hypothesen kann also noch nicht getroffen werden. Weitere Untersuchungen über die Parametrisierung einer regulierten Autonomie sind deswegen notwendig.

6 Fazit

In diesem Artikel wurde ein Ansatz für die Regulierung von autonomen Entscheidungseinheiten vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf Theorien des strategischen Managements und der Reflexion in sozialen Systemen. Die Adaption eines Mechanismus zur Reflexion auf ein Multiagentensystem wurde präsentiert. In einer Fallstudie wurde eine vereinfachte Untersuchung über die Auswirkungen derartiger regulativer Mechanismen auf die lokale Entscheidungsfindung untersucht. Dabei wurde eine Multiagenten Simulation eines Job Shop Scheduling als gut verstandenes System genutzt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sowohl die Güte des globalen Planes aber auch insbesondere seine Stabilität, d.h. die Streuung der Ergebnisse durch die Nutzung eines vereinfachten Reflexionsmechanismus verbessert werden konnte.

Neben einer verfeinerten Abbildung des strategischen Managements in die Fallstudie ergeben sich einige weitere relevante Forschungsaspekte, die in

weiteren Untersuchungen verfolgt werden könnten. Die Hypothesen über die Auswirkungen der Regelungsstrecke der Autonomie konnten in den hier vorgestellten Untersuchungen nicht abschließend beurteilt werden. Hierzu sind weitere Experimente und Untersuchungen nötig. Ebenfalls interessant ist die Fragestellung der „Kosten der zentralen Kontrolle“. Eine zentrale Annahme in unserer Arbeit ist es, dass die lokalen Strategien aus lokaler Sicht Optimal sind. Eine zentral vorgegebene Strategie, die für die Erreichung einer akzeptablen Gesamtperformanz notwendig ist, erzeugt somit lokal höhere Kosten. Allerdings ist nicht klar in welcher Höhe diese Kosten sind und wie dies in Relation zur Definition der akzeptablen Gesamtperformanz steht.

Literatur

- [Axel97] Axelrod, R. M.: *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton Studies in Complexity. Princeton University Press, Princeton, 1997.
- [Bohm93] Bohman, J.: *New Philosophy of Social Science – Problems of Indeterminacy*, chapter *The Macro-Micro Relation*. The MIT Press, Cambridge 1993, S. 146–185.
- [BO00] Brennan, R. W.; O, W.: *A simulation test-bed to evaluate multi-agent control of manufacturing systems*. In *Proceedings of the 32nd Conf. on Winter Simulation*, Orlando, Florida 2000, S. 1747-1756.
- [CC92] Castelfranchi, C.; Conte, R.: *Emergent functionality among intelligent systems: Cooperation within and without minds*. *Journal on Artificial Intelligence and Society*, 6 (1992):78–87.
- [CBM+99] Cavalieri, S.; Bongaerts, L.; Macchi, M.; Taisch, M.; Weyns, J.: *A Benchmark Framework for Manufacturing Control*. Paper presented at the *Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium 1999, S. 225-236.
- [FC00] Falcone, R.; Castelfranchi, C.: *Grounding autonomy adjustment on delegation and trust theory*. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 12(2000):149–151.
- [Ferb99] Ferber, J.: *Multi-Agent Systems - An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, Harlow, UK 1999.
- [HBK93] Hentze, J.; Brose, P.; Kammel, A.: *Unternehmensplanung*. Bern, 2. Edition 1993.

- [KHL+06] Kirn, S.; Herzog, O.; Lockemann, P.C.; Spaniol, O. (Eds.): Multiagent Engineering. Theory and Applications in Enterprises. Springer: Berlin 2006.
- [Kuep97] Küpper, H.-U. : Controlling - Konzepte, Aufgaben und Instrumente. 2. Edition 1997.
- [Luhm84] Luhmann, N.: Soziale Systeme, Grundrisse einer allgemeinen Theorie. Suhrkamp, Frankfurt 1984.
- [NRW02] Nickles, M.; Rovatsos, M.; Weiss, G.: A schema for specifying computational autonomy. In Proceedings of the Third International Workshop "Engineering Societies in the Agents World" (ESAW 2002), Madrid, Spanien 2002.
- [Pine95] Pinedo, M.: Scheduling: Theory, Algorithms and Systems: Prentice-Hall 1995.
- [RW05] Rovatsos, M.; Weiss, G.: Autonomous software. In Chang, S. K., editor, Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering, volume 3: Recent Advances, River Edge, New Jersey. World Scientific Publishing 2005.
- [RN03] Russell, S. J.; Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, second edition, 2003.
- [SS07] Schumann, R.; Sauer, J.: Implications and Consequences of Mass Customization on Manufacturing Control. In Proceedings of the 2007 Joint Conference Mass Customization Meeting, International Conference on Economic, Technical and Organisational Aspects of Production Configuration Systems, Hamburg, Juni, 2007, S. 365- 378.
- [Timm04] Timm, I. J.: Selbstlernprozesse in der Agentenkommunikation. In: Adaption und Lernen von und in Organisationen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2004, S. 103–127.
- [Timm06] Timm, I. J.: Strategic Management of Autonomous Software Systems. Technical Report. TZI-Bericht Nr. 35, Universität Bremen 2006.
- [TH06] Timm, I. J.; Hillebrandt, F.: Reflexion als sozialer Mechanismus zum strategischen Management autonomer Softwaresysteme. In: Reflexive soziale Mechanismen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2006.
- [TW03] Timm, I. J.; Woelk, P.-O.: Ontology-based capability management for distributed problem solving in the manufacturing domain. In

Schillo, M., editor, Multiagent System Technologies - Proc. of the First German Conf., MATES 2003, pp. 168–179, Berlin 2003.

- [WFN+05] Weiss, G.; Fischer, F.; Nickles, M.; Rovatsos, M.: Operational modeling of agent autonomy: theoretical aspects and a formal language. In Proceedings of the 6th International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering (AOSE), Utrecht, Niederlande 2005.
- [Wool99] Wooldridge, M.: Intelligent agents. In Weiss, G. (Eds): Multiagent systems- a modern approach to distributed artificial intelligence, MIT Press, 1999, S. 27–78.