

***Agent.Enterprise* -Integriertes Supply Chain Management mit hierarchisch vernetzten Multiagenten-Systemen**

Daniel Frey¹, Lars Mönch², Tim Stockheim³, Peer-Oliver Woelk⁴,
Roland Zimmermann⁵

¹ Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Universität Karlsruhe
D-76131 Karlsruhe
frey@ira.uka.de

² Institut für Wirtschaftsinformatik, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau
Lars.Moench@tu-ilmenau.de

³ Institut für Betriebswirtschaftslehre, insb. Wirtschaftsinformatik und Informationsmanagement, Universität Frankfurt, 60325 Frankfurt
stockheim@wiwi.uni-frankfurt.de

⁴ Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Universität Hannover
30159 Hannover
woelk@ifw.uni-hannover.de

⁵ Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik II, Universität Erlangen-Nürnberg
90403 Nürnberg
Roland.Zimmermann@wiso.uni-erlangen.de

Abstract: Multiagenten-Systeme (MAS) eröffnen neue Perspektiven für das Supply Chain Management (SCM) im Vergleich zu herkömmlichen, zentralistisch organisierten Systemarchitekturen. MAS und ihre inhärent dezentralisierten Strukturen erfüllen in besonderem Maße die Anforderungen, die aus dem Management weit verzweigter Lieferketten erwachsen. Herkömmliche SCM-Systeme hingegen sind häufig begrenzt hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens, der Reaktionsfähigkeit auf Störungen bei den beteiligten Zulieferern sowie der Handhabung hochindividueller, komplexer Produkte. Ein umfassender Ansatz, der auch die individuellen Bedürfnisse der beteiligten Partner hinsichtlich Fertigungsplanung und -steuerung berücksichtigt, ist somit meist nicht möglich. Dieser Beitrag stellt mit dem Agententechnologie-Testbed *Agent.Enterprise* eine MAS-Architektur vor, die verschiedene agentenbasierte Systeme über mehrere Ebenen der Supply Chain hinweg vernetzt. Die Entwicklung dieses Systems erfolgt im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1083 „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“.

1 Einleitung

Effektives Supply Chain Management ist ein Schlüsselfaktor für den Unternehmenserfolg. Da Unternehmen in Supply Chains (Original Equipment Manufacturer – OEM,

Komponenten- und Systemlieferanten) zunehmend in globalen Märkten mit zahlreichen Wettbewerbern agieren, steigen Komplexität sowie Dynamik der betrachteten Geschäftsprozesse und des Marktumfelds. Prozesse müssen daher effizient und flexibel gestaltet werden, um kurzfristig auf geänderte Kundenwünsche oder unvorhergesehene Ereignisse reagieren zu können. Ihre ganzheitliche Betrachtung und globale, insb. interorganisationale Optimierung erschließt neue Potentiale, bringt aber auch eine Reihe neuer Probleme mit sich. So können sich Nachfrageschwankungen in der Supply Chain aufschaukeln, die zu dem sogenannten „Bullwhip-Effekt“ führen. Außerdem besteht für die Unternehmen ein Interessenskonflikt zwischen der interorganisationale Optimierung einer Supply Chain einerseits und der Wahrung sensibler Informationen über interne Geschäftsprozesse (z.B. Produktionsabläufe) andererseits. Solange Zulieferer nicht durch die Marktmacht eines großen OEM (z.B. in der Automobilindustrie) dazu gedrängt werden der interorganisationale Optimierung den Vorzug zu geben, ist diese kaum zu realisieren. Somit stellt die Verknüpfung von inter- und intraorganisationellen Abläufen in der Fertigungsindustrie bei gleichzeitiger Wahrung individueller Interessen der Unternehmen eine besondere Herausforderung dar. Der Einsatz intelligenter Softwareagenten in MAS scheint in diesem Spannungsfeld besonders vielversprechend, da sie der Forderung nach Flexibilität, Kooperativität und gleichzeitig eigener Autonomie nachkommen.

Hier setzt das im Folgenden vorgestellte Agententechnologie-Testbed *Agent.Enterprise* an, in dem eine erfolgreiche Integration verschiedener Multiagenten-Systeme realisiert wird. Die Entwicklung dieses Agententechnologie-Testbed erfolgt im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1083 „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“. Technische Details enthält der vorangehende Beitrag [Kr03]; weiterführende Informationen sind über die Kooperationsplattform RealAgentS (<http://www.realagents.org>) des Schwerpunktprogramms verfügbar [An03].

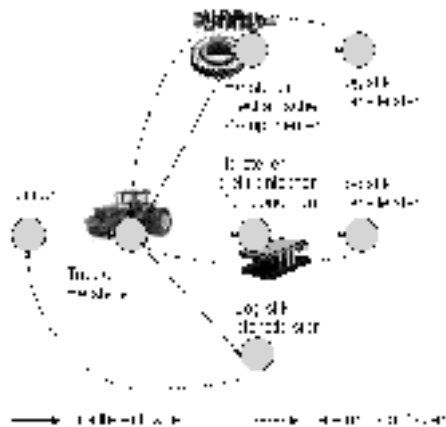


Abbildung 1: *Agent.Enterprise* Supply Chain Szenario

2 Integrierte SCM-Architektur

Das grundlegende Szenario des beschriebenen Referenzmodells umfasst eine vereinfachte Zulieferkette für einen Hersteller von Agrartechnikprodukten, in die verschiedene Zulieferer (mechanische Komponenten, Elektronik etc.) sowie eine Endmontage eingebunden sind (Abbildung 1). Ein Logistikdienstleister für den Transport zwischen Fertigungsstandorten, Montage und Kunden ist – obwohl im Bild dargestellt – bisher nicht in der SCM-Architektur abgebildet. Die Komplexität der zu handhabenden Abläufe führt zu einer Vielzahl einzelner Aufgaben wie Planung, Ausführung und Überwachung der Produktion, des Transportes und der Lagerung. Folglich müssen entsprechend spezialisierte MAS in der Supply Chain interagieren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen hervorzuhebenden Funktionalitäten der beteiligten Systeme.

Kernfunktionalität	System
Verhandlungen zwischen Unternehmen	DISPOWEB
Integrierte Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung (mit Schwerpunkt auf diskreter Fertigung)	IntaPS
Produktionsplanung und -steuerung (mit Schwerpunkt auf Montagevorgängen)	KRASH
Produktionsplanung und -steuerung (mit Schwerpunkt auf Chargenfertigung in der Prozessindustrie)	FABMAS
Operative Auftragsverfolgung (einschließlich Unteraufträgen)	ATT *
Analyse der Auftragshistorie	SCC *

* ATT und SCC sind Gegenstand des gleichen Forschungsvorhabens

Tabelle 1: Überblick über MAS-Funktionalität

Ausgangspunkt für einen typischen Ablauf ist die verteilte Planung der Aktivitäten, die durch das DISPOWEB-System erfolgt (Abbildung 2).

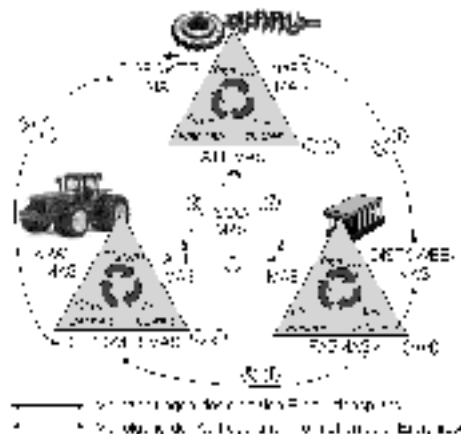


Abbildung 2: Interaktion der MAS in der integrierten SCM-Architektur

Nach Erstellung eines Initialplans für Aufträge und Unteraufträge unter Berücksichtigung von Lieferpreisen und -terminen beginnen die Agenten mit ihren Verhandlungen. Dabei befinden sich die DISPOWEB-Agenten verteilt auf den Plattformen der unternehmensintern agierenden MAS und optimieren Kosten und Lieferzeitpunkte (①). Die optimierten Lieferpläne werden als Eingangsinformation auf der intraorganisationellen Ebene in den jeweiligen Unternehmen verwendet, um die Produktion der zuzuliefernden Güter detailliert zu planen (②). Die erstellten Pläne sind die wesentliche Eingangsinformation für das Auftragsverfolgungssystem, das im Rahmen des ATT/SCC-Projektes entwickelt wird. Dieses MAS überwacht Aufträge in jedem Stadium der Supply Chain mittels einer ebenfalls verteilten Architektur und entdeckt selbständig Ereignisse in der Kette, welche die Ausführung der erstellten Pläne gefährden [Zi02a]. Im Falle eines solchen Ereignisses (z.B. Verzögerung eines Auftrages aufgrund des Ausfalls einer Fertigungslinie) ermittelt und informiert das ATT-System alle von den Auswirkungen betroffenen Teilnehmende der Supply Chain (③). Dort kann diese Information z.B. als Auslöser einer Umplanung auf Unternehmensebene genutzt werden (④) oder im Falle schwerwiegenderer Störungen eine Neuverhandlung der Pläne auf unternehmensübergreifender Ebene durch das DISPOWEB-System anstoßen (⑤). Details enthält Tabelle 2.

Schritt	Aktivität (Akteur)
①	Verhandlung des Initialplans (DISPOWEB)
②	◆ Operative Planung von Montagevorgängen (KRASH) ◆ Fertigungsplanung für mechanische Komponenten (IntaPS) ◆ Fertigungsplanung für Sitze (FABMAS)
③	◆ Überwachung der Aufträge und zugehöriger Unteraufträge (ATT) ◆ Bei kleinen Störungen: Betreffende Unternehmen informieren und dort interne Umplanungen anstoßen (ATT) → Weiter bei ④ ◆ Bei schwerwiegenden Störungen: DISPOWEB-Agenten informieren (ATT) → Weiter bei ⑤ ◆ Weitergabe der Daten an und Auswertung durch „trusted third-party“- System (SCC)
④	Unternehmensinterne Umplanung als Reaktion auf kleine Störung (KRASH, IntaPS, FABMAS) → Weiter bei ③
⑤	Verhandeln eines neuen Plans zwischen den Unternehmen als Reaktion auf schwerwiegende Störung (DISPOWEB) → Weiter bei ①

Tabelle 2: Aktivitäten und zugehörige Akteure in der Supply Chain

Das ATT-System nutzt die Informationen aus der Supply Chain nicht nur zur Überwachung von Aufträgen auf einer operativen Ebene sondern leitet diese auch an einen „trusted third-party“-Dienst namens SCC weiter. Dieses MAS analysiert die Historie der Aufträge und ihrer Unteraufträge. SCC ist in der Lage, darin charakteristische Muster von Situationen zu identifizieren, die typischerweise zu Problemen in der Auftragsausführung führen. Diese Erkenntnisse können sowohl im ATT-System zur Optimierung der Tracking-Funktionalität genutzt werden als auch zur Erweiterung der Verhandlungsstrategien der DISPOWEB-Agenten (z.B. um Preisnachlässe bei unzuverlässigen Zulieferern zu erreichen).

3 Schnittstellen und Gateways

3.1 Zugrunde liegende Produktionsdaten-Strukturen

Das Ziel der integrierten SCM-Architektur ist die Koordination der Produktionsplanungs- und -steuerungsprozesse über die gesamte logistische Kette hinweg und deren Optimierung hinsichtlich monetärer Bewertungskriterien. Folglich ist die Schnittstellendefinition aus der Struktur der zugrunde liegenden PPS-Datenbanken abgeleitet. Eine solche Spezifikation in Gestalt eines Datenbankschemas ist z.B. unter [KRA03a] verfügbar, wobei das zugehörige UML-Klassendiagramm (Unified Modelling Language) in [KRA03b] vorgestellt ist. Folgende Informationsobjekte des Szenarios sind in entsprechenden Datenbanktabellen enthalten (Abbildung 3):

- Stammdaten (einschließlich Stücklisten und Arbeitsplänen für jedes Produkt);
- Arbeitsvorgänge und ihre Zuordnung zu einzelnen Maschinen;
- (Kunden-)Aufträge;
- Fertigungsaufträge (durch das PPS-Modul erzeugte Produktionspläne);
- Störungsprofile (individuelle Störungsprofile für jede Maschine).

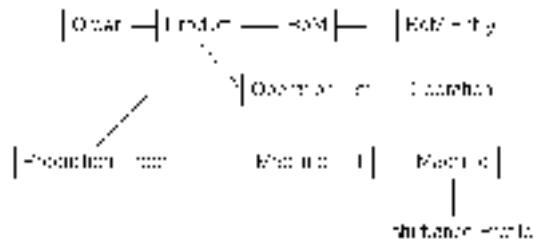


Abbildung 3: Datenbankstruktur zur Speicherung von Produktionsdaten

Die Tabelle *Product* (Produkt) in den Stammdaten enthält produktspezifische Informationen. Die Stückliste benennt alle Teile, die zur Montage des Produktes benötigt werden, währenddessen die Arbeitspläne die einzelnen Arbeitsvorgänge auflisten, die zur Durchführung der Montage nötig sind. Die Tabelle *Operation* (Arbeitsvorgänge) wird verwendet, um einzelne Arbeitsvorgänge bestimmten Maschinen zuzuordnen, welche diese Arbeitsgänge einschließlich der zugehörigen Rüstoperationen auszuführen in der Lage sind. Die Tabelle *Order* (Aufträge) enthält alle Kundenaufträge einschließlich des geordneten Produktes und der gewünschten Stückzahl. Des Weiteren enthält sie Liefermengen und Terminangaben wie Freigabetermin und geplanten Fertigstellungstermin. Die auf diesen Daten basierenden Ergebnisse des Planungsprozesses werden in der Tabelle *Production Order* (Fertigungsaufträge) abgelegt. Außerdem werden maschinenspezifische Störprofile in der Tabelle *Disturbance Profile* abgelegt. Diese Störprofile basieren auf der Störungshistorie, die sich z.B. aus Erfahrungswerten oder aus gesammelten Störungsmeldungen ergibt und mithilfe von MDE- (Maschinendatenerfassung) und BDE-Systemen (Betriebsdatenerfassung) erhoben werden.

Diese Datenstrukturen bestimmen wesentlich die Steuerung des Ablaufs in *Agent.Enterprise*, da sie sowohl für die intra- als auch für die interorganisationelle Produktionsplanung verwendet werden. Im Falle intraorganisationeller (unternehmensinterner) Planungsaktivitäten dienen die Auftragsdaten („orders“) als dynamische Eingangsgrößen. Deren Stücklisten werden unter Berücksichtigung möglicher Fertigungsverfahren und anderer produktionsrelevanter Parameter (wie Losgrößen oder angestrebte Fertigstellungstermine) analysiert und Fertigungsaufträge werden den einzelnen Fertigungszellen, Maschinengruppen oder Maschinen zugewiesen. Diese Planungsaufgaben erfüllen die MAS-basierten Planungsalgorithmen der eingangs genannten Projekte (Abschnitt 5). Im interorganisationellen (unternehmensübergreifenden) Fall werden Auftragsdaten und voraussichtliche Lieferzeitpunkte zwischen den beteiligten Unternehmen ausgetauscht. Um die unternehmensübergreifende Produktionsplanung durchzuführen, benötigen die DISPOWEB-Agenten Informationen von den intraorganisationellen MAS hinsichtlich der internen Fertigungssituation. Die ATT-Systeme werden mit den erstellten Plandaten angestoßen und überwachen deren Ausführung (Abschnitt 4).

3.2 Definition einer *Agent.Enterprise*-Schnittstellenontologie

In dem Informationsfluss ist der einfache Austausch von Daten nur ein Teil dessen, was im Rahmen der Schnittstellendefinition und -nutzung zu leisten ist. Notwendig ist weiterhin die eindeutige Definition der Bedeutung der zwischen Agenten bzw. MAS ausgetauschten Informationen. Für diesen Zweck wurde eine Schnittstellenontologie entwickelt. Sie integriert die relevanten Konzepte, die aus deren umfangreichen domänenspezifischen Ontologien unter Berücksichtigung der Anforderungen der im letzten Abschnitt eingeführten Datenstruktur extrahiert wurden. Details enthält der vorangehende Beitrag [Kr03] der Arbeitsgruppe Agententechnologie des Schwerpunktprogramms.

4 Integrierte Planung und Überwachung von Aufträgen auf unternehmensübergreifender Ebene

4.1 Integrierte Terminplanung in der Zulieferkette

Das DISPOWEB-Projekt übernimmt innerhalb des Testbeds *Agent.Enterprise* die sukzessive Erstellung eines Ablaufplans zur Durchführung der Einzelaufträge. Die einzelnen Teilprojekte müssen hierfür jedoch weder ihre internen Planungsdaten an eine zentrale Instanz abgeben, noch auf ihre Planungsautonomie verzichten. Die Ablaufoptimierung für den jeweilig einzuplanenden Auftrag erfolgt unter der Restriktion, dass bestehende Verträge oder Vereinbarungen zwischen den Unternehmen unverändert bleiben. Für die Optimierung der Allokation der durchzuführenden Aufträge über die Einplanung hinaus, wurden im Rahmen von DISPOWEB weitere Mechanismen entworfen, die sich mit stochastischer Optimierung [St02] und kombinatorischen Auktionen [Sc03] auseinandersetzen. Für den Einsatz dieser Verfahren müssen die Agenten jedoch wesentlich

mehr Informationen über ihre internen Planungszustände bzw. -bedingungen offenbaren, was im Allgemeinen Sicherheitsproblematiken involviert.

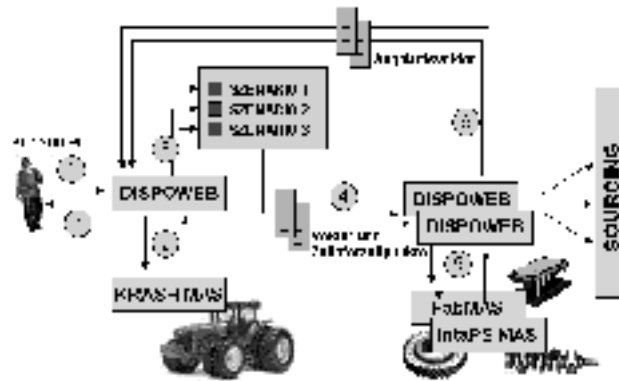


Abbildung 4: Terminplanung in der Zuliefererkette

Zur Erstellung eines Ablaufszenarios im Rahmen des hier vorliegenden Multi-Multiagenten (MAS)-Ansatzes, wird jeder Fertigungsbetrieb von einem DISPOWEB-Agenten vertreten. Die Erstellung eines Produktionsplanes wird durch einen Auftrag initiiert und schrittweise durchgeführt (siehe Abbildung 4). Zunächst erhält ein DISPOWEB-Agent die Anfrage eines Kunden nach einem Produkt (①), z.B. einem Traktor. Der Kunde kann seine Anfrage dabei mit bestimmten Preisen für verschiedene Lieferzeitpunkte versehen abgeben, welche vom DISPOWEB-Agenten bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden. Die DISPOWEB-Agenten schlagen den Produktionsagenten im Folgenden mögliche Ablaufpläne vor. Der Planerstellungsprozess zwischen den DISPOWEB-Agenten (unter Einbeziehung der jeweiligen Unternehmensagenten) muss komplett durchgeführt sein, bevor es zu einer Zusage des Auftrages kommt. Dieser gestaltet sich wie folgt (siehe UML-Diagramm in Abbildung 5).

Der DISPOWEB-Agent fragt beim OEM (KRASH) Agenten die möglichen Durchführungszeiten und zugehörigen Kosten für die Fertigstellung des entsprechenden Prozesses an. Darüber hinaus benötigt er die Auslastungssituation seines OEMs (②). Sobald der DISPOWEB-Agent diese Informationen erhalten hat, beginnt er alle durchführbaren Planungsszenarien aufzustellen und als ineffizient identifizierbare Pläne zu verwerfen (③). Zu jedem Szenario werden die Zeitpunkte für den letztmöglichen Anlieferungstermin der benötigten Baugruppen bzw. Einzelteile festgestellt und jedem Zulieferer eine Anfrage für diese Zeitpunkte übermittelt (④).

Jeder Agent, welcher eine Anfrage bezüglich der Zulieferung eines Produktes erhalten hat, erstellt ebenfalls Planungsszenarien und fragt bei seinem Zulieferer nach Angeboten für die von ihm benötigten Inputgüter nach. Benötigt ein Agent keinen Input bzw. kann er sämtliche für die Produktion benötigten Teile per Lagerabruf erhalten, beantwortet er die Anfrage mit dem Übersenden eines Angebotsvektors, welcher sowohl die Erstellungskosten als auch die Auslastungssituation der benötigten Ressourcen aggregiert (⑤). Hat ein DISPOWEB-Agent alle angefragten Angebotsvektoren erhalten, erstellt er einen

Angebotsvektor für die bei ihm angefragten Liefertermine und schickt diesen an seine Abnehmer. Der einem Lieferzeitpunkte zugeordnete Preis basiert auf den jeweilig minimalen Kosten für die Fertigstellung bis zu diesem Zeitpunkt. Wenn der OEM alle Angebotsvektoren erhalten hat, bestimmt er den für ihn profitabelsten Fertigstellungszeitpunkt unter Berücksichtigung der Zeitpräferenzen des Kunden (⑦). Anschließend erfolgt die Einlastung der Prozesse. Dieser Mechanismus lastet einen Auftrag optimal ein, falls die zugrunde liegenden Planungsinformationen der DISPOWEB-Agenten korrekt sind.

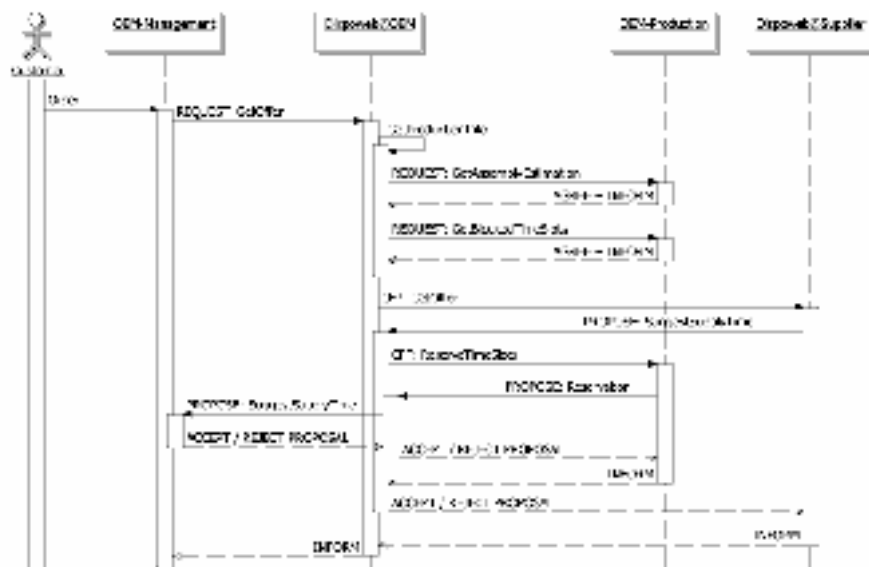


Abbildung 5: UML-Darstellung des Planungsablaufes in *Agent.Enterprise* (Ausschnitt)

4.2 Agentenbasiertes Tracking und Tracing und Supply Chain Controlling

Aufgrund unvorhersehbarer Planabweichungen in den Auftragserfüllungsprozessen (Produktion, Transport, Lagerung) und der Unsicherheit hinsichtlich Störungen und deren Folgen, ergeben sich in Supply Chains häufig Verzögerungen, Fehlmengen, Qualitätsabweichungen. Informationen über derartige Ereignisse sind für alle Beteiligten von großem Interesse, da sie auch Folgeprozesse negativ beeinflussen (verlängerte Durchlaufzeiten, überhöhte Lagermengen und Kapitalkosten sowie zu geringe Liefertreue).

Existierende Tracking-Systeme und neuere Entwicklungen des Supply Chain Event Management (SCEM) für die operative Auftragsdurchführung sind von einem vorwiegend reaktiven und unternehmensinternen Fokus der Überwachungsaktivitäten gekennzeichnet. Diese Systeme sind zumeist sehr starr und wartungsintensiv hinsichtlich ihrer internen Regelverarbeitung. Außerdem verfügen sie kaum über Fähigkeiten zur autonomen Interpretation von Eventinformationen und lediglich über begrenzte adaptive und proaktive Kommunikationsfähigkeiten. Der stark wachsende Markt für SCEM-Anwendungen weist jedoch auf deren große Bedeutung für die Unternehmen hin [Br02].

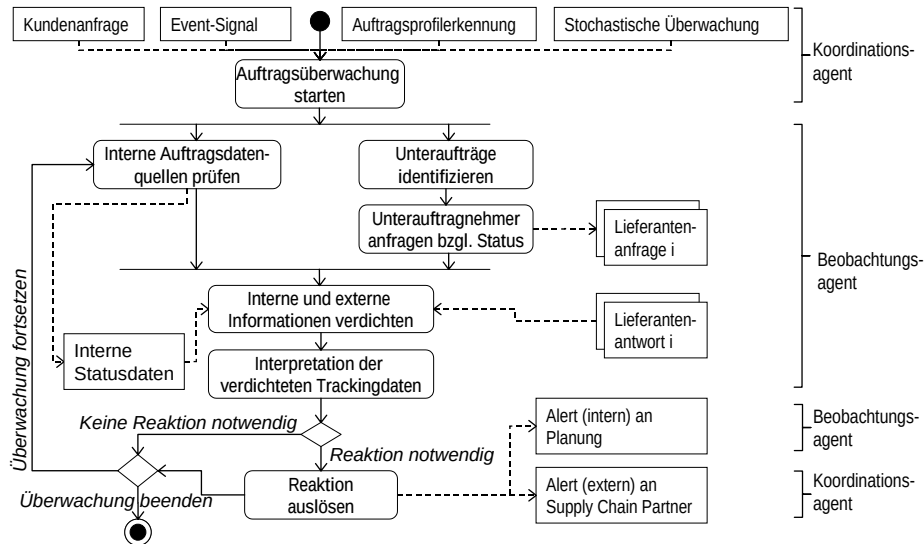


Abbildung 6: Ablauf der Auftragsüberwachung im ATT-MAS

Ein auf Softwareagenten basierender Ansatz erlaubt es, diese Defizite zu beheben und erweiterte Event Management Fähigkeiten sukzessive in bestehende IT-Umgebungen von Supply Chain Partnern zu integrieren. Im Testbed *Agent.Enterprise* sorgt das ATT-MAS für die proaktive Überwachung der Aufträge, und es triggert Umplanungen in internen Produktionsplanungssystemen (FABMAS, KRASH, IntaPS) bzw. bei schwerwiegenden Problemen eine Neuplanung der globalen Pläne durch DISPOWEB. Der typische Ablauf einer Auftragsüberwachung ist in Abbildung 6 dargestellt [Zi03].

Die Aufgaben werden von Koordinations- und Beobachtungsagenten übernommen, die in Abbildung 7 zusammen mit weiteren Agenten dargestellt und für die interorganisatorische Kommunikation (Diskursagenten) und den Zugriff auf interne Datenquellen (Wrapperagenten) zuständig sind [Zi02a]. Dabei verfügt jedes Unternehmen über eine eigene Agentenplattform mit den genannten Agententypen. Die notwendige Semantik für die Kommunikation wurde in einer Supply Chain Tracking Ontologie definiert [Zi02b]. Sie wurde in die bereits erläuterte Schnittstellenontologie integriert. Neben einem generischen Prototyp, der im integrierten *Agent.Enterprise*-Szenario zum Einsatz kommt, wurde die vorgeschlagene Architektur bereits in einem Business Case mit einem Logistikdienstleister erfolgreich prototypisch umgesetzt [RZ02][Zi03]. Das operative Tracking und Event-Management durch das ATT-MAS ist eine geeignete Basis für ein längerfristiges unternehmensübergreifendes Controlling der Wertschöpfungsaktivitäten. Zu diesem Zweck wird eine neutrale Instanz – ein sog. Notaragent – bereitgestellt, der die historischen Tracking-Daten sammelt. Mithilfe von Data-Mining-Methoden untersucht er die zeitliche Entwicklung von Störungsschwerpunkten, identifiziert Regeln über die Ausbreitung von Störungen in der Supply Chain und erlaubt eine kontinuierliche Messung ihrer Leistungsfähigkeit. Diese Informationen können z.B. für die globale Planung des DISPOWEB-MAS und für eine gezielte Auftragsüberwachung durch das ATT-MAS verwendet werden (vgl. Abschnitt 2).

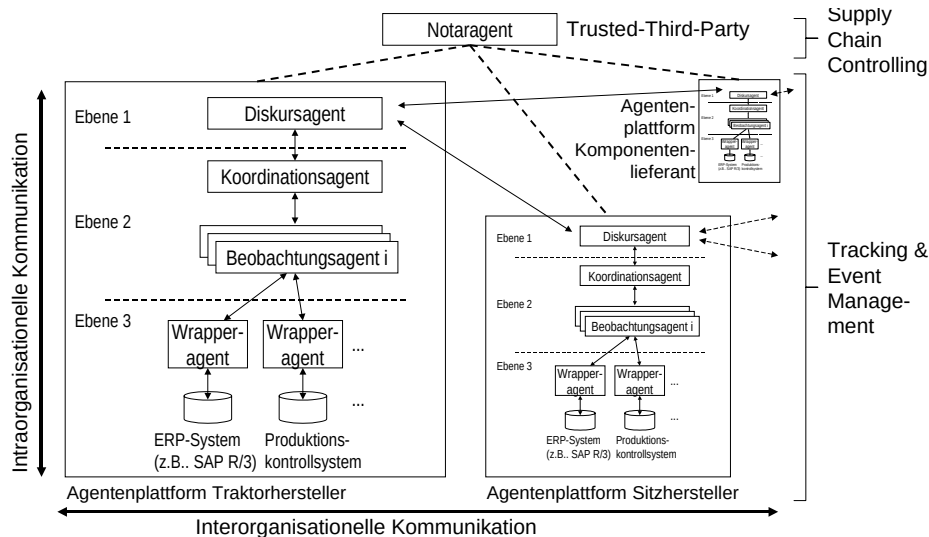


Abbildung 7: Agentenarchitektur für das Tracking und Tracing

5 Nutzung von MAS zur Unterstützung flexibler, unternehmensinterner Produktionsprozesse

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Supply Chain ist die zuverlässige Umsetzung unternehmensübergreifender Pläne auf die operative Ebene der einzelnen Unternehmen. Hier werden von MAS Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Systemen erwartet, da sie drei wesentliche Forderungen an eine Supply Chain unterstützen:

- Flexibilität der dezentralisierten SCM-Algorithmen;
- Integration von Methoden der proaktiven Auftragsverfolgung und -überwachung in die SCM-Architektur;
- Zuverlässigkeit der dezentralisierten Produktionsplanungs- und -steuerungsalgorithmen auf der lokalen Werkstattebene.

Methoden, mit denen die ersten beiden Eigenschaften erreicht werden können, wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze anhand der Systeme KRASH, IntaPS und FABMAS vorgestellt, die der Umsetzung der dritten Eigenschaft auf der operativen intraorganisationellen Ebene dienen. Mit ihnen wird auf Werkstattebene die Basis für die Zuverlässigkeit der höheren, unternehmensübergreifenden Ebenen der Supply Chain geschaffen.

5.1 Robuste Produktionsplanung und -steuerung

Das Projekt KRASH (Karlsruhe Robust Agent SHell) befasst sich mit der intra-organisationalen Produktionsplanung und -steuerung. Im Rahmen von *Agent.Enterprise* übernimmt das entwickelte Agentensystem die innerbetriebliche Planung und Steuerung der Montageprozesse auf Werkstattebene. Die Schnittstellen zu den weiteren MAS in *Agent.Enterprise* sind in erster Linie die durch die Kunden definierten Auftragslisten und die Auftragslisten für die eigenen Zulieferer. Darüber hinaus werden für die übergeordnete Planungsinstanz im Rahmen eines Supply Chain Managements möglichst zuverlässige Fertigstellungstermine genannt, die für die unternehmensübergreifende Produktionsplanung herangezogen werden. Die robuste inter-organisationalle Steuerung der Prozesse wird durch einen Tracking- und Tracing-Mechanismus garantiert, der im Störfall von dem lokalen Steuerungssystem benachrichtigt wird. Der Schwerpunkt des Projekts KRASH ist die implementierungs- und produktionstechnische Robustheit eines Multiagentensystems. Ein robustes Verhalten im Störfall ist die Voraussetzung für den Einsatz der Agententechnologie im industriellen Alltag. Bei einem Ausfall der Software soll das MAS in der Lage sein, einen konsistenten Zustand wiederherzustellen. Bei Produktionsstörungen, wie z.B. Maschinenausfällen, ist außerdem eine dynamische Reaktion auf derartige Ereignisse erforderlich.

Bevor mit der Entwicklung eines MAS begonnen wird, ist zuerst die Frage zu klären, ob ein MAS für das spezifische Einsatzszenario überhaupt systemimmanent geeignet ist oder ob ein zentraler Ansatz gegebenenfalls die besseren Ergebnisse liefert. Die Frage nach geeigneten Kriterien für den Einsatz eines MAS wurde bisher nur ungenügend in der Literatur untersucht, so dass in einem ersten Schritt auf der Basis einer simulationsgestützten, parametrisierbaren Benchmarking-Plattform das Verhalten von MAS in Abhängigkeit verschiedener Szenarien und Störungsprofile untersucht wurde. Einen statischen Benchmarking-Ansatz stellen Cavalieri et al. in [CMV03] vor.

Im Rahmen der oben beschriebenen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass mit dem entwickelten agentenbasierten Ansatz auf der Basis des Contract Net-Protokolls in hochdynamischen Szenarien mit einer hohen Komplexität der Planungsaufgaben im Vergleich zu herkömmlichen zentralen Ansätzen aus dem Operations Research bessere Ergebnisse hinsichtlich der Durchlaufzeit erzielt werden können. Dabei ist vor allem die Vorhersagbarkeit der Durchlaufzeiten, d.h. deren Standardabweichung, generell besser. Der Grund hierfür ist die effektivere Handhabung von Warteschlangen und die Möglichkeit der Berücksichtigung zeitabhängiger Planungsparameter bei dem MAS-Ansatz. Im störungsfreien Fall liefern die optimierten heuristischen OR-Ansätze bessere Ergebnisse.

Das in dem Projekt KRASH entwickelte MAS stellt ein rein reaktives System dar, da sehr kurze Planungshorizonte die Möglichkeiten deliberativen Planens stark einschränken. Im weiteren Projektverlauf soll auch untersucht werden, ob durch verbesserte Möglichkeiten der Benutzerinteraktion die Akzeptanz beim Anwender erhöht werden kann.

Neben der produktionstechnischen Robustheit, die durch die gewählte Architektur und die entsprechenden Algorithmen gewährleistet wird, wird auch die implementierungstechnische Robustheit der Software adressiert. Hierzu werden Transaktionsmechanismen

aus dem Bereich der Datenbanken verwendet, wo Robustheitsdienste bereits seit langem zum Funktionsumfang gehören. Der Ansatz in KRASH baut auf den Konversationen auf und kapselt die Anwendungslogik in FIPA-konforme Transaktions-Tasks, die über einen Transaktionsmanager in einer Datenbank abgelegt werden. Kommt es nun zu einer Störung des Systems, so kann der letzte konsistente Zustand wiederhergestellt werden.

In dem Projekt KRASH konnte gezeigt werden, dass sich MAS vor allem dann gegenüber zentralen Ansätzen auszeichnen, wenn die Szenarien von einer hohen Dynamik und Komplexität gekennzeichnet sind. Diese Attribute treffen für ein Unternehmensnetzwerk, wie es *Agent.Enterprise* darstellt, sicher zu. Das entwickelte MAS zeigt ein robustes Verhalten bei Störungen und erlaubt es dem Disponenten somit, die für eine exakte unternehmensübergreifende Produktionsplanung zwingend notwendigen Daten über prognostizierte Fertigstellungstermine zuverlässig abzuschätzen. Hier bietet das entwickelte Agentensystem einen quantifizierbaren Mehrwert.

5.2 Intelligente Softwareagenten in der Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung

Im Mittelpunkt des IntaPS-Projektes stehen Methoden zur integrierten, agentenbasierten Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung auf der intra-organisationalen Ebene des *Agent.Enterprise*-Szenarios. Obwohl Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung zusammen die Arbeitsvorbereitung bilden, werden die zugehörigen Aufgaben in Unternehmen meist separat bearbeitet. Die historisch gewachsene Trennung resultiert u.a. daraus, dass sich die Arbeitsplanung vorrangig auf die fertigungstechnologischen und produktbezogenen Informationen bezieht, während die Fertigungssteuerung vorrangig logistische und terminbezogene Größen fokussiert. In der Arbeitsplanung werden für einzelne Teile und Baugruppen in Abhängigkeit von z.B. Bauteilgeometrie, Werkstoff und geforderten Oberflächengüten geeignete Fertigungsprozesse, Bearbeitungssequenzen und Montage-reihenfolgen festgelegt. Der Detaillierungsgrad der Planung kann hierbei so hoch sein, dass in den Arbeitsplänen bereits Parameter der Bearbeitungsprozesse vorgegeben werden (z.B. Schnitttiefe und Vorschubgeschwindigkeit eines Werkzeuges bei einem spanenden Bearbeitungsprozess). Ergebnis der traditionellen Arbeitsplanung ist ein statischer Arbeitsplan, der eine lineare Abfolge von Fertigungsschritten und deren voraussichtliche Dauer vorgibt. Die klassische Fertigungssteuerung setzt auf diese Arbeitspläne auf und verknüpft sie mit den Daten der zu bearbeitenden Aufträge, z.B. Termine, Auftragsmengen und zugehörigen Losgrößen. Hierbei stehen logistische Größen im Vordergrund sowie die termingerechte Durchsetzung des Auftrages durch die Fertigung. Im Bereich der Serienfertigung (z.B. in der Automobilbranche) gibt es zahlreiche Methoden und Werkzeuge, die eine Optimierung des Zusammenspiels von Planung und Steuerung von Fertigungsprozessen zum Ziel haben. Zumeist kommen unter dem Oberbegriff der „Digitalen Fabrik“ verschiedene Simulationsverfahren und Virtual-Reality-Techniken im Vorfeld des Produktionsanlaufes zum Einsatz, die z.B. Taktzeiten von produktspezifischen Fertigungslinien und Materialfluss zwischen den Fertigungslinien optimieren [BH03].

Problematisch wird dieses Vorgehen für Unternehmen, die in kleinen bis mittleren Losgrößen oder ein sehr heterogenes Auftragspektrum fertigen, da hier Produkte mit unter-

schiedlichen Anforderungen und Losgrößen hergestellt werden müssen (z.B. Automobilzulieferer, die spezielle Produkte für verschiedene Automobilhersteller zuliefern). Hier besteht ein Zielkonflikt: Einerseits ist ein hoher Detaillierungsgrad in der (Fein-)Arbeitsplanung Voraussetzung für die Abschätzung von Bearbeitungszeiten und somit für ein verlässliches Scheduling in der Fertigungssteuerung. Andererseits gilt: Je höher der Detaillierungsgrad und die Optimierung einzelner Prozessschritte in den Arbeitsplänen ist, umso weniger Spielraum hat die Fertigungssteuerung bei der kurzfristigen Umlanung auf Werkstattebene (z.B. bei Maschinenausfällen oder starken Schwankungen im Auftragsaufkommen). Zusätzlich erschwert die Heterogenität des Auftragspektrums den Einsatz verketteter Fertigungssysteme, so dass viele Unternehmen auf dezentrale Fertigungsstrukturen wie Insel- oder Werkstattfertigung setzen. Eine Umfrage zeigte jedoch, dass bestehende Planungssysteme den Anforderungen dezentraler Fertigungsstrukturen kaum gerecht werden und viele Unternehmen über keine oder nur unzureichende informationstechnische Unterstützung dieser Strukturen auf Werkstattebene verfügen [De03].

In der Forschung existieren verschiedene Ansätze zur Lösung dieser Probleme beizutragen, z.B. die Verwendung von Netzplänen, die bereits in der Arbeitsplanung Planalternativen vorsehen [Kr95]. Allerdings konnten sich Netzarbeitspläne in der Praxis nicht durchsetzen, da jeder mögliche Pfad mit entsprechendem Aufwand durchzuplanen ist, auch wenn in der Fertigungssteuerung nur einer genutzt wird. Hier setzt der IntaPS-Ansatz an. Das IntaPS-System besteht aus einem MAS, das nicht nur Belegungspläne aushandelt, sondern das Aufgaben der Arbeitsplanung auch dezentral durchzuführen kann. Dabei wird das dezentral bei den Ressourcen vorhandene Fertigungswissen in die technologische Planung einbezogen. IntaPS ist somit prinzipiell in der Lage, in dezentralisierten Fertigungsstrukturen zu arbeiten und dabei auch sowohl auf Seiten der Auftragsagenten (z.B. Baugruppenstrukturen mit Einzelteilen) als auch bei Ressourcenagenten (z.B. Fertigungsinseln mit einzelnen Maschinen) hierarchische Strukturen zu beherrschen. Lediglich eine kleine Rumpfarbeitsplanung wird weiterhin zentral ausgeführt, analysiert eingehende Produkt- und Auftragsdaten und stattet die Auftragsagenten bei ihrer Erzeugung mit dem notwendigen Wissen, das sie sich nicht selber aus ihrer Umwelt schließen können (z.B. über Constraints). Der resultierende Arbeits- und Belegungsplan ist das Ergebnis der Verhandlungen zwischen Auftrags- und Ressourcenagenten. IntaPS greift dabei Konzepte aus dem Bereich des Planens mit inkrementell erzeugten Graphen auf [BH02] und erweitert diese hinsichtlich domänenspezifischer Anforderungen. So ist beim inkrementellen Planen abzuschätzen, dass ein Plan unter fertigungstechnologischen Gesichtspunkten ausführbar bleibt. Der Vorteil des IntaPS-Systems liegt darin, noch während der Fertigung (Planausführung) auf Ereignisse zu reagieren und in Kooperation mit anderen Agenten Planalternativen zu erarbeiten, zu bewerten und Pläne ggf. anzupassen. Gerade hierbei profitieren die Agenten von anderen Arbeiten im IntaPS-Projekt bezüglich Konfliktmanagement, offen-adaptiver Kommunikation und eines ontologiebasierten Management des Fertigungspotentials [TW03]. So wird eine hierarchisch-simultane Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung ohne die von Netzplänen bekannten Nachteile möglich. Der IntaPS-Ansatz ist als JAVA-basierter Prototyp unter Verwendung der Agentenplattform JADE realisiert und stellt seine Dienste im Rahmen des *Agent.Enterprise*-Szenariums in Form einer simulierten Fertigung von mechanischen Komponenten über einen Gateway-Agenten zur Verfügung.

5.3 Das FABMAS-System

Das FABMAS-System [Fa03] ist ein hierarchisch organisiertes Multiagenten-System zur Steuerung komplexer Produktionsprozesse. Diese sind durch reihenfolgeabhängige Umrüstzeiten, zyklische Losdurchläufe, zeitlich veränderlichen Produktmix, parallele Maschinen mit komplizierten Dedizierungspraktiken, einen Mix unterschiedlicher Prozess-typen (bspw. Batchprozesse) sowie vorgeschriebene Lieferterminen gekennzeichnet. In FABMAS erfolgt ausgehend von einer hierarchischen Dekomposition des zugrundeliegenden Produktionssystems eine hierarchische Dekomposition des Steuerungssystems. Es wird zwischen der Fabrikebene, der Ebene einzelner Produktionsbereiche und der Maschinengruppenebene unterschieden. Auf Fabrikebene wird zunächst ein grober Ablaufplan unter Verwendung eines aggregierten Kapazitätsmodells erstellt. Auf Bereichsebene wird dieser verwendet, um mithilfe einer Shifting-Bottleneck-Heuristik Maschinenbelegungspläne für die einzelnen Bereiche zu berechnen. Diese werden dann an Maschinengruppen übergeben. Sollten diese ungültig sein, beispielsweise durch Auftreten eines Maschinenausfalles, wird auf unterster Ebene ein kontraktnetzartiges Allokationsverfahren auf Basis von Maschinenstundensätzen angewandt, um Belegungen einzelner Maschinen vorzunehmen (vgl. Abbildung 8). Die Lösung der Entscheidungsprobleme auf den drei Ebenen erfordert ein Höchstmaß an Kommunikations- und Koordinationsfähigkeiten. Daher bieten sich Agenten und Multi-Agenten-Systeme als Lösungsansatz an. In Anlehnung an die PROSA-Referenzarchitektur für holonische Fertigungssysteme [Br98] wird in FABMAS zwischen Entscheider- und Dienstagenten unterschieden.

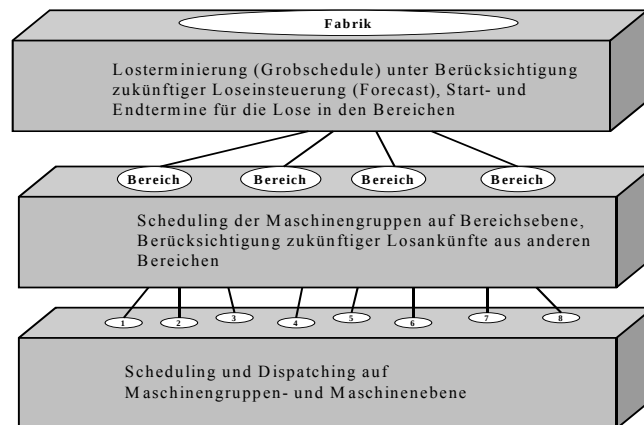


Abbildung 8: Hierarchien innerhalb des FABMAS-Systems

Entscheideragenten können auf der Grundlage ihres Wissens über ihre Umwelt, für das Gesamtsystem relevante Entscheidungen selbstständig treffen. Dabei werden sie von den Dienstagenten unterstützt. Ressourcenagenten, Auftragsagenten und Produktagenten sind besondere Ausprägungen von Entscheideragenten. Ressourcenagenten bilden die hierarchische Dekomposition des Produktionssystems ab und existieren im System als Fabrik-agent, Bereichsagent, Maschinengruppenagent und Toolagent. Auftragsagenten reprä-

sentieren als Losagent einzelne Lose oder als PM-Agent vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen. Produktagenten sind in der Ausprägung Technologieagent für die Verwaltung von Arbeitsplänen verantwortlich. Dienstagenten dienen innerhalb des FABMAS-Systems hauptsächlich der Kapselung von Scheduling- und Monitoringalgorithmen.

Die FABMAS zugrundeliegende Softwarearchitektur auf der Basis der Microsoft .NET Technologie mit dem .NET Remoting Framework als Kommunikationsinfrastruktur ist in [MSZ03], eine domänenorientierte Ontologie als Basis für Koordinationsaktivitäten in [MS03b] beschrieben. Neben der eigentlichen Softwarearchitektur wurde im FABMAS-Projekt eine Architektur zur Leistungsbewertung von Multi-Agenten-Systemen entwickelt (vergleiche [MS03a] für das Lösungskonzept und [MSZ03] für die konkrete Anwendung auf das FABMAS-System). Die vorgeschlagene Architektur zur Leistungsbewertung erlaubt im Wesentlichen eine Emulation des zu steuernden Produktionsprozesses durch ein diskretes ereignisorientiertes Simulationsmodell. Für die Integration in das *Agent.Enterprise*-Szenario benötigt FABMAS von den Mitgliedern der abgebildeten Lieferkette vorrangig Auftragsdaten (Prioritäten der Kundenaufträge, Produktspezifikationen, Information über Mengen sowie Kundenendtermine). Diese Daten müssen für einen bestimmten Vorschauhorizont zur Verfügung gestellt werden. Umgekehrt versorgt FABMAS die Partner in der Lieferkette mit Voraussagen zu Aussteuerterminen, Informationen zu tatsächlich realisierten Aussteuerterminen und -mengen sowie Statistikdaten zur Optimierung der Lieferbeziehungen (z.B. Bestandsdaten, Auslastung, Durchsatz).

5.4 Vorteile von MAS hinsichtlich Flexibilität und Zuverlässigkeit bei Störungen

Die Annahme, dass MAS eine höhere Flexibilität und Stabilität gegenüber unerwarteten Effekten und Störungen in der Fertigung aufweisen als herkömmliche, zentral organisierte Systeme, kann durch realitätsnahe Benchmarking-Szenarien überprüft werden, von denen eines im Folgenden exemplarisch vorgestellt wird. Hierbei werden die Durchlaufzeiten von Aufträgen in der Fertigung untersucht, wobei sowohl die mittleren Durchlaufzeiten der Fertigungsaufträge als auch deren Standardabweichungen berücksichtigt werden. Dabei wurde die Produktionsplanung einerseits von einem reaktiven MAS und andererseits von einem herkömmlichen OR-Algorithmus durchgeführt. Die Auswertung von der Häufigkeit und Dauer auftretender Störungen abhängt. Zudem war die Standardabweichung während der Evaluation bei dem MAS dauerhaft geringer (Abbildung 9).

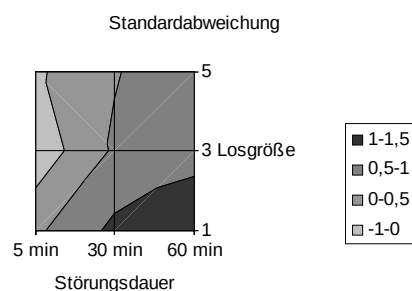


Abbildung 9: Vergleich von MAS- und OR-Ansätzen hinsichtlich Durchlaufzeit-Standardabweichungen

Das Diagramm zeigt für verschiedene Kombinationen von Ausfalldauer und Losgröße die Standardabweichung der Durchlaufzeit als skalierten Vergleichsfaktor, der die Eignung des MAS repräsentiert. Werte grösser 0 markieren Kombinationen, in denen das MAS dem OR-Ansatz überlegen war. Bei Werten kleiner 0 (heller Bereich) lieferte der OR-Ansatz die besseren Ergebnisse. Der MAS-Ansatz liefert umso bessere Ergebnisse je höher die Planungskomplexität war, was sich in dem betrachteten Szenario z.B. durch Abnahme der durchschnittlichen Losgröße widerspiegelt. Weitere Details enthält [Fr03].

Geringe Standardabweichungen in der Durchlaufzeit und somit eine gute Vorhersagbarkeit und Einhaltung von Lieferterminen ist eine Voraussetzung für eine hohe Qualität der Planungsergebnisse des DISPOWEB-Systems im *Agent.Enterprise*-Szenario. In Verbindung mit dem ATT-System sorgt die Zuverlässigkeit von Planungsergebnisse auf ausführender, operationeller Ebene für eine Zuverlässigkeit der gesamten SCM-Architektur auf der übergeordneten Ebene des Zulieferverbundes. Ein möglicher Nachteil dieser SCM-Architektur ist jedoch der erhöhte Kommunikations- und Koordinationsaufwand. Dieser Punkt ist in der nächsten Phase des Schwerpunktprogramms durch weitere Untersuchungen und Versuche mit den implementierten MAS unter realistischen Testszenarios weiter zu untersuchen. Für weitere Informationen sei auf [Re03] verwiesen.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das *Agent.Enterprise*-Szenario mit seinem agentenbasierten SCM-Ansatz vorgestellt. Es adressiert architektur-, planungs- und ausführungsbezogene Aspekte des Supply Chain Managements. Neben den funktionalen Anforderungen, wie z.B. einer integrierten, zulieferkettenweiten Terminplanung werden auch nicht-funktionale Anforderungen wie Zuverlässigkeit und Flexibilität von dem System erfüllt. Die vorgestellte SCM-Architektur stellt mit der Vernetzung verschiedener Multiagenten-Systeme auf intra- und interorganisationeller Ebene einen hierarchisch vernetzten Ansatz für Multi-Multiagenten-Systeme dar. Die SCM-Architektur einschließlich ihrer Schnittstellen und Gateways wurde mit einem Beispielszenario getestet. Bei der Evaluation wurden sowohl die Machbarkeit des gewählten Ansatzes nachgewiesen als auch erste Erfahrungen und Ergebnisse zum Systemverhalten erlangt. Im nächsten Schritt wird das System mit Testszenarien aus der industriellen Anwendung und entsprechender Komplexität evaluiert werden. Die bisher abgebildete Supply Chain stellt eine vereinfachte Zulieferkette eines Traktor-Herstellers dar. Durch die inhaltliche und strukturelle Nähe des gewählten Szenarios zur Automobilindustrie ist ein Transfer der Ergebnisse auf ein breites Spektrum weiterer Anwendungen möglich.

Literaturverzeichnis

- [An03] Anhalt, C.; Kirn, St.: Koordinations- und Kooperationsunterstützung im SPP 1083 – das Zentralprojekt RealAgentS (in diesem Band).
- [BH02] Balakirsky, S.; Herzog, O.: Planning with Incrementally Created Graphs. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2002.

- [BH03] Bär, T.; Haasis, S.: Steps toward the Digital Factory. In (Bley, H. Hrsg.): Proc. 36th CIRP Int. Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003; S. 171 - 175.
- [Br02] Bretzke, W.R. et al.: Vom Tracking & Tracing zum Supply Chain Event Management – aktueller Stand und Trends. KPMG Consulting AG, Düsseldorf, 2002.
- [Br98] Van Brussel, H., J. et al.: Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. In: Computers in Industry. Special Issue on Intelligent Manufacturing Systems 37(3) 1998; S. 225-276.
- [CMV03] Cavalieri, S.; Macchi, M.; Valckenaers, P.: Benchmarking the Performance of Manufacturing Control Systems: Design Principles for a Web-based Simulated Testbed. In: Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 14, Issue 1, 2003; S. 43-58.
- [De03] Denkena, B. et al.: Integration of Process Planning and Scheduling using Intelligent Software Agents. In (Bley, H. Hrsg.): Proc. 36th CIRP Int. Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003; S. 537 - 544.
- [Fr03] Frey, D. et al.: Benchmarking and Robust Multi-agent-based Production Planning and Control, In: Proc. 7th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Elsevier Science Ltd., Budapest, 2003.
- [Kr03] Krempels, H.-K. et al.: Entwicklung intelligenter Multi-Multiagentensysteme – Werkzeugunterstützung, Lösungen und offene Fragen. Proc. Informatik2003, Frankfurt, 29.9.-2.10.2003 (in diesem Band).
- [Kr95] Kreutzfeld, J.: Planen mit Bearbeitungsalternativen in der Teilefertigung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [KRA03a] KRASH Onlinedokument: DB Specifications on RealAgentS, <http://www.realagents.org/public.php?ID=901> [Stand 18.07.03]
- [KRA03b] KRASH Onlinedokument: UML Class Diagram on RealAgentS, <http://www.realagents.org/geturl.php?ID=1053> [Stand 19.07.03]
- [MS03a] Mönch, L.; Stehli, M.: Simulationsbasierte Leistungsbewertung von Systemen der verteilten künstlichen Intelligenz für die Produktionssteuerung. In: Zeitschrift für Künstliche Intelligenz, 2003 (zur Veröffentlichung angenommen).
- [MS03b] Mönch, L.; Stehli, M.: An Ontology for Production Control of Semiconductor Manufacturing Processes. 1st German Conf. on Multi-Agent-Systems, Erfurt, 2003.
- [MSZ03] Mönch, L.; Stehli, M.; Zimmermann, J.: FABMAS – An Agent-Based System for Production Control of Semiconductor Manufacturing Processes. In: Proc. 1st Int. Conf. on Application of Holonic and Multi-Agent-Systems, Prag, 2003.
- [Re03] RealAgentS Homepage: <http://www.realagents.org/> [Stand 19.07.03]
- [RZ02] Reinheimer, S.; Zimmermann, R.: Einführung eines agentenbasierten Supply-Chain-Event-Management-Systems. HMD, 2002, S. 76f-88.
- [Sc03] Schwind, M. et al.: Price Controlled Resource Allocation For The Provision Of Information Products And Services Employing Combinatorial Auctions. In: Proc. 11th European Conference on Information Systems, Neapel, 2003.
- [St02] Stockheim, T. et al.: Coordination of Supply Webs based on Dispositive Protocols In: Proc. 10th European Conference on Information Systems, Danzig, 2002.
- [TW03] Timm, I.J.; Woelk, P.-O.: Ontology-based Capability Management for Distributed Problem Solving in the Manufacturing Domain. In: Proc. 1st German Conf. on Multi-Agent-Systems, Erfurt, 2003 (zur Veröffentlichung angenommen).
- [Zi02a] Zimmermann, R. et al.: Generic Agent Architecture for Supply Chain Tracking. In: Proc. 2nd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, IEEE Press, Marrakesh, 2002, S. 203-207.
- [Zi02b] Zimmermann, R. et al.: An Ontology for Agent-Based Monitoring of Fulfillment Processes. In: Workshop Proc. Ontologies for Multi-Agent Systems, Siguenza, 2002.
- [Zi03] Zimmermann, R.; Paschke, A.: PAMAS – An Agent-Based Supply Chain Event Management System, In: Americas Conf. on Information Systems - Mini-track on Intelligent Agents and Multi-Agent Systems, Tampa, 2003.